

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

JORIS VĖŽYS

ĮRENGINIO MAGNETOREOLOGINIŲ
SKYSČIŲ SAVYBIŲ TYRIMUI KŪRIMAS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai, mechanikos inžinerija (T 009)

2019, Kaunas

Disertacija rengta 2014-2018 metais Kauno technologijos universiteto Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultete Gamybės inžinerijos katedroje.

Mokslinis vadovas:

Prof. dr. Egidijus DRAGAŠIUS (Kauno technologijos universitetas, technologijos mokslai, mechanikos inžinerija – T 009).

Interneto svetainės, kurioje skelbiama disertacija, adresas:
<http://www.ktu.edu>

Redagavo: L.Pranevičienė (Mokymo centras "iCAN", MB)

© J. Vėžys, 2019

ISBN 978-609-02-1592-0

Leidinio bibliografinė informacija pateikiama Lietuvos nacionalinės Martyno Mažvydo bibliotekos Nacionalinės bibliografijos duomenų banke (NBDB).

PADĖKOS

A.A. Reginai Dalytei Šileikienei už pirmuosius rimtus žingsnius matematikoje ir vertingus patarimus renkantis specialybę;

Prof. Habil. Dr. Broniui Bakšiui už suteiktas žinias ir palaikymą bakalauro ir magistro studijose;

Disertacijos vadovui Prof. Dr. Egidijui Dragašiui už suteiktą didžiausią gyvenimo galimybę ir palaikymą, siekiant tikslų bei perduotas žinias;

Prof. Habil. Dr. Vitalijui Volkovui už didžiulę pagalbą liejant disertacijos pamatus;

Doc. Dr. Kazimierui Juzėnui už visokeriopą palaikymą;

Vyr. M. D. dr. Vytautui Jurėnui ir Ernestui Uldinskui už pagalbą atliekant eksperimentinius tyrimus;

Doc. Dr. Rasai Kandrotaitėi-Janutienei ir Lekt. Dr. Dariui Mažeikai už visokeriopą palaikymą ir naudingus patarimus;

Doktorantūros komiteto pirmininkui Prof. Habil. Dr. Vytautui Ostaševičiui už vertingas pastabas ir suteiktas galimybes;

Taip pat norėčiau padėkoti savo žmonai, dukroms, tėvams ir uošviams už tikėjimą manimi ir palaikymą visą šį laikotarpį.

TURINYS

ĮVADAS	6
1. LITERATŪROS ANALIZĖ IR DARBO UŽDAVINIŲ FORMULAVIMAS.....	11
1.1. Magnetiniu lauku valdomi skysčiai.....	11
1.2. Elektriniu lauku valdomi skysčiai.....	17
1.3. Pjezoelektrinės medžiagos.....	20
1.4. Magnetoreologinių skysčių sedimentacijos greičio matavimas. MR skysčių mikrodalelės dalinai pakeistos nanodalelėmis.....	25
1.5. Sedimentacijos nustatymas magnetoreologiniuose skysčiuose	31
1.5.1. Visiškai automatinis įrenginys skirtas sedimentacijos nustatymui.....	31
1.5.2. Mechaninis sedimentacijos nustatymas	33
1.5.3. Sedimentacijos nustatymas pasveriant.....	35
1.5.4. Sedimentacijos nustatymas panaudojant rentgeno spindulius	36
1.5.5. Sedimentacijos nustatymas naudojant specialų prietaisą.....	36
1.5.6. MR skysčio dalelių būsenos nustatymas panaudojant ultragarsą	37
1.6. Skyriaus apibendrinimas.....	38
2. MAGNETOREOLOGINIŲ SKYSČIŲ SEDIMENTACIJOS MATEMATINIS MODELIAVIMAS	39
2.1. Tolygus skysčio dalelių ilgos juostos judėjimas prie sienelės.....	39
2.2. Tolygiai slenkančios skysčio dalelių juostos virpesiai	47
2.3. Atgalinis tekėjimas	53
2.4. Tangentinės jėgos skaičiavimas.....	56
2.5. Sedimentacijos nustatymas magnetoreologiniuose skysčiuose matuojant jų elektrinę varžą.....	63
2.6. Koreguota atgalinio tekėjimo teorija	66
2.7. Eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas.....	71
2.8. Skyriaus apibendrinimas.....	74
3. SKIRTINGŲ MAGNETOREOLOGINIŲ SKYSČIŲ SEDIMENTACIJOS NUSTATYMO EKSPERIMENTINIS TYRIMAS	75
3.1. Eksperimentiniams tyrimams naudoti magnetoreologiniai skysčiai	75
3.2. Eksperimentinis magnetoreologinių skysčių tyrimas reometru.....	75

3.3.	Magnetoreologinių skysčių įmagnetinimo charakteristikų tyrimai	80
3.4.	Magnetoreologinių skysčių tyrimas mikroskopu.....	82
3.5.	Elektrinės varžos matavimo magnetoreologiniuose skysčiuose jutiklio sukūrimas	85
3.6.	Sedimentacijos nustatymas magnetoreologiniuose skysčiuose matuojant ritės magnetinę indukciją	91
3.7.	Sedimentacijos nustatymas magnetoreologiniuose skysčiuose matuojant magnetiniu lauku paveiktų skysčių elektrinę varžą	92
3.8.	Skyriaus apibendrinimas	94
4.	ĮRENGINIO MAGNETOREOLOGINIŲ SKYSČIŲ SEDIMENTACIJOS NUSTATYMUĮ SUKŪRIMAS IR JO DARBINIŲ CHARAKTERISTIKŲ NUSTATYMAS	95
4.1.	Magnetoreologinių skysčių sedimentacijos nustatymo įrenginys	95
4.2.	Sukurto įrenginio pritaikymas magnetoreologiniame stabdyje	96
4.3.	Magnetoreologinio stabdžio stabdymo momento priklausomybės nuo magnetoreologinio skysčio sedimentacijos laipsnio tyrimas.....	97
4.4.	Autonominio įrenginio magnetoreologinio skysčio sedimentacijos nustatymui sukūrimas	101
4.5.	Skyriaus apibendrinimas	103
	BENDROSIOS IŠVADOS	104
	LITERATŪROS SĄRAŠAS	105
	MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS	111

IVADAS

Temos aktualumas

Šiuo metu išrasta daug išmaniųjų medžiagų. Viena iš išmaniųjų medžiagų grupių – išmanieji skysčiai. Pagrindiniai skysčiai šioje grupėje yra elektoreologiniai ir magnetoreologiniai. Šie modernūs skysčiai pritaikomi vis plačiau, įvairiausiose srityse, pvz., medicinoje, karo pramonėje, automobilių pramonėje, aviacijoje ir kt. Nors elektoreologinius skysčius lengviau valdyti nei magnetoreologinius, kadangi elektoreologiniams skysčiams užtenka vien didelės elektros įtampos, tačiau jie turi žymių trūkumų. Jų šlities įtempiai yra mažesni negu magnetoreologiniuose skysčiuose.

Magnetoreologiniai skysčiai – tai išmaniųjų skysčių grupė. Šie skysčiai valdomi magnetiniu lauku ir gali pakeisti savo būseną iš skystos į kietą ir atvirkščiai vos per keletą milisekundžių. Šie skysčiai plačiai naudojami bei tyrinėjami Lietuvoje, kur tuo užsiima profesorai Ramutis Petras Bansevičius, Egidijus Dragašius bei kiti KTU mokslininkai. Nemažai mokslinių tyrimų taip pat atlieka ir Baltarusijos A.V.Luikovo Šilumos ir masės mainų instituto Minske, mokslininkai. Čia kuriami skirtingų modifikacijų MR skysčiai, bei pritaikomi realiuose mechanizmuose, pavyzdžiui amortizatoriuose. Visgi magnetoreologiniai skysčiai turi ir keletą trūkumų: didelė jų kaina (apie 1000 dolerių už 1 litrą) riboja jų prieinamumą. Taip pat didelė problema yra šių skysčių stabilumas – sedimentacija (lot. *Sedimentum* — nusėdimas, nuosėdos). Įrenginyje, veikiančiame su magnetoreologiniais skysčiais tai gali būti kritinis parametras, kadangi ilgesnį laiką nenaudotame mechanizme dalelės dėl žemės traukos nusėda. Įjungus mechanizmą ir paveikus MR skystį magnetiniu lauku, šis gali tinkamai nesuveikti, kadangi dalelės bus nusėdę apačioje, o nešantysis skystis – viršuje. Mokslininkai jau gana seniai bando išspręsti dalelių nusėdimo problemą. Tam panaudojamos tam tikros priemonės, nešančiam skystyje. Dar galima pridėti nano dalelių, taip sulėtinant nusėdimo procesą. Vienas didžiausių magnetoreologinių skysčių gamintojų JAV kompanija LORD savo tinklalapyje [54] teigia, jog jų gaminamuose skysčiuose dalelių nusėdimas (sedimentacija) praktiškai nevyksta. Tačiau šiame darbe tiriami du jų kompanijos pagaminti magnetoreologiniai skysčiai ir sedimentaciją galima vizualiai nustatyti jau maždaug po 24 valandų. O po 2 savaičių, dalelės, esančios magnetoreologiniuose skysčiuose, jau būna pilnai nusėdę.

Yra sukurta keletas būdų sedimentacijai magnetoreologiniuose skysčiuose nustatyti. Pvz., panaudojant ultragarsą, rentgeno spindulius, nustatant temperatūros pokytį, matuojant, kaip kinta ritės induktyvumas ir pan. Šiame darbe pristatomas naujas dar niekur nenaudotas sedimentacijos nustatymo būdas, matuojant elektrinę skysčio varžą. Šis būdas yra užregistruotas Lietuvos Patentų biure ir laukiama jo patvirtinimo.

Darbo metu buvo tiriami 5 skirtingi magnetoreologiniai skysčiai. Taip pat buvo sukurtas autonominis sedimentacijos matavimo įrenginys su dalelių išmaišymo funkcija. Šis įrenginys nustato sedimentacijos laipsnį magnetoreologiniame skystyje ir gali būti montuojamas į daugumą mechanizmų, dirbančių su magnetoreologiniais

skysčiais. Tikimasi, kad ateityje tokie įrenginiai išspręs magnetoreologinių skysčių nestabilumo problemą ir visi mechanizmai galės tinkamai dirbti.

Darbo tikslas ir uždaviniai

Šios disertacijos tikslas – sukurti įrenginį, magnetoreologinio skysčio (MR) sedimentacijos laipsniui nustatyti mechanizmuose, veikiančiuose su MR skysčiais bei skystį išmaišyti, kad palaikyti jo darbinės charakteristikas.

Šiam tikslui pasiekti iškelti uždaviniai:

1. Atlikti literatūros ir patentinės medžiagos analizę magnetoreologinių skysčių tyrimo, monitoringo bei darbinės būsenos palaikymo aspektais.
2. Sukurti matematinį modelį dalelių sedimentacijai MR skystyje aprašyti, bei įvertinti harmoninių virpesių įtaką sedimentacijai. Teoriškai išvesti elektrinės varžos priklausomybės nuo sedimentacijos laipsnio, veikiant skystį magnetiniu lauku ir kintant dalelių koncentracijai, išraišką $R = f(S)$. Palyginti eksperimentiškai ir teoriškai gautus rezultatus.
3. Ištirti skirtingus MR skysčius, su reometru gauti šlyties įtempių priklausomybę nuo šlyties kitimo greičio, neveikiant magnetiniam laukui bei jam veikiant.
4. Sukurti MR skysčių sedimentacijos laipsnio nustatymo bei skysčių išmaišymo metodus, sukurti specialius elektrinės varžos matavimo, veikiant magnetiniam laukui, jutiklius bei eksperimentiškai patvirtinti šiuos metodus.
5. Sukurti įrenginį MR skysčių sedimentacijos laipsnio nustatymui bei autonominiam nusėdusio skysčio išmaišymui.

Metodai ir priemonės

Disertacija buvo atlikta remiantis teoriniais, analitiniais ir eksperimentiniais tyrimais. Eksperimentiniams tyrimams buvo sukurti trys specialūs skirtingi elektrinės varžos matavimo jutikliai. MR mechanizmas buvo patobulintas adaptavus varžos matavimo jutiklius sedimentacijos laipsnio nustatymui bei pritaikius pjezoelektrinius vykdiklius MR skysčio išmaišymui.

Mokslinis naujumas

- Matematiškai aprašytas magnetoreologinio skysčio dalelių nusėdimas bei nustatytos jėgos, daleles veikiant harmoniniais virpesiais.
- Sukurtas naujas sedimentacijos laipsnio nustatymo magnetoreologiniuose skysčiuose metodas, matuojant magnetiniu lauku paveikto skysčio elektrinę varžą.
- Sukurti specialūs jutikliai elektrinės varžos magnetoreologiniuose skysčiuose nustatymui.

- Pritaikyti pjezoelektriniai vykdikliai, veikiantys rezonansiniu režimu, nusėdusio magnetoreologinio skysčio išmaišymui.
- Suprojektuotas ir pagamintas originalios konstrukcijos įrenginys, galintis nustatyti sedimentacijos laipsnį magnetoreologiniame skystyje bei jį išmaišyti.

Praktinė vertė

Sukurta MR skysčių matavimo bei monitoringo daugiafunkcinė sistema skirta sedimentacijos reiškiniui nustatyti ir pašalinti. Sedimentacijos laipsniui nustatyti panaudotas naujai sukurtas skysčio elektrinės varžos matavimo metodas. Skysčio išmaišymui pritaikyti pjezoelektriniai vykdikliai, kurie gaudami atgalinį ryšį nustato savo rezonansinį dažnį, o tai padeda efektyviau išmaišyti nusėdusį skystį. Sukurtu įrenginiu autonomiškai matuojamas sedimentacijos laipsnis ir gauti matavimo rezultatai įrašomi į microSD kortelę, dėlto gali būti vėliau analizuojami.

Gynimui teikiami darbo rezultatai

1. Sukurtas matematinis modelis magnetoreologinio skysčio dalelių sedimentacijai aprašyti, bei jėgos šias daleles veikiant harmoniniais virpesiais.
2. Matematiškai gauta išraiška, leidžianti įvertinti elektrinės varžos priklausomybę, kai MR skystį veikia magnetinis laukas, nuo sedimentacijos laipsnio.
3. Reometro pagalba ištirti penki skirtingi MR skysčiai, atlikta parametų analizė.
4. Sukurtas metodas, leidžiantis nustatyti sedimentacijos laipsnį MR skystyje – matuojant magnetiniu lauku paveikto skysčio elektrinę varžą.
5. Sukurti trys specialūs MRS elektrinės varžos matavimo jutikliai, varžos matavimui.
6. Išanalizuoti du skirtingi sedimentacijos nustatymo magnetoreologiniuose skysčiuose būdai ir atliktas jų palyginimas.
7. Nustatytos magnetoreologinio stabdžio stabdymo momento priklausomybės nuo magnetoreologinio skysčio sedimentacijos laipsnio.
8. Modifikuota MR stabdžio konstrukcija pritaikyta sedimentacijos laipsnio nustatymui ir skysčio, esančio viduje, išmaišymui.
9. Sukurtas ir pagamintas veikiantis įrenginys sedimentacijos laipsnio mechanizme su MR nustatymui.

Darbo apibavimas

Moksliniai rezultatai pristatyti 3-juose Mokslinės informacijos instituto duomenų bazės „ISI Web of Science“ leidiniuose, turinčiuose citavimo indeksą. Taip

pat 3-jose tarptautinėse mokslinėse konferencijose. Publikuota mokslinio išradimo Lietuvos Respublikos patento paraiška.

Disertacijos struktūra ir apimtis

Daktaro disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, išvados, literatūros sąrašas, mokslinių publikacijų sąrašas ir priedai. Pirmajame skyriuje pateikta aktyviųjų magnetoreologinių skysčių analizė, pjezoelektrinių medžiagų apžvalga bei kitų sedimentacijos nustatymo MR skystyje būdų apžvalga.

Antrasis skyrius – matematinis modelis. Šiame skyriuje yra matematiškai aprašytas vienos dalelės skersmens, begalinio ilgio juostos, sėdimas klampiam skystyje. Nustatyta dalelių sėdimo greičio priklausomybė nuo atstumo iki nejudamo indo, kuriame yra MR skystis. Taip pat matematiškai aprašyta harmoninių virpesių įtaka dalelių sėdimui bei susidarancios tangentinės jėgos. Šios jėgos stacionarios ir dinaminės dedamųjų pirmosios dvi aproksimacijos apskaičiuotos visiems penkiems vėliau eksperimentiškai tirtiems skysčiams. Išvesta elektrinės varžos priklausomybės nuo sedimentacijos laipsnio formulė.

Trečiasis darbo skyrius skirtas eksperimentiniams tyrimams. Jame eksperimentais patvirtinamas sukurtas matematinis modelis. Šiame skyriuje pateikiami penkių skirtingų skysčių tyrimai reometru, įmagnetinimo kreivės, nuotraukos mikroskopu, bei jutiklio elektrinei varžai matuoti kūrimo eiga. Su šiuo jutikliu atlikti sedimentacijos nustatymo eksperimentiniai tyrimai matuojant elektrinę varžą MR skystį veikiant magnetiniu lauku. Atlikti eksperimentiniai bandymai sedimentacijai nustatyti matuojant ritės induktyvumą.

Ketvirtajame skyriuje pateikti įrenginio, sedimentacijos laipsniui nustatyti bei maišymui atlikti projektavimo ir kūrimo darbai.

Kiekvieno skyriaus pabaigoje pateikti apibendrinimai. Darbo pabaigoje suformuluotos viso darbo išvados. Daktaro disertacijos apimtis 112 puslapių. Joje yra 67 paveikslai, 126 formulės ir 4 lentelės. Literatūros sąraše pateiktas 77 literatūros šaltinis.

Darbe vartojami žodžių sutrumpinimai:

MRS – magnetoreologiniai skysčiai

MR – magnetoreologiniai

PSN – įrenginys sedimentacijai MRF nustatyti

VPS – varžos priklausomybė nuo sedimentacijos

EVM – elektrinės varžos matavimas

ER – elektoreologiniai

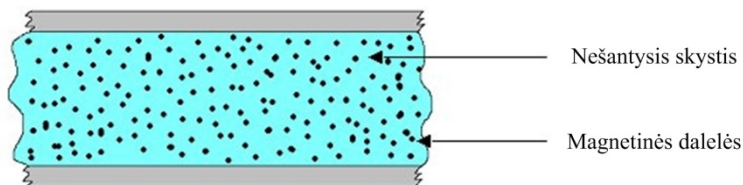
GER – „milžiniški“ elektoreologiniai

1. LITERATŪROS ANALIZĖ IR DARBO UŽDAVINIŲ FORMULAVIMAS

1.1. Magnetiniu lauku valdomi skysčiai.

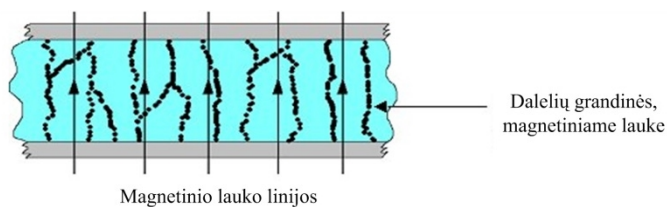
Vienos iš aktyvių medžiagų, kurios gali būti valdomos, kintamo stiprio magnetiniu lauku yra magnetoreologiniai (MR) ir feromagnetiniai skysčiai [1]. Šie skysčiai dažniausiai yra sudaryti iš geležies dalelių ir nešančiojo skysčio [2]. Paveikus šiuos skysčius magnetiniu lauku, jie iš skystos būsenos pasikeičia į tirštą [3]. Todėl keitinėjant magnetinio lauko stiprį, galima aktyviai keitinėti skysčių klampą [4]. Magnetinių skysčių klampos valdymui reikalingas elektromagnetas, kuris skirtingai, nei pastovus magnetas, leidžia geriau kontroliuoti šių skysčių klampą. Magnetoreologinis skystis nuo feromagnetinio skysčio skiriasi dėl juose panaudotų dalelių dydžių. Feromagnetinio skysčio dalelės yra mažesnės, nanometrų dydžio eilės (~ 10 nm). Magnetoreologinio skysčio dalelės yra didesnės, mikrometrų dydžio eilės ($0,1 - 10$ μm) [5], todėl šis skystis yra didesnio tankio, o dalelių judėjimas nevyksta pagal Brauno dėsnį [6]. Dėl šios priežasties MR skystį paveikus magnetiniu lauku, daleles nešantis skystis gali būti sustabdytas tarp magnetiniam lauke sukibusių dalelių. Feromagnetinio skysčio dalelės yra nanometrų dydžio eilės [7], todėl šis skystis išlieka mažesnio tankio ir išlaikomas dalelių judėjimas pagal Brauno dėsnį. Šiuo atveju paveikus feromagnetinį skystį magnetiniu lauku, daleles nešantis skystis negali būti sustabdytas tarp magnetiniame lauke sukibusių dalelių. Dėl šių savybių šie du magnetiniai skysčiai yra skirtingi [8].

Kaip jau minėta anksčiau, MR skystis yra sudarytas iš mikrometrų dydžio eilės magnetinių dalelių. Jų forma, dažniausiai būna sfera arba elipsė [9]. Šios dalelės yra sumaišytos su nešančiuoju skysčiu (vanduo, alyva, glikolis ar panašias savybes turintis skystis). Kai MR skystis nėra paveiktas magnetiniu lauku, šios dalelės gali laisvai plaukioti nešančiajame skystyje. Magnetiniu lauku nepaveiktas MR skystis pavaizduotas **1.1 pav.**



1.1 pav. Magnetoreologinis skystis nepaveiktas magnetiniu lauku [10]

Kai magnetinis laukas paveikia MR skystį, mikroskopinio dydžio dalelės ($0,1 - 10$ μm dydžio) įgyja bipolį magnetinį momentą ir tarpusavyje sukimba išsidėstydamos pagal veikiamo magnetinio lauko linijas (**1.2 pav.**). Kadangi šis skystis yra tarp dviejų magnetinių polių (šiaurinio ir pietinio), tai sukibusios dalelės sudaro $0,5 - 2$ mm dydžio junginius, kurie yra suvaržyti kuriamos magnetinio lauko jėgos. Šie magnetinių dalelių junginiai trukdo nešančiajam skysčiui lengvai tekėti. Dėl šių priežasčių, magnetiniame lauke MR skysčio klampa padidėja.



1.2pav. MR skystis paveiktas magnetiniu lauku [10]

Nutraukus magnetinį lauką, nelieta ir magnetinių dalelių stabdymo jėgų, todėl nešantysis skystis nėra stabdomas. MR skystis vėl tampa tokios pačios klampos ir tų pačių savybių, kaip ir prieš tai, kol nebuvo paveiktas magnetiniu lauku [10].

Kadangi paveiktas magnetiniu lauku MR skystis gali keisti savo būseną iš skystos į kvazi-kietą būseną, o nutraukus magnetinį lauką – grįžti į pradinę. Todėl paveiktas magnetiniu lauku magnetoreologinis skystis įgauna tokias savybes, kurios yra prilyginamos kietiems kūnams: šlytis, įtempiai, ir t.t. Tačiau šiame skystyje atsiradę įtempiai priklauso nuo jį veikiančio magnetinio lauko stiprio [11]. Šis dydis priklauso nuo magnetinio lauko tankio, kuriam pasiekus maksimalią reikšmę įvyksta magnetinis įsisotinimas. Šio reiškinio metu magnetinio lauko tankio reikšmė pradeda nebekisti, todėl magnetoreologinio skysčio būseną yra aprašoma pasinaudojus „Bigham“ plastiškumo funkcija, įvertinus skaičiuojamos medžiagos savybes. Tačiau MR skysčio charakteristikos dažniausiai neviseiškai atitinka apskaičiuotąsias pagal „Bighamo“ plastiškumo funkciją. Pavyzdžiui, veikiant žemiems magnetinio lauko įtempiams, kai MR skystis yra veikiamas silpnu magnetiniu lauku. Jis veikia kaip viskoelastinė medžiaga pagal sudėtingus modulius, kurie priklauso nuo magnetinio lauko intensyvumo. Todėl tokio MR skysčio klampa dar gali būti skaičiuojama ir pagal šlyties funkcijas, kur MR skystis paveiktas magnetiniu lauku keičia šlyties dydį. Šis dydis priklauso nuo MR skysčio klampos.

Magnetiniu lauku nepaveiktas magnetoreologinis skystis nepaklūsta Niutono dėsniams, tačiau šiuo atveju MR skysčio deviacija yra labai maža, kad jis galėtų būti skaičiuojamas pagal supaprastintą „Bighamo“ plastiškumo analizę, todėl MR skysčio būsenos modelis išreiškiamas taip:

$$\tau = \tau_y(H) + \eta \frac{dv}{dz}, \tau > \tau_y \quad (1.1)[12]$$

Čia τ – kirpimo įtempiai, τ_y – magnetinio lauko įtempiai, H – magnetinio lauko intensyvumas, η – Niutono klampa, $\frac{dv}{dz}$ – greitis pagal koordinačių sistemos z ašį.

MR skysčio nedidelė šlyties jėga (kai MR skystis nėra paveiktas magnetiniu lauku) turi siaurą pritaikymo sritį, todėl, kad šlyties jėgos dydis yra tik apie 100 kN. Tačiau, jeigu MR skystis yra paveiktas magnetiniu lauku ir statmenai magnetinio lauko linijoms veikia 2 MPa slėgis, šlyties jėga išauga iki – 1100 kN. Šią jėgą dar galima būtų padidinti pakeitus MR skysčio magnetines daleles. Pavyzdžiui, standartines MR skysčio 0,1 – 10 μm dydžio daleles pakeitus į šiek tiek didesnes

magnetines daleles. Todėl manipuliuojant šiais parametrais, MR skysčio pritaikymo sritis gali būti praplėsta.

Kitos MR skysčio svarbios savybės yra statinės magnetinės, kurias charakterizuoja B-H ir M-H histerezė. Atsižvelgiant į šias fizikines savybes, galima nustatyti, kokia bus reikalinga elektros srovė, kad prietaisuose su MR skysčiu sukurtume reikiamo stiprio magnetinį lauką. Magnetinė indukcija skysčiuose yra nustatoma įvairiais būdais ir prietaisais, tokiais kaip vibracinis magnetometras ar kintamo gradiento magnetometras.

Santykinai mažo magnetinio lauko magnetinis dipolis momentas, atsirandantis MR skysčio dalelėse, apskaičiuojamas:

$$m = 4\pi R^3 \beta H \quad (1.2)[12]$$

$$\beta = \frac{\mu_p - \mu_f}{\mu_p + 2\mu_f} \quad (1.3)[12]$$

čia R – dalelės spindulys; μ_p – magnetinis santykinis dalelių laidumas; μ_f – magnetinis santykinis MR skysčio laidumas, H – magnetinio lauko stipris.

Santykinai didelio magnetinio lauko momentas apskaičiuojamas:

$$m = \frac{4}{3} \pi \mu_0 R^3 M_s \quad (1.4)[12]$$

čia M_s – savaiminis magnetizmas ore, μ_0 – magnetinė skvarba vakuume.

Tarp skystos skysčio būsenos ir kietos skysčio būsenos yra toks ryšys:

$$\mu_0 M_f = \phi \mu_0 M_s \quad (1.5)[12]$$

čia ϕ – koeficientas, parodantis santykį tarp skysčio ir kitos būsenos, M_f – savaiminis magnetizmas skystyje.

Reologiniuose skysčiuose laikui bėgant gali nusėsti magnetinės dalelės. Taip yra todėl, kad nešančiojo skysčio ir geležies savybes turinčių dalelių tankiai yra skirtingi, ko pasekoje sunkesnę medžiagą stipriau veikia gravitacija [13]. Šis reiškinys gali atsirasti ir dėl įrenginyje atsiradusios išcentrinės ar magnetinės jėgos. Todėl gamintojai, kurdami įrenginius su MR skysčiu, pirmiausiai atsižvelgia į šias problemas, ir kurdami įrenginius, kartu kuria MR skysčio maišymo priemones [14]. Šios priemonės turėtų nesunkiai išmaišyti stipriu magnetiniu lauku arba sedimentacijos proceso paveiktas MR skysčio daleles.

MR skysčio dalelių nešančioji medžiaga nėra griežtai apribota, kaip kad jame panaudotos magnetinės dalelės. Todėl nešančioji medžiaga gali būti įvairi. Pavyzdžiui: tepalas, vanduo, glicerolis, oleino rūgštis; tetrametilamonio hidroksidas, citrinos rūgštis ar skystas sojų lecitinas, bei panašių savybių medžiagos [15]. Idealiu atveju, MR skysčio dalelės turėtų niekada nenusėsti žemyn, tačiau sukurti tokį skystį

yra praktiškai tas pats kaip sukurti „amžinąjį variklį“, nes praktiškai neįmanoma paneigti tam tikrų fizikos dėsnių. Tačiau mokslininkams dirbant MR skysčio sedimentacijos lėtinimo procesuose, buvo pastebėta jog šį procesą galima sulėtinti dviem būdais:

1. Panaudojant atitinkamą nešantįjį skystį,
2. MR skysčio daleles sumaišius su feromagnetinėmis nanodalelėmis.

Pirmu atveju atliktų tyrimų metu su įvairiais nešančiais skysčiais buvo pastebėta, kad oleino rūgštis; tetrametilamonio hidroksidas, citrinos rūgštis ir skystas sojų lecitinas mažina MR skysčio dalelių sedimentacijos procesą ir, tuo pačiu, gerina jo charakteristikas [16]. Pakeitus nešančiąją medžiagą, aplink magnetines daleles atsiranda micelės. Išvardintos nešančiosios medžiagos turi polines molekules, kurios, sąveikaudamos su įmaišytomis dalelėmis, kyla iš apačios į viršų. Apačioje susidariusios micelės absorbuoja nanodaleles ir neša jas viršun. Vykstant šiems procesams, yra padidinamas MR skysčio efektyvumas bei sulėtinamas sedimentacijos procesas.

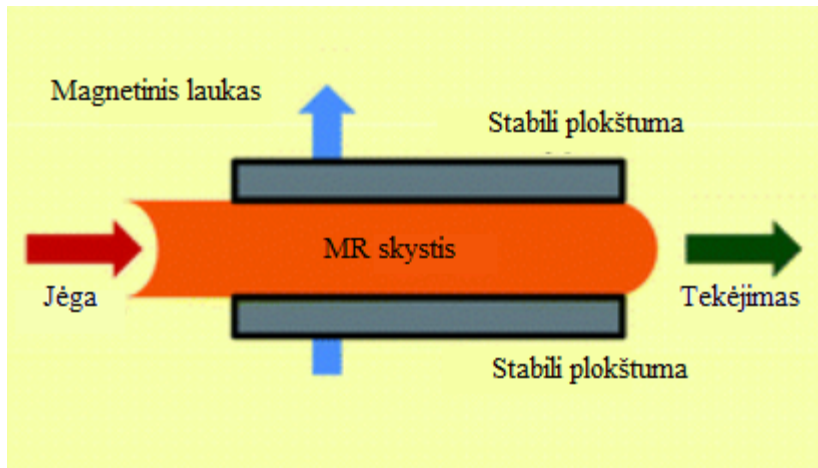
Antru atveju atliktų tyrimų metu mokslininkai pastebėjo, kad MR skystyje sumaišius nanodaleles su mikrodalelėmis, jos tarpusavyje sąveikauja, todėl pagal „Brauno“ judėjimo dėsni dėl nanodalelių lėtos sedimentacijos sulėtinama ir mikrodalelių sedimentacija [17]. Taip yra todėl, kad sunkesnės dalelės veikiamos gravitacijos, sėsdamos į indo dugną, atsimuša į plaukiojančias lengvesnes feromagnetines daleles ir yra sulaikomos. Dėl šių priežasčių sulėtėja MR skysčio dalelių sėdimo greitis bei pailgėja sėdimo laikas.

Abu būdai reikalauja gerokai mažesnių energijos sąnaudų MR skysčio permaišymui, negu nepakeistos sudėties MR skysčio išmaišymui. Pavyzdžiui, jei turime magnetoreologinį virpesių slopintuvą [18], tai jį užpildžius pakeistos sudėties MR skysčiu, skystis būtų permaišomas per vieną MR slopintuvo ciklą, tačiau užpildžius nepakeistos sudėties MR skysčiu – vieno ciklo jau nebeužtenka.

Sukurtos priemonės yra naudojamos ne tik todėl, kad būtų prailgintas MR skysčio dalelių sedimentacijos procesas, bet tuo pačiu, kad ilgiau būtų išlaikomos ir MR skysčio magnetinės savybės [19]. Šios savybės lemia sklandų ir tolygų įrenginio su MR skysčiu darbą. Pavyzdžiui, paveikus įrenginį nestipriu magnetiniu lauku, su gerai išmaišytu MR skysčiu, jis iš karto pradeda veikti silpnai. Tačiau paveikus įrenginį tokio paties stiprio magnetiniu lauku su sedimentacijos paveiktu MR skysčiu, jis gali nesuveikti, o padidinus magnetinio lauko stiprį – šis įrenginys pradės veikti netinkamai. Taip yra todėl, kad kol magnetinės dalelės nėra gerai išsimaišiusios, pradiniu momentu stiprus magnetinis laukas veiks tik nešantįjį skystį su nedidele magnetinių dalelių koncentracija, bet vėliau, kai MR skystyje dalelės pradės maišytis – įrenginio darbas, dėl stipraus magnetinio lauko, po truputį pradės gerėti [20]. Todėl įrenginių su MR skysčiu gamintojai, siekdami, kad būtų pasiektos geriausios būsimo įrenginio charakteristikos MR skysčiui kelia skirtingus reikalavimus: a) lėtas sedimentacijos greitis [21]; b) vėliau pasiekiamas magnetinis skysčio įsisotinimas ir c) išlaikomos tolygios MR skysčio charakteristikos [22].

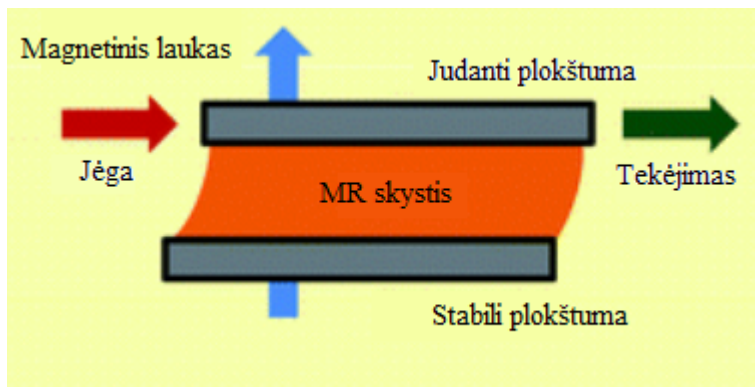
MR skystis kuriamuose įrenginiuose gali veikti pagal tris skirtingus darbo režimus. Pirmas – tekėjimo, antras – šlyties, trečias – slėgimo. Išvardinti skirtingi darbo režimai atvaizduoti **1.3 pav. – 1.5 pav.** Juose atvaizduotas tarpelis tarp dviejų

plieninių diskų, tarp kurių yra MR skystis. Mėlynomis linijomis atvaizduotos kuriamo magnetinio lauko linijos, žaliomis – tekėjimas, o raudonomis linijomis – jėga.



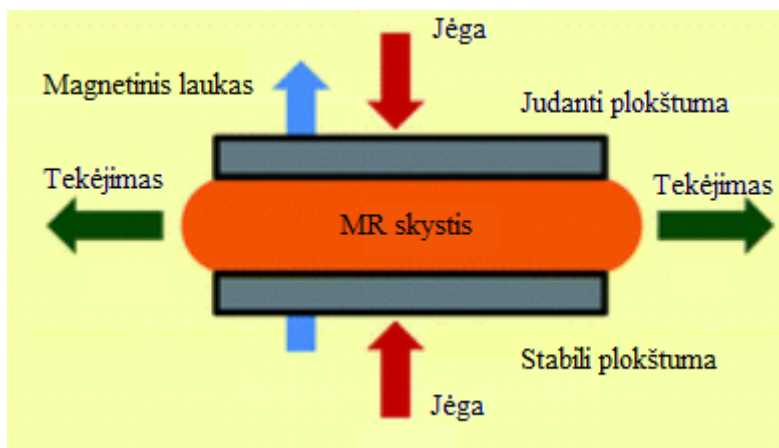
1.3 pav. MR skysčio pratekėjimo darbo režimas [23]

Pirmuoju atveju MR skystis teka tarp dviejų plieninių diskų, kuriuos statmenai kerta kuriamas magnetinis laukas (**1.3 pav.**). Tokiu būdu pratekantis MR skystis dėl magnetiniame lauke pakitusios klampos priešinasi tekėjimo kryptiai. Taip yra todėl, kad patekusios geležies dalelės į magnetinio lauko zoną, įgyja bipoli momentą ir sukibusios viena su kita priešinasi nešančiojo skysčio tekėjimui.



1.4 pav. MR skysčio šlyties darbo režimas [23]

Antruoju atveju plieninis diskas juda nejudančios stabilios plokštumos atžvilgiu. Šioje zonoje, kaip ir pirmu atveju, yra kuriamas magnetinis laukas statmenas plieniniams diskams (**1.4 pav.**), todėl MR skystis, dėl savo unikalių savybių kuriamo magnetinio lauko zonoje yra sulaikomas. Tačiau dėl pakitusios MR skysčio klampos ir plieninių diskų magnetinių savybių, diskų judėjimas yra stabdomas dėl šlyties.



1.5 pav. MR skysčio slėgimo darbo režimas [23]

Trečiuoju atveju plieniniai diskai artėja arba tolsta vienas nuo kito kuriamo magnetinio lauko zonoje. Šiuo atveju, kaip ir kitais dviem atvejais, kuriamo magnetinio lauko linijos yra statmenos judančių plieninių diskų atžvilgiu. Todėl tarp dviejų diskų esantis MR skystis dėl savo unikalių savybių kuriamo magnetinio lauko zonoje yra sulaikomas ir dėl pakitusios MR skysčio klampos jis priešinasi šiam plieninių diskų judėjimui (**1.5 pav.**). MR skysčio slėgimo metu, dėl pakitusios klampos, MR skystis bando šalintis iš šios zonos, o diskų atitraukimo metu – susidaro vakuumas ir MR skystis bando užpildyti didėjančią tarpelį tarp plieninių diskų.

Pateikti MR skysčio darbo režimai gali būti naudojami skirtingo tipo mechanizmuose [24,25,26]. MR skysčio pratekėjimo režimas gali būti taikomas: vibraciniuose slopintuvuose, amortizatoriuose ar kitokiuose mechanizmuose, kur reikalinga virpesių sukurtos energijos kontrolė. MR skysčio šlyties darbo režimas, gali būti naudojamas kuriant mechanizmus, kurie veikia stabdymo, sankabos ar kitokiuose judesio perdavimo mechanizmuose [27]. MR skysčio slėgimo režimas gali būti naudojamas mechanizmuose, kurių poslinkis yra ne didesnis nei 1 mm, bet reikalingas tikslus pozicionavimas. Pasinaudojant pateiktais MR skysčio darbo režimais, šis skystis gali būti taikomas kuriant įvairius mechatroninius mechanizmus, kuriems reikalingas valdymas. Tačiau nors ši inovatyvi medžiaga turi labai didelį potencialą, ji taip pat turi tam tikrų trūkumų [28]:

1. Didelis medžiagos tankis, o taip pat ir masė. Taip yra todėl, kad MR skystyje panaudotos geležies savybės turinčios dalelės.
2. Geros kokybės MR skystis yra brangus. Taip yra todėl, kad MR skystį gali sudaryti tik 0,1 – 10 μm dydžio dalelės.
3. Po ilgo MR skysčio naudojimo, skystyje esančios dalelės dyla. Dėl šių priežasčių MR skystis turėtų būti reguliariai keičiamas nauju.
4. Vykstanti MR skysčio dalelių sedimentacija. Nusėdusios MR skysčio dalelės blogina MR skysčio charakteristikas.

Išvardintų problemų sprendimui yra naudojami įvairūs būdai. Vienas iš būdų, kuriant mechanizmą su MR skysčiu – panaudoti tam tikrus skystį maišančius konstrukcinius sprendimus [29]. Kitas būdas – sukurti MR skystį su skirtingu

nešančiuoju skysčiu arba panaudojant įvairios formos magnetines daleles, kurios lėtintų sedimentacijos procesą.

1.2. Elektriniu lauku valdomi skysčiai

Vienos iš skystų aktyvių medžiagų, kurios gali būti valdomos kintamo stiprio elektriniu lauku – elektoreologiniai (ER) skysčiai [30]. Šie skysčiai yra sudaryti iš labai smulkių elektros srovei nelaidžių dalelių (dalelių skersmuo iki 50 μm), kurios yra sumaišytos su elektros srovei nelaidžiu nešančiuoju skysčiu. Elektoreologinis skystis turi ribotą klampos keitimo diapazoną; savo klampą jis gali pakeisti iki 100000 kartų. Nepaveiktas ER skystis yra skystos būsenos, paveiktas – panašus į konsistencinį tepalą. Sumažinus paduodamą įtampą, šis skystis tampa panašus į želę. Visas šias ER skysčio būsenas galima pakeisti per kelias milisekundes. Šis efektas dar yra vadinamas „Winslowo efektu“, nes amerikiečių išradėjas Wilis Winslow 1947 metais užpatentavo išrastą ER skystį. [31]

Elektoreologinis skystis yra naudojamas įrenginiuose, kurie gali dirbti kaip aktyvūs, santykinai greitai, hidrauliniai vožtuvai arba kaip sankaba [32]. Šie įrenginiai tarp atskirų kamerų ar diskų turi paliktą 1 mm dydžio tarpelį, kad sankabai ar vožtuvui aktyvuoti užtektų 1 kV įtampos dydžio. Elektoreologinė sankaba veikia tokiu pat principu kaip ir magnetoreologinė, tik skirtingai, nei MR sankaba, ER sankaba yra aktyvuojama elektriniu lauku, o ne magnetiniu. Padavus elektrinį lauką į ER sankabos diskus, jie paveikia ER skystį, kuris per kelias milisekundes pakeičia savo klampos charakteristikas. Tokiu pačiu principu veikia ir elektoreologiniai vožtuvai [33], kurie yra įmontuoti į ER smūgių slopintuvus. ER smūgio slopintuvuose pratekėjimo tarpelį paveikus elektriniu lauku, jis užsidaro ir trukdo nešančiajam skysčiui tekėti iš vienos kameros į kitą.

Kaip panaudoti ER skystį, mokslininkai buvo sugalvoję daugybę įvairių įrenginių [34]. Vienas iš pavyzdžių – JAV armijoje planavo sukurti ateities jėgos karius, kuriems būtų sukurtos neperšaunamos liemenės su ER skysčiu. Idėja buvo tokia, kad šiame skystyje galėtų būti išmirkoma kario apranga, ko pasekoje ši unikali apranga lyginant su šarvais būtų labai lengva. O savo būseną iš lanksčios į kietą pakeistų per kelias milisekundes. Kitas ER skysčio panaudojimas galėtų būti metalinių paviršių poliravimas arba kaip taktilinė valdymo/vaizdavimo priemonė neregiamis ar silpnaregiams. Taip pat ER skystis buvo pritaikytas lanksčiose elektroninėse sistemose, tokiuose, kaip lietimui jautrus ekranas ar klaviatūra, kurie veikia juos liečiant specialiu pieštuku [35]. Šioje sistemoje ER skystis sukietėdavo kai ekranas ar klaviatūra buvo veikiamas specialiu pieštuku, o priešingu atveju – ER skystis vėl tapdavo skystos būsenos. 2006 metais šį išradimą išrado ir užpatentavo „Motorolos“ kompanija.

Kaip jau minėta anksčiau, elektoreologinio skysčio klampa priklauso [36]: a) nuo paduotos įtampos dydžio į dvi elektrai laidžias plokšteles ir b) nuo tarpelio dydžio tarp tų pačių elektrai laidžių plokštelių. ER skysčio klampos pasikeitimas nėra jau toks paprastas. Klampos pokytį šiam skysčiui geriausiai apibūdina šlytis, kuri priklauso nuo elektrinio lauko įtampos dydžio. Kai elektoreologinis skystis aktyvuojamas, jo

klampa kinta pagal Binhamo plastiškumo modelį (panašiai kaip viskoelastinės medžiagos), kuris veikia iki tol, kol pasiekiamas tam tikras minimalus elektrinio lauko įtampos dydis tarp elektrodų [37]. Kai šis elektrinio lauko dydis peržengia šią ribą ir yra didinamas daugiau – ER skysčio klampą galima būtų aprašyti pagal šlyties įtempių dėsnį, kuriame proporcingai didėja šlytis. Todėl ER skysčio tekėjimo pasipriešinimas gali būti valdomas keičiant elektrinio lauko įtampos dydį.

Kaip jau minėta anksčiau, ER skystį sudaro elektros srovei nelaidžios dalelės ir elektros srovei nelaidūs nešantysis skystis. Paprasčiausias ER skystis buvo pagamintas sumaišius kukurūzų miltus su šviesiu augaliniu aliejumi. Tačiau norit turėti geresnį efektą – nešantįjį skystį reikėtų pakeisti silikoniniu tepalu.

ER skysčio efektą paaiškina dvi teorijos:

1. Pagal tamprumo sandarą arba kitaip vadinamo „vandens tilto“ teoriją;
2. Pagal elektrostatinę teoriją.

Tamprumo sandaros teorijoje ER skysčio charakteristikos kinta pagal trijų fazių sistemą. Pirmoje fazėje ER skysčio dalelės yra vienoje būsenoje, laisvai plaukiojančios nešančiajam skystyje, ko pasėkoje ER skystis gali būti prilyginamas kokiam nors mažos klampos skysčiui, pavyzdžiui vandeniui. Antrojoje fazėje ER skysčio dalelės yra antrojoje būsenoje, sudaro nestiprius junginius, ko pasėkoje ER skystis gali būti prilyginamas kokiam nors didesnės klampos skysčiui, pavyzdžiui tepalui. Trečiojoje fazėje ER skystis gali būti paveiktas arba nepaveiktas elektriniu lauku. Kol elektrinis laukas neveikia – ER skysčio dalelės yra nesukibusios ir ER skystis yra skystos būsenos. O kai elektrinis laukas veikia – ER skysčio dalelės susijungia į ištisas grandines nuo vieno elektrodo iki kito, ko pasėkoje ši dalelių grandininė struktūra trukdo laisvam nešančiojo skysčio tekėjimui, todėl ER skystis tampa kietos būsenos.

Elektrostatinėje teorijoje ER skysčio charakteristikos kinta pagal dviejų fazių sistemą [38]. Pirmoje fazėje ER skystį veikiant statiniu elektriniu lauku, jame esančios elektriniam laukui nelaidžios dalelės formuoja grandines, išsidėsčiusias statmenai elektrodams. Lygiai taip pat kaip ir prieš tai aprašytuose MR skysčio darbo režimuose, tik veikiant magnetiniam laukui. O antroje fazėje, kai ER skysčio neveikia statinis elektrinis laukas, jis būna skystos būsenos. Pagal šią teoriją gali veikti elektoreologinis skystis, kuris yra sudarytas iš elektriniam laukui nelaidaus nešančiojo skysčio ir specialių elektriniam laukui nelaidžių dalelių. Šių dalelių sandara yra elektros laidininkas, padengtas elektrai nelaidžiu izoliaciniu sluoksniu. Tokios sandaros ER skystis nedarba pagal pirmą „vandens tilto“ teoriją.

ER skysčiai, kurie gali dirbti pagal elektrostatinį efektą [39], gali veikti nuo nuolatinės srovės (DC) elektrinio lauko, o sukaukę energiją, kaip elektronikos komponentas – kondensatorius, gali ilgiau išlaikyti pakitusią ER skysčio būseną. Be to, šie ER skysčiai gali veikti ir nuo kintamos srovės (AC) elektrinio lauko. Šiuo atveju gaunama labai didelė ER skysčio klampos charakteristikų keitimo greitimeika.

ER skysčio dalelės yra elektriškai aktyvios. Jos gali būti: feroelektrinės, elektros laidininkai, padengti izoliaciniu sluoksniu, ir elektro-osmotiškai aktyvios dalelės [40]. Pirmieji du ER skysčio dalelių tipai turi didelę dielektrinę konstantą. Todėl ER skystis su šiomis dalelėmis aktyvuojamas jį paveikus santykinai didelėmis įtampomis. Jeigu

dielektrine konstanta bus nepakankama, tai gali įvykti ER skysčio pramušimas, ko pasekoje elektros srovei nelaidus ER skystis taps elektros srovės laidininku.

ER skysčio efektas taip pat priklauso nuo įrenginyje panaudotų elektrodų formos. Pradinė pakeistų elektrodų forma turėjo lygiagrečiai išdėstytus pusapvalius griovelius. ER skysčio efektas pagerėjo, palyginus su prieš tai buvusiais lygaus paviršiaus elektrodais. Tačiau modernizavus elektrodą padarytų griovelių formą į stačiakampę – efektas pagerėjo dvigubai. Vėliau buvo atrasta, kad norint dar labiau padidinti ER skysčio efektą, reikėtų elektrodus padengti elektros lauką poliarizuojančiomis medžiagomis. Šis padengimas paverčia elektros srovės nutekėjimus į naudingą ER skysčio efektą, o tuo pačiu sumažėja ir nenaudingi elektros srovės nutekėjimai į patį ER skystį.

Derinant įvairias medžiagas, 2003 metais buvo atrastas „Milžiniškas“ elektoreologinis (GER) skystis, kuris galėjo sukurti didesnę klampos pokytį, negu paprastas ER skystis [41]. GER skystis buvo sudarytas iš karbamidu padengtų nanodalelių, o pačios nanodalelės buvo sudarytos iš bario titano oksalato. Šios ER skysčio dalelės buvo sumaišytos su silikonine alyva. Tai buvo padaryta tam, kad padidinti paveikto ER skysčio klampos pokytį. Kadangi šios dalelės turi didelę dielektrinę konstantą, o jų dydis yra nanometrų eilės, tai šiam skysčiui nereikalingos didelės įtampos, kad pakeisti jo klampos savybes. Kitas GER skysčio privalumas yra tas, kad paveikus šį skystį didesniu nei 1 kV/mm elektriniu lauku, jo charakteristikos išlieka tiesiškos ir stabilios.

GER skysčio privalumai: jis gali geriau keisti klampą; jam nereikalingos didelės įtampos; maži elektros srovės nuostoliai. GER skysčiai gali būti naudojami kuriant išskirtinių charakteristikų virpesių slopinimo sistemas.

Elektoreologiniai skysčiai turi daug privalumų, tačiau turi ir trūkumų. Vienas didžiausių ER skysčių trūkumas yra dalelių sedimentacija [42]. Tai toks pats reiškinys kaip prieš tai aprašytuose magnetoreologiniuose skysčiuose. Dėl šios priežasties ER skystis atsisluoksniuoja į skystį ir į atskiras daleles. Šio reiškinio pasekoje labai pablogėja ER skysčio charakteristikos. Kad sulėtinti sedimentacijos procesą ER skysčiuose, yra taikomi labai panašūs būdai kaip ir prieš tai aprašytiems MR skysčiams. Tik skirtingai, nei MR skysčiams, į ER skystį yra įmaišoma dielektrinių nanodalelių. Kitas ER skysčio trūkumas – maitinimo įtampa. Kadangi jis keičia savo klampos savybes esant aukštomis įtampoms, o oro tarpelio pramušimo įtampa yra apie 3kV vienam milimetrui, todėl pagal saugumo techninius reikalavimus, šalia tokių įrenginių neturėtų būti nieko, ką galėtų pažeisti elektrinis laukas. Dar vienas ER skysčių, dirbančių pagal šlyties ir pratekėjimo metodą, trūkumas yra tas, kad jis turi ribotą klampos padidėjimą. Taip yra todėl, kad ER įrenginio elektrodai yra užfiksuoti ir tarp jų esančio ER skysčio klampa gali pasikeisti iš niutoninio skysčio būsenos į iš dalies kietą (pažliugusią) būseną. Tačiau, kai ER skystis dirba pagal slėgimo metodą, jis savo klampą gali pakeisti iš skystos būsenos į kietą būseną. Taip yra todėl, kad ER skystį slėgiant, elektrodai artėja vienas prie kito ir todėl ER skysčio dalelės veikiamos tokios pat dydžio įtampos sudaro vis stipresnius junginius. Naudojant šį ER skysčio darbo metodą, buvo kuriamas Brailio rašto vaizduoklis bei didelio efektyvumo sankabos sistemos.

ER skystį lyginant su kitais aktyviais skysčiais, mokslininkai pastebėjo, kad jam nereikalingos didelės elektros energijos sąnaudos, tam, kad galima būtų kontroliuoti santykinai didelę mechaninę energiją. Taip pat vienas iš pagrindinių ER skysčio privalumų yra didelė greitaveika [43], kuri leidžia labai greitai ir kokybiškai valdyti didelę mechaninę energiją arba hidraulinę jėgą.

1.3. Pjezoelektrinės medžiagos

Šios medžiagos buvo atrastos 18 amžiuje dviejų brolių Pierre Curie ir Jacques Curie [44]. Jie pastebėjo pjezoeftą tada, kai pakaitino atrastas kristalines medžiagas. Pastebėjus pjezoeftą kilo susidomėjimas juo ir norėta atrasti kuo daugiau panašių kristalinių medžiagų, turinčių tiesioginį pjezoeftą. 1881 metais, kai Gabriel Lipmann matematiškai aprašė fundamentalius termodinaminius principus pjezoelektrinėms medžiagoms, tuo metu Curie atrado ir patvirtino netiesioginį pjezoeftą. Šis efektas buvo aptiktas, kai elektros įtampa paveiktos pjezomedžiagos mechanškai pakeitė savo pradines formas. 1910 metais buvo atlikta daugiau atradimų tyrinėjant šias kristalines medžiagas.

Pirmą kartą pjezoelektrinis įrenginys buvo panaudotas pirmajame pasauliniame kare, kaip ultragarsinis laivų aptikimo prietaisas [45]. Šiame prietaise buvo sukurtas keitiklis, kuris buvo sudarytas iš plonų plieninių plokštelių ant kurių buvo užklijuoti kvarco kristalai. Šis keitiklis sugeneruodavo aukšto dažnio bangas ir paskleidęs vandenyje, matuodavo laiką, kol pjezoelektrinis keitiklis užfiksudavo atsispindėjusį paskleistą triukšmą. Kadangi buvo žinomas garso greitis vandenyje, tai išmatavus laiką, galima buvo apsiskaičiuoti atstumą iki kito laivo arba kokios nors kliūtis.

Po šio sėkmingo pjezoelektrinės medžiagos išbandymo, ji buvo pradėta plačiai naudoti įvairiose srityse. Buvo kuriami fotoaparatai, kasečių grotuvai, skysčių ir kietų medžiagų klampos ir elastingumo matavimo įrenginiai, atliekami medžiagų tyrimai, medžiagų nevienalytiškumo nustatymai ir t.t.

Per antrąjį pasaulinį karą JAV, Rusija ir Japonija atrado medžiagas, kurios pasižymėjo daug didesne pjezoelektrine konstanta nei prieš tai atrasti kristalai ir pavadino jas „feroelektrikais“. Šios medžiagos buvo bario titanatas (BaTiO_3) ir cirkonato titanatas (Zr. x. Ti. 1-x). Antrajame pasauliniame kare šios medžiagos buvo naudojamos kaip radijo dažnio trukdytuvai vykdant įvairias atakas.

Po antrojo pasaulinio karo, pjezoelektrinių medžiagų tyrimai nebuvo sustabdyti ir vyksta iki šiol. Dėl to atsirado įvairių įrenginių su šiomis medžiagomis. Šiandieninėje visuomenėje kiekvienas žmogus su savimi nešiojasi kelis pjezoelektrinius įrenginius, kurie yra sumontuoti mobiliajame telefone, laikrodyje, žiebtuvėlyje, širdies stimulatoriuose, vaikiškuose bateliuose ir t.t. Taip pat šios medžiagos naudojamos ir transporte, buityje, gamyklose, astronomijoje ir daugelyje kitų sričių.

Pjezoelektrinės medžiagos yra priskiriamos aktyvių medžiagų rūšiai. Jas paveikus elektriniu lauku, jos gali keisti savo mechanines savybes, o paveikus mechanškai, jos gali sugeneruoti elektrinį lauką. Pjezoelektrinių vykdiklių gamybai dažniausiai naudojamos dvi medžiagos – kristalinis pjezokvarcas ir pjezoelektrinė keramika (**1.6 pav.**). Šių medžiagų naudojimo sritys dėl fizikinių savybių skirtingumo

yra skirtingos: pjezokvarcas naudojamas keitikliuose, kuriuose reikalingi pastovūs dažniai, pjezokeramika – keitikliuose, kuriuose reikalingi amplitudiniai pokyčiai. Viena iš svarbiausių keitiklių su pjezokvarcu savybių yra pjezorezonatoriaus kokybė ir savybių stabilumas.



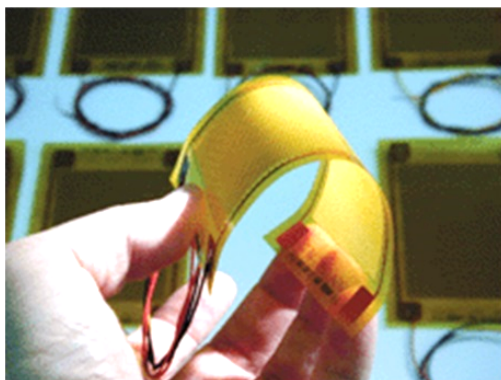
1.6 pav. Pjezokeraminiai elementai [46]

Lyginant kvarco ir pjezokeramikos savybes buvo pastebėtas akivaizdus kvarco pranašumas. Žemą keramikos kokybę sąlygoja jos struktūra – didelis grūdėtumas, nevienalytiškumas. Be to, keramikos savybės ilgainiui kinta – keramika praranda pjezoeftą.

Svarbi kvarco savybė – histerezės neturėjimas; tuo tarpu pjezokeramika turi labai stiprią histerezę [47], todėl pjezokeramika praktiškai nenaudojama pjezorezonansinio tipo keitikliuose, išskyrus akustinius. Kadangi akustiniai keitikliai yra amplitudinio tipo, todėl jų veikimui pjezoelemento savybių kitimas turi mažesnę įtaką.

Pjezokeramika labai praverčia ten, kur reikia sudėtingo profilio ir pjezosavybių pjezoelemento, kadangi ji gali būti supresuota bent kokios formos ir reikiamai poliarizuota. Pjezokeraminių medžiagų senėjimas ypač aiškiai pasireiškia esant didelėms mechaninėms apkrovoms bei ekstremaliems temperatūrų pokyčiams. Esant tokioms sąlygoms, apie 10 % pjezoelektrinių, dielektrinių konstantų pasikeičia negrįžtamai. Priešingai nei pjezokeramika, pjezokvarcas yra daug kartų stabilesnis.

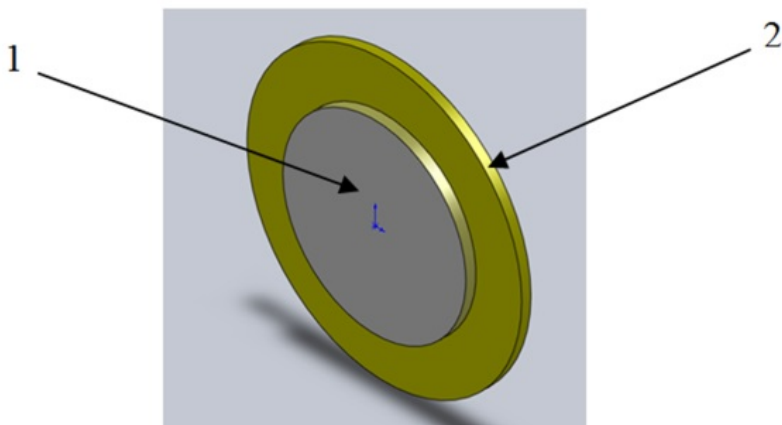
Norint, kad pjezorezonatoriai atliktų tam tikras funkcijas bei būtų pritaikomi įvairiuose įrenginiuose, jie turi būti pagaminti pagal tam tikrus konstrukcinius reikalavimus. Plačiausiai naudojami pjezorezonatoriai [48], kuriuose elektrodai yra tiesiogiai uždėti ant pjezoelemento, kuris pagamintas iš vienalytės pjezomedžiagos (monokristalo arba keramikos). Per daugelį metų pjezoelektriniai elementai tobulėjo, todėl pastaruoju metu galima surasti pjezoelektrinių polimerų arba plėvelių (**1.7 pav.**), taip pat pjezoelektrinių elementų kombinuotų su kompozitinėmis medžiagomis ir t.t.



1.7 pav. Pjezoelektrinė plėvelė [49]

Dar yra naudojami pjezorezonatoriai, kurių elektrodai nuo pjezoelemento atskirti vakuumu arba inertinių dujų tarpu. Tokios konstrukcijos privalumas – didesnis pjezorezonatoriaus stabilumas. Šiuose pjezorezonatorių konstrukcijose tarpo dydis būna mažiau nei 1000 mikronų.

Kito tipo pjezorezonatoriai yra sudėtiniai. Kai į vieną konstrukciją būna sujungtos skirtingos medžiagos, pavyzdžiui, diskinis pjezoelektrinis bimorfas (**1.8 pav.**). Jis sudarytas iš ne pjezoelektrinio vibratoriaus, sujungto su pjezoelektrinių virpesių žadinančiu keitikliu. Bimorfuose [50] panaudotas vibratorius dažniausiai gaminamas iš aukštos kokybės metalo, o pjezoelementas – iš medžiagos, turinčios didelį elektromechaninio ryšio koeficientą.

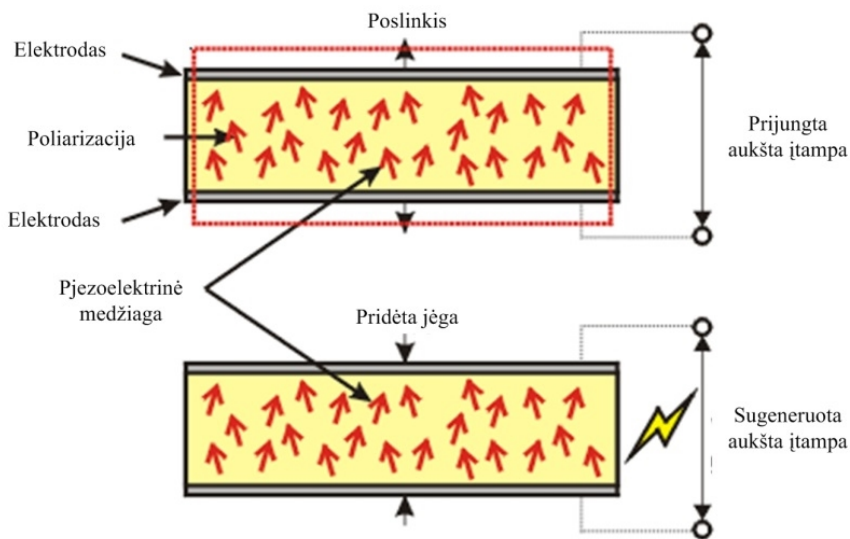


1.8 pav. Diskinis pjezoelektrinis vykdyklis. 1 – pjezoelektrinis virpesių žadinantis keitiklis, 2 – ne pjezoelektrinis vibratorius

Maksimalus tokių konstrukcijų savųjų virpesių dažnis siekia keletą megahercų. Norint padidinti dažnumą, galima siekti žadinant aukštesnes harmonikas, o naudojant sluoksniuotas medžiagų struktūras, pavyzdžiui cinko oksidą (ZnO) ir safyrą, gaunami rezonatoriai, veikiantys iki kelių gigahercų.

Ši aktyvi medžiaga gali veikti dviem režimais [51]. Pirmas – kai jos mechaninės savybės keičia įtampa, ir antras – kai ji paveikta mechaniškai pati sugeneruoja

elektrinį signalą. Šis reiškiny yra pavadintas pjezoelektriniu efektu. Pjezoelektrinis efektas yra suprantamas kaip linijinė elektromechaninė sąveika tarp mechaninės ir elektrinės būsenos kristalinėje medžiagoje, be simetrijos pokyčio. Pjezoelektrinis efektas yra besikeičiantis procesas, kuris gali būti tiesioginis (**1.9 pav.**), kai pjezoelektrinė medžiaga paveikta mechaninės jėgos – sugeneruoja elektros iškvovą arba netiesioginis, kai pjezoelektrinė medžiaga paveikta elektros energijos, pakeičia savo pirminę mechaninę būseną. Pavyzdžiui, švino cirkonato titanato ($\text{Pb}(\text{Zr. x. Ti. } 1-x))$ kristalai gali sugeneruoti pakankamai didelę įtampą. Šį kristalą paveikus mechaniškai, jis yra deformuojamas apie 0,1 %, lyginant su pradiniu kristalo dydžiu, o prijungus švino cirkonato titanato kristalą prie išorinio elektros šaltinio ir padavus įtampą, galima keisti jo pradinį dydį iki 0,1 % lyginant, su pradiniu kristalo dydžiu.



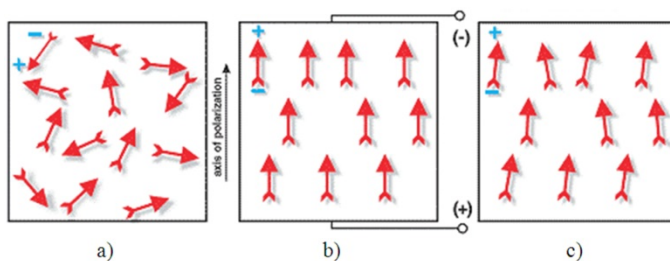
1.9 pav. Tiesioginį pjezoefektą paaiškinanti schema [52]

Pjezoelektrinis efektas yra glaudžiai susijęs su atsitiktiniais elektriniais bipoliais momentais kristalinėje medžiagoje. Pastarasis gali būti sukeltas kristalinės medžiagos struktūros jonų su asimetrine aplinkos įkrova (BaTiO_3 ir PZTs kristalinės medžiagos) arba tiesiogiai paveikus kristalinės medžiagos molekulinis junginius.

Tradicinė pjezokeramika yra pagaminta iš „Perovskite“ kristalo, kurių kiekvienas susideda iš mažo keturvalenčio metalo jono, dažniausiai titano arba cirkonio, susijungusio su didesniais divalenčiais metalo jonais, dažniausiai švino arba bario, ir O_2 jonais. Toks kristalas turi tetragoninę arba gretasienio rombo simetrijos struktūrą, o kiekvienas kristalas turi dipolio momentą. Paruošti komponentai miltelių pavidalu yra sumaišomi pagal specialią sudėtį ir specialias proporcijas, po to kaitinami tol, kol įvyksta reakcija ir tampa vienalyčiai milteliais. Gautus miltelius maišo su organinės kilmės rišančiosiomis medžiagomis ir suformuoja atitinkamas formas (disko, juostos, plokštės ir t.t.) Šie elementai yra sukepinami į tankią kristalinę struktūrą pagal specialias technologijas, kuriuose

pagrindiniai kriterijai yra išlaikymo laikas ir temperatūra. Suformuoti elementai yra ataušinami ir ant atitinkamų paviršių uždedami elektrodai.

Netoli pjekzokeramikos kritinės temperatūros (Kiuri taškas), kiekvienas kristalas turi paprastą kubo simetriją, be jokio dipolio momento. Tačiau kai temperatūra yra žemiau Kiuri taško, kiekvienas kristalinis elementas įgauna tetragono arba gretasienio rombo simetrijos struktūrą ir dipolinį momentą. Gretimi dipoliai suformuoja atskirus regionus, kurie vadinami „Weisso sferomis“. Šios sferos dažniausiai būna susimaišiusios, bet gali būti ir sugrupuotos, panaudojant poliškumo procesus (šie procesai nėra tokie patys kaip magnetiniai). Šiame procese kristalinę medžiagą veikia stiprus elektrinis laukas ($\sim 3 \text{ kV/mm}$), ko pasekoje ji dirba aukštoje temperatūroje, tačiau žemesnėje negu pjekzokeramikos Kiuri taškas. Esant šioms sąlygoms, pjekzoelektrinė medžiaga gali būti poliarizuota norima kryptimi. Poliaringumas priklauso nuo paduotos įtampos poliškumo, todėl padavus įtampą – dipoliai tvarkingai išsirikiuoja. Po to, palaikant paduotą įtampą, pjekzokeramika yra aušinama, o ataušinus – sendinama. Esant šioms sąlygoms poliaringumas išlieka nepakitęs (**1.10 pav.**). Tačiau ne visos pjekzoelektrinės medžiagos gali būti poliškos. Tai priklauso nuo pjekzoelemente panaudotų medžiagų.



1.10 pav. Pjekzoelektrinės medžiagos poliarizavimo schema. a) nepoliarizuota, b) polarizavimas, c) poliarizuota [52].

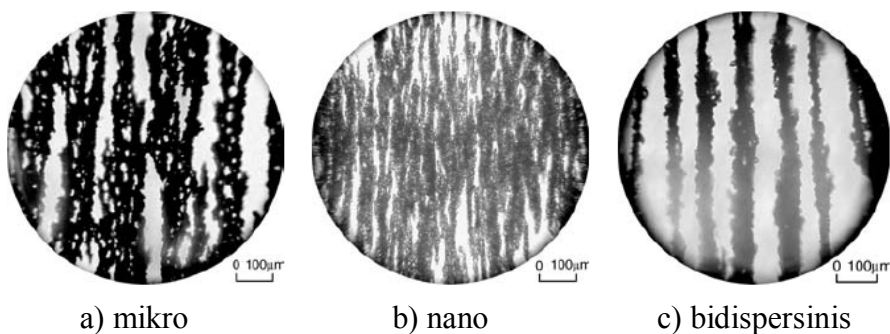
Kita galima pjekzoelektrinio efekto poliarizacija, atsiranda tada, kai ji yra paveikiama mechaninių įtempių. Tai gali būti dėl dipolio persikonfigūravimo indukcijos aplinkoje arba dėl dipolio momento molekulinio perorientavimo, kuris kyla dėl išorinių įtempių. Pjekzoelektriškumo efektas gali pasireikšti skirtingose poliarizacijos stiprumuose, tiek vienakrypčiuose, tiek dvikrypčiuose mechaniniuose poveikiuose. Šis efektas priklauso nuo:

1. Poliaringumo orientacijos kristalinėje medžiagoje;
2. Kristalinės medžiagos simetriškumo;
3. Kristalinės medžiagos paveiktų mechaninių įtempių.

Pjekzoelektrinės medžiagos poliaringumo pokytis priklauso nuo skirtingų įkrovimo tankių ir kristalų paviršių. Pavyzdžiui, keičiant elektrinio lauko stiprumą tarp kristalinės medžiagos paviršių, kol įkrovos tankis ir poliarizacija taps tokia pati ($[C/m^2] = [Cm/m^3]$), tačiau pjekzoelektriškumas neįvyksta ne dėl įkrovos tankio pokyčio medžiagos paviršiuje, bet dėl bipolio tankio visoje kristalinėje medžiagoje.

1.4. Magnetoreologinių skysčių sedimentacijos greičio matavimas. MR skysčių mikrodalelės dalinai pakeistos nanodalelėmis

MR skysčiai turi didelius įtempius: 20 kPa – 100kPa. Didesnis Fe dalelių kiekis skystyje iššaukia didesnius įtempius, kurie gali būti skysčio takumo ir klampos kaitos priežastis. Bet yra linkę nusėdimui kuomet jų neveikia magnetinis laukas arba kuomet magnetinis laukas yra labai silpnas. Dalelių ir nešančiojo skysčio tankio skirtumas (dalelių - $\sim 7,5 \text{ g/cm}^3$, nešančiojo skysčio $\sim 1,0 \text{ g/cm}^3$) yra ganėtinai didelis. Matant akivaizdų magnetoreologinio skysčio sudedamųjų komponentų tankio skirtumą, nesunku padaryti išvadą, kad sedimentacija yra neišvengiama. Vykstant sedimentacijai, ženkliai pakinta MR skysčio reologinės savybės, to pasekoje ženkliai sumažėja ir magnetoreologinio skysčio efektyvumas. Norint atstatyti reikiamas reologines savybes, reikia pašalinti sedimentaciją: skystį išmaišant arba keičiant cheminę ir fizikinę skysčio būseną. Norint palengvinti sedimentacijos problemą, reikia dalinai pakeisti mikrodaleles i nano daleles, kurių dydis gali kisti ribose nuo 10 nm iki 100 nm. Tai yra daroma tam, kad skystis taptų bidispersiniu [53].



1.11 pav. MR skysčio grandininis išsidėstymas paveikus jį magnetiniu lauku [53]

(1.11 pav., a) nufotografuotas mikro struktūros magnetoreologinis skystis, kuris yra magnetiniame lauke. Mikro dalelės yra santykinai neapdirbtos ir šiurkščios. Dalelių grandinėlė įgyja lakštinį vaizdą. (1.11 pav., b) nufotografuotas nano struktūros magnetoreologinis skystis, kuris, kaip galime daryti išvadas iš vaizdo, atitinka aukštos kokybės magnetoreologinio reiškinių vaizdą, bet turi vieną minusą – mažėjančius įtempius. (1.11 pav., c) vaizdas – bidispersinio skysčio vaizdas, kuriame matome sumaišytą mikro ir nano dalelių sandaros rezultatą. Jis yra visiškai skirtingas nuo nano ar mikro sudėtinių dalių turinčio skysčio vaizdo.

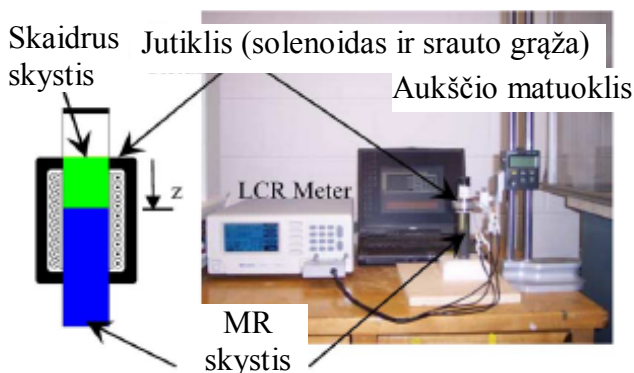
Nano eilės dalelės, esančios magnetoreologiniame skystyje, įgalina savaiminį persimaišymą iki pradinės būsenos. To priežastis yra šiluminė konvekcija. Termodinaminės jėgos priešinasi gravitacinėms jėgoms, tokiu būdu nutolindamos sedimentacijos pradžią. Šios dalelės veikia kaip kamščiai, užpildantys tarpus tarp mikro dalelių, tai yra dėl mažėjančio dalelių sėdimo, įgalina dalelių sklaidą visame skysčio tūryje ir palaiko pastovų savaiminio maišymosi procesą.

Šis būdas turi savų trūkumų: mažėjantys skysčio įtempiai, kurių pasekoje nukenčia magnetoreologinio skysčio efektyvumas.

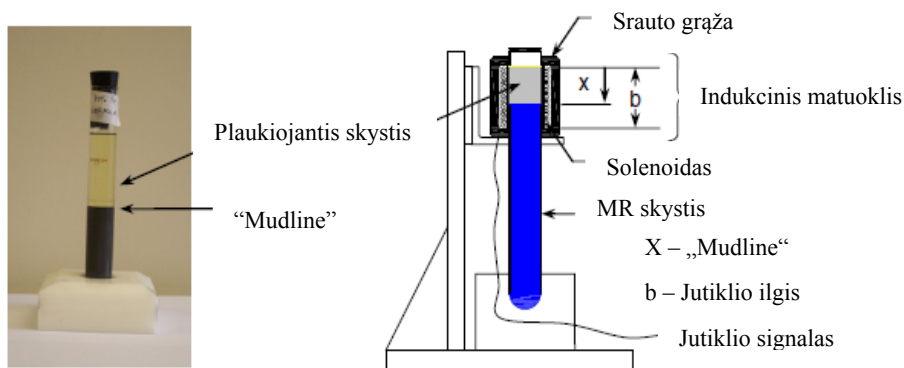
Sedimentacijos terminą apibrėšime keletu dydžių charakterizuojančių ją:

- Sedimentacijos greitis – dalelių nusėdimo greitis.
- Sedimentacijos laipsnis – šis dydis apibrėžia išmatuotą nuosėdų kiekį, esant tam tikram nusėdimo greičiui.

Kad galėtume išmatuoti šio naujos sudėties skysčio efektyvumą, reikia atlikti bandymus: vienas jų – išmatuoti sedimentacijos greitį, kitas – apskaičiuoti MR skysčio įtempius. Tam, kad išmatuoti pasikeitusį sedimentacijos greitį su pakeista MR skysčio struktūra, buvo panaudotas induktyvinis solenoidas (kaip sensorius), kuris buvo tvirtinamas sekti „mudline“ kelio vietą. „Mudline“ – tai linija, kuri riboja nusėdusias magnetines daleles ir skaidrų nešantįjį skystį. Kuomet MR skystyje vyksta sedimentacija „mudline“ linija leidžiasi žemyn tol, kol geležies dalelės visiškai nusėda konteinerio dugne. Magnetinis pralaidumas yra pamatuojamas sensoriumi. Atskiruose skysčio lygmenyse magnetinis pralaidumas yra skirtingas, kuris yra tiesiogiai proporcingas magnetinių dalelių kiekiui. Taip pat matuojant krentantį magnetinės indukcijos greitį nuo MR skysčio nusėdimo, galima išmatuoti „mudline“ kitimo vietą, kuri kinta skersine sensoriaus kryptimi. Indukcinis matavimo prietaisas susideda iš indukcinio matuoklio (su duomenų rinkimo sistema), jutiklio (ritė, cilindras ritės apvijoms, srauto grąža), aukščio matuoklio ir bazės skysčio padėčiai nustatyti. Pagrindinis parametrų matavimo pagrindas yra kintanti sedimentacija kaip funkcija kintančios skysčio sudėties (santykis mikro ir nano dalelių).



1.12 pav. Sedimentacijos matavimo tyrimų stendas: Z – atstumas nuo jutiklio viršaus iki „mudline“ [53]



1.13 pav. Sedimentacijos nustatymo tyrimų standas [53]

MR skysčio įtempiai buvo nustatyti panaudojant reometrą su lygiagrečiais diskais MCR300.

Nusėdimo vaizdavimą galime suskirstyti ir į tris sritis: žemesnioji sritis, kurioje magnetinis laidumas yra maksimalus dėl didelės koncentracijos susiformavusių Fe dalelių grandinių, vidurinioji sritis, kurioje pralaidumas ir Fe dalelių koncentracija yra pastovi, ir viršutinioji sritis, kurioje magnetinis pralaidumas yra labai minimalus ir Fe dalelių koncentracija yra taip pat labai maža. Todėl yra matoma aiški linija tarp aukštesniosios srities ir vidurinėsios srities, kuri yra vadinama „mudline“ (ang. mudline). Nusėdimo metu matoma linija tarp aukštesniojo lygmens (skaidrus skystis) ir apatinės srities (MRF) – yra „mudline“. Kai „mudline“ leidžiasi žemyn, tuomet Fe dalelių koncentracija viršutiniame sluoksnyje mažėja, to pasekoje mažėja ir magnetinis pralaidumas. Tai yra labai geras būdas įvertinti sedimentacijos greitį – išmatuojant magnetinio pralaidumo dydį. Sedimentacija gali būti išreiškiama procentine dalimi:

$$R = \frac{a}{a+b} \cdot 100\% \quad (1.6)[53]$$

čia R- sedimentacijos procentinis dydis, a – skaidraus skysčio stulpelio ilgis, esantis virš „mudline“ linijos, b – stulpelio ilgis esantis žemiau „mudline“ linijos.

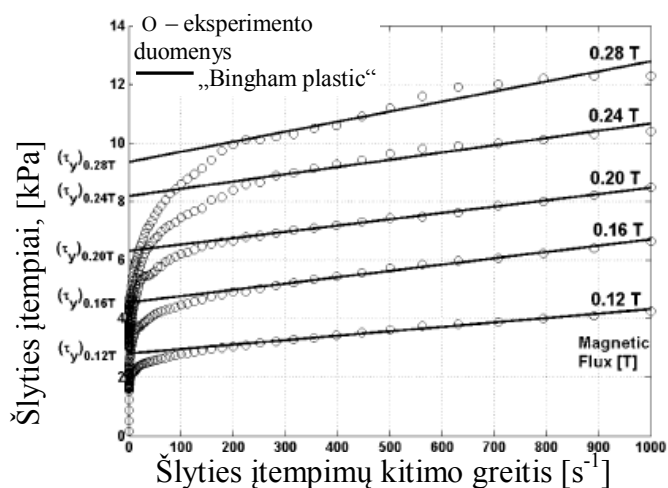
Magnetinė indukcija yra tiesiogiai proporcinga magnetiniam pralaidumui. Tai reiškia, kad magnetinio pralaidumo kaita gali būti nustatoma įvertinus magnetinės indukcijos pokyčius. Tiriamojo objekto matavimo aparatas taip pat dar susideda iš GW INSTRON LCR-816 magnetinės indukcijos matuoklio ir aukščio matuoklio.

MRF sudedamosios Fe dalelės yra pagamintos vidutiniškai nuo 2 iki 10 μm dydžio. Nanodalelės yra sintetinės panaudojant mikro bangų patentuotą technologiją. Vidutinis tokių dalelių dydis yra apie 40 nm. Kaip žinoma iš ankščiau, MRF susideda dar ir iš tam tikro nešančiojo skysčio, kuris šiuo atveju buvo silikoninė alyva, o lecitinas buvo panaudotas kaip rišamoji skysčio medžiaga. Visa tai buvo sumaišyta specialiaje maišytuve prie 11000 aps/min greičio. Tiek mikro, tiek nano dalelės į alyvą yra beriamos palaipsniui maišymo proceso metu. 1.1 lentelėje yra pateikiamos galimos procentinės santykinės nano ir mikro dalelių dalys.

1.1 lentelė. MRF santykinės sudedamosios dalys [53]

Bendras Fe dalelių kiekis skysčio tūryje %	50	50	50	60	60	60
Mikrodalelės:nanodalelės, santykis	100:00	90:10	85:15	100:100	90:10	85:15
Bendras Fe dalelių kiekis skysčio tūryje %	70	70	70	80	80	80
Mikrodalelės:nanodalelės, santykis	100:00	90:10	85:15	100:100	90:10	90:10

Šlyties įtempiai MR skystyje yra pamatuojami naudojant reometrą su dviem lygiagrečiais diskais. Pamatavus buvo gauti rezultatai, iš kurių buvo nubraižyta šlyties įtempių nuo šlyties kitimo laiko priklausomybė.



1.14 pav. MR skysčio, kurio sudėtinės dalys: 60% viso skysčio sudaro feromagnetinės dalelės, o mikro ir nano dalelių santykinis pasiskirstymas yra 85:15. [53]

Šlyties įtempiai yra apskaičiuojami:

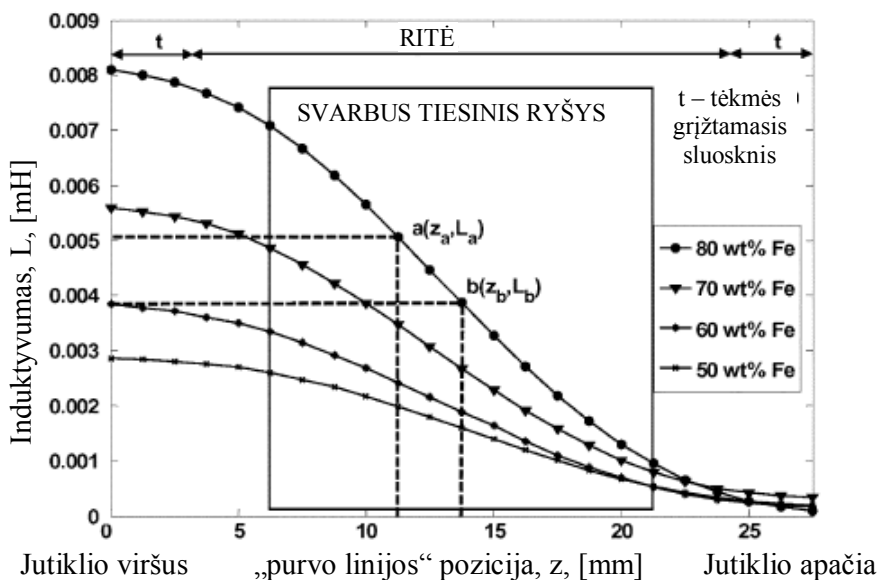
$$\tau = \tau_y + \mu \dot{\gamma} \quad (1.7)[53]$$

čia – τ_y – skysčio įtempiai, μ – MRF klampa paveikus magnetiniu lauku, $\dot{\gamma}$ šlyties kitimo greitis.

„Mudline“ padėtis (**1.15 pav.**) buvo iš pradžių nustatyta panaudojant ankščiau aprašytą sedimentacijos aparatą. Šios kreivės buvo nubraižytos išmatavus magnetinę indukciją. Kaip jau ankščiau buvo minėta magnetinė indukcija yra išmatuojama. Jutiklis buvo stumdomas aukštyn, žemyn rankiniu būdu. Jutiklis matavimą pradėjo nuo pradinės padėties ir baigė matavimą ties galine padėtimi, atsidurdamas virš „mudline“. Atskaitos vieta buvo judanti z ašis su pradiniu atskaitos tašku jutiklio viršuje. „mudline“ pozicijos kreivės rodo, kad induktyvumas yra tiesiogiai proporcingas „mudline“ pozicijai. Linijinė priklausomybė tarp induktyvumo ir „mudline“ padėties egzistuoja esant tokioms sąlygoms: kuomet „mudline“ padėtis yra ribose nuo 6,5 iki 21,5mm. Jei paimtumėm du taškus a ir b esančius (**1.15 pav.**) kaip pradinę ir galutinę „mudline“ pozicijas, tuomet „mudline“ pozicija gali būti išskaičiuojama:

$$z = \frac{L_a - L(z)}{L_a - L_b} = (z_b - z_a) \quad (1.8)[53]$$

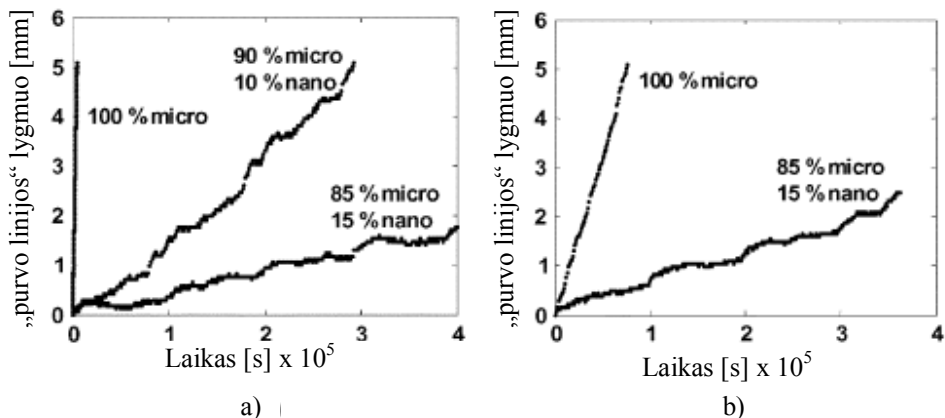
čia: L_a – induktyvumas a taške, L_b – induktyvumas b taške, $L(z)$ – induktyvumas, z_a – pradinė „purvo linijos“ pozicija, z_b – galutinė „purvo linijos“ pozicija



1.15 pav. „mudline“ padėties kreivė. Diagrama induktyvumą išreiškia kaip „mudline“ funkciją jutiklyje. Jutiklio aukštis 28,5 mm. [53]

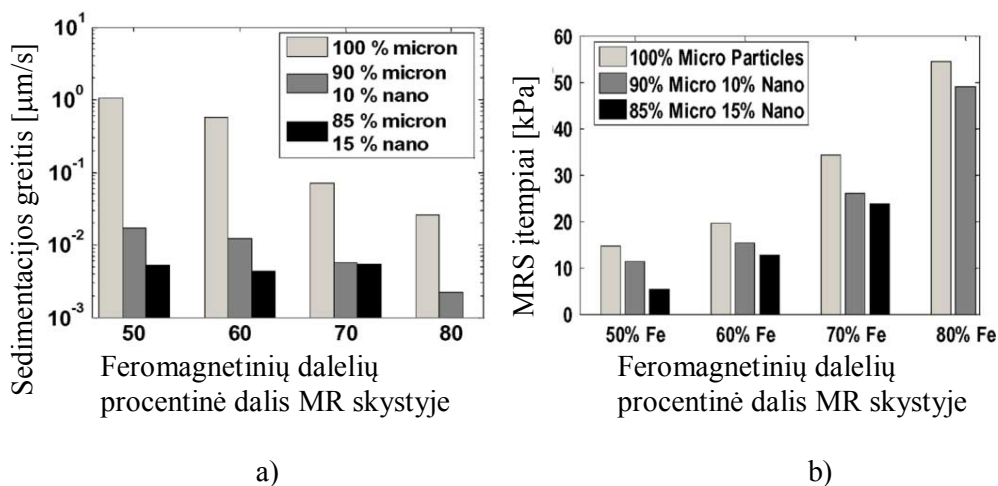
Matuojant MRF sedimentacijos greitį, induktyvumas buvo matuojamas kaip „mudline“ lygmens žemėjimas jutiklyje. Pasirinkus du taškus a ir b, procedūra gali būti interpretuojama kaip induktyvumo matavimas „mudline“ mažėjimo pagalba. Kuomet „mudline“ krenta nuo $z=z_a$ iki $z=z_b$ tai vyksta sedimentacijos procesas. Iš pradžių yra nustatomas pradinis taškas $z=z_a$, tai yra padaroma prieš pradedant eksperimentą. Tuomet jutiklis juda z_b-z_a atstumu į viršų. Buvo padaryta tokia

prielaida, kad oro ir alyvos magnetinė skvarba yra kaip vakuumo. Toliau pozicijoje $z=z_a$, jutiklis yra atitinkamai fiksuojamas ir automatinis induktyvumo matavimas parodo Fe dalelių nusėdimą. Pirminis induktyvumas buvo pažymėtas kaip L_a . Kuomet matuojamas induktyvumas pasiekia reikšmę L_b , matavimas yra baigiamas. **(1.16 pav., a ir b)** grafikuose yra vaizduojamas „mudline“ padėties kitimas laiko atžvilgiu. Taip pat šiuose pavyzdžiuose yra pateikiamas padėties kitimas esant skirtingiems MRF. Šie grafikai buvo sudaromi pasinaudojant linijiniu mažiausių kvadratų principu, tam, kad rastume sedimentacijos greitį.



1.16 pav. „mudline“ lygmens priklausomybė nuo laiko. Šis grafikas išreiškia „mudline“ kitimą jutiklyje kaip sedimentacijos spartą. a) MRF sudėtyje yra 50% Fe dalelių. b) MRS sudėtyje yra 70% Fe dalelių [53]

(1.17 pav.) vaizduoja sedimentacijos greitį įvairioms MRF skysčio rūšims. Pavyzdžiui, skysčio, kurio Fe dalelių kiekis skystyje sudaro 70% sedimentacijos greitis yra nuo 0.07 iki 0.00528 $\mu\text{m/s}$. Tokiame skystyje yra 10 % nano eilės feromagnetinių dalelių. Sedimentacijos greičiui sumažinti buvo įvestos nano dalelės.



1.17 pav. Sedimentacijos greičio ir MRF įtempių dydžiai. a) sedimentacijos greitis, b) MRF įtempiai [53]

Šie dviejų bandymų rezultatai rodo, kad galima sumažinti MRS sedimentaciją įvedant nano daleles į MR skystį.

1.5. Sedimentacijos nustatymas magnetoreologiniuose skysčiuose

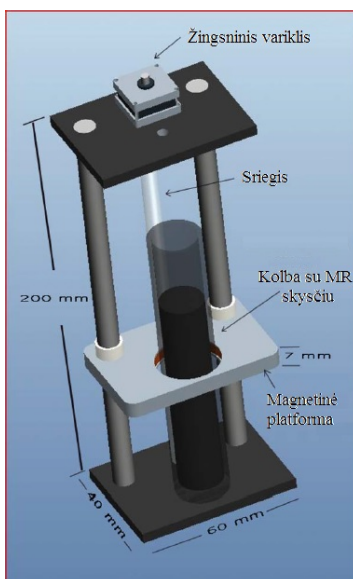
Sedimentacija yra dalelių nusėdimas skystyje arba dujose ant apatinės sienelės dėl gravitacijos jėgos poveikio. Būdingas tankio skirtumas tarp nešančiojo skysčio ir feromagnetinių dalelių galiausiai lemia dalelių nusėdimą MR skystyje, dėl ko pakinta šio skysčio savybės. Tai yra žalinga prietaisams, kurie naudoja MR skystis, kadangi būtina sąlyga yra ta, kad skystis palaikytų pastovias savybes ir būtų tinkamas naudoti gana ilgą laiką.

Kai kuriuose prietaisuose, tokiuose kaip, pavyzdžiui, amortizatoriai, skystis pastoviai juda ir dalelės maišosi. Nenaudojus jo ilgą laiką taip pat pastebimas žymus dalelių nusėdimas, ir prieš pradedant naudoti prietaisą, jas pirmiausia reikia išmaišyti. Tačiau yra ir tokių prietaisų su MR skysčiais, kur mechaninis dalelių išmaišymas yra labai sudėtingas ar netgi neįmanomas.

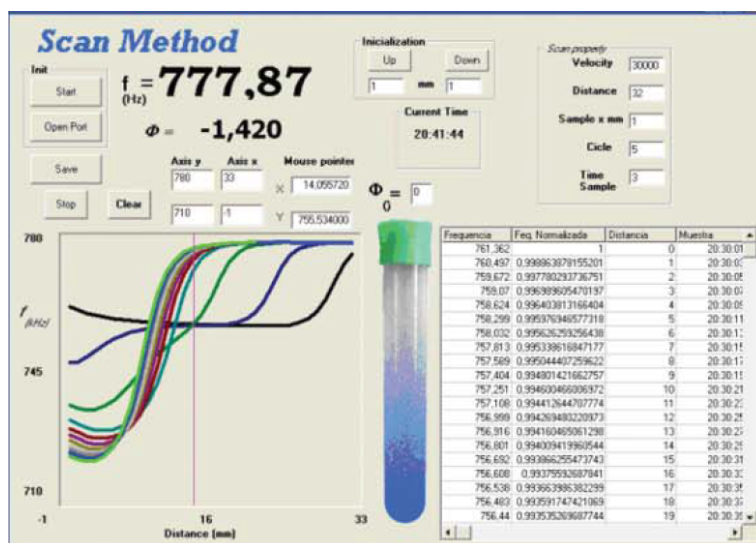
1.5.1. Visiškai automatinis įrenginys skirtas sedimentacijos nustatymui

Įtaisas, kuriame keičiant magneto padėtį erdvėje galima nustatyti magnetoreologinio skysčio sedimentacijos laipsnį, pavaizduotas (1.18 pav.). Įtaiso viršuje yra pritvirtintas 1.8% žingsnį žingsninis variklis, kuris suka prie jo pritvirtintą sriegį. Magnetinė platforma yra pritvirtinta prie veržlės, kuri, besisukant sriegiui, gali judėti vertikalia kryptimi. Judėjimo kryptis bei greitis iš anksto nustatomi operatoriaus, kuris šį įtaisą valdo kompiuteriu. Pagrindinis matavimo elementas yra jutiklinė ritė, kuri įtvirtinta magnetinės platformos viduje ir kuri parodo induktyvumo L kitimą, esant skirtingam dalelių kiekiui ϕ , matuojamojoje skysčio dalyje.

Naudojama jutiklinė ritė yra susukta iš 0.2 mm² skersmens vielos, kuri apsukta 75 kartus [54]. Ritė yra 5 mm ilgio. L ir ϕ reikšmės priklauso nuo rezonansinio dažnio f , kuris yra nustatomas lygiagrečiai į grandinę įjungus pasirinktos talpos kondensatorių (šiam eksperimente buvo parinktas 10 nF kondensatorius). Šiam dažniui fiksuoti ir atvaizduoti programinio paketo Visual Basic pagalba buvo sukurta programa. Jos langas pavaizduotas (1.19 pav.) Vartotojas gali keisti tokius parametrus kaip bendras eksperimento laikas, skanavimų skaičius, jų raiška, laukimo laikas tarp matavimų ir pan.



1.18 pav. Automatinio įrenginio modelis [54]

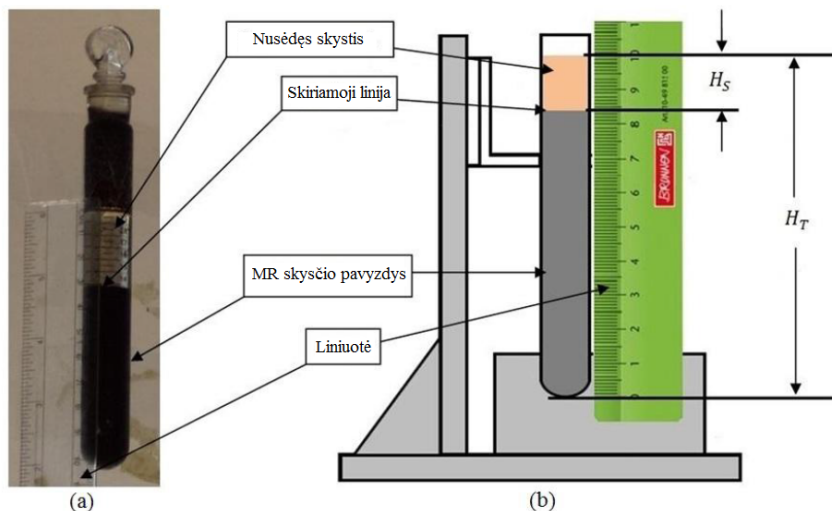


1.19 pav. Programinė įranga, naudota nustatyti sedimentacijai [54]

Eksperimente panaudotos aukštos kokybės karbonilo dalelės iš vokiečių firmos BASF, kurių skersmuo nuo 600 iki 1200 nm. Kaip nešantysis skystis buvo pasirinktas JAV firmos Aldrich silikoninis aliejus, kurio nominali klampa yra $10 \text{ MPa} \cdot \text{s}$. Magnetinis skystis buvo paruoštas tiesiog lėtai pilant daleles į nešantįjį skystį ir po truputėlį maišant, kol gaunamas tinkamos konsistencijos skystis. Sedimentacijos nustatymui buvo panaudota 50 mm ilgio ir 15 mm išorinio skersmens kolbutė, į kurią buvo įpilta apie 6 ml pagaminto MR skysčio. Bendras skanavimo ilgis šiame eksperimente buvo 30 mm, kadangi skanavimas buvo pradedamas 10 mm virš skysčio paviršiaus ir baigiamas apie 10 mm aukščiau kolbutės apačios. Duomenys buvo renkami 1.5 mm ilgio žingsniais judant nuo viršaus iki apačios. Kiekvienoje pozicijoje platforma buvo išlaikoma 1 s, dar tiek pat laiko reikdavo jai pasiekti sekančią poziciją. Kai pasiekiami apatinė riba, įtaisas 3 s palaukia ir pradeda skanuoti iš naujo. Taigi, vienas pilnas 15 ciklų matavimas užtruko apie 460 sekundžių [54].

1.5.2. Mechaninis sedimentacijos nustatymas

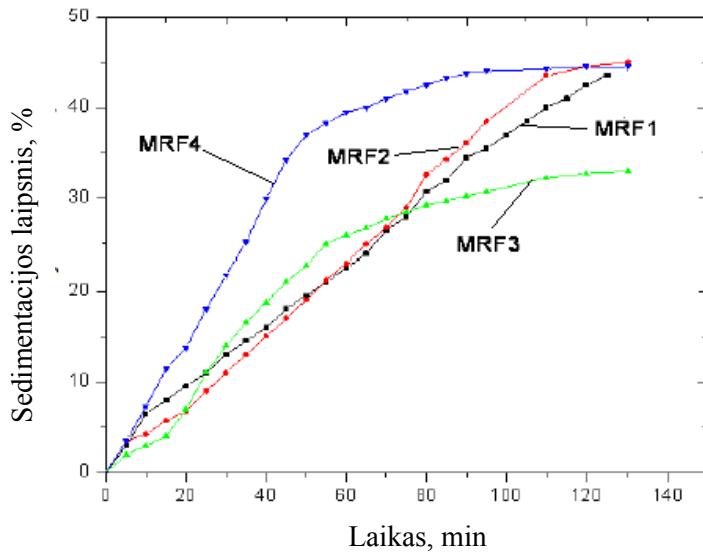
Magnetoreologinio skysčio sedimentacijos nustatymui šiame eksperimente buvo pasirinkta stiklinė kolba su skysčiu (**1.20 pav., a**). Po tam tikro laiko, dalelės nusėdus kolbos apačioje, o viršuje likus tik nešančiam skysčiui, tarp jų susidaro skiriamoji linija. Norint nustatyti, jos padėtį buvo pasirinkta liniuotė (**1.20 pav., b**). Sedimentacija šiuo atveju nustatoma pagal nusistovėjusio skysčio aukštį. Čia nusistovėjusio skysčio tūris pažymėtas H_S , o viso skysčio tūris – H_T .



1.20 pav. MR skysčio sedimentacijos nustatymas naudojant liniuotę: a – realus vaizdas, b – matuojamoji schema [55]

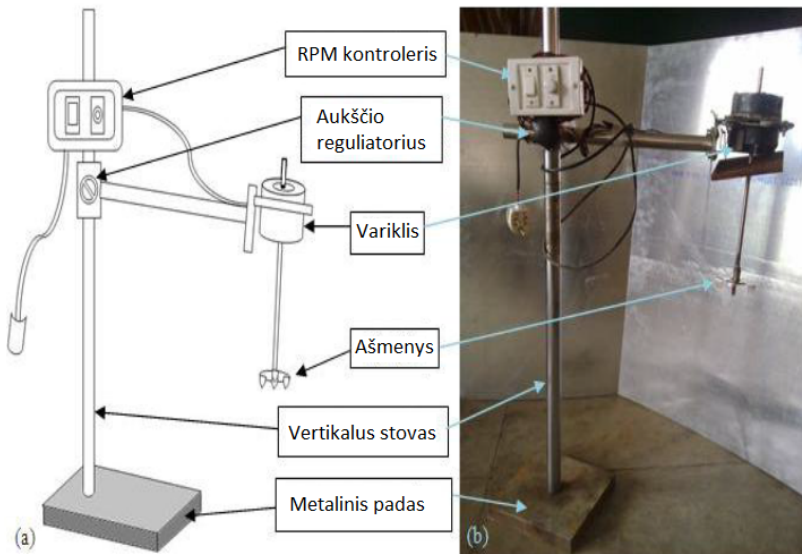
Nustatyta, kad didesnis geležies dalelių (kiekvienos dydis apie $24.7 \mu\text{m}$) kiekis šiuo atveju turi neigiamą įtaką sedimentacijos procesui, tačiau sukuria stabilesnį magnetoreologinį reiškinį. Tai pavaizduota sedimentacijos priklausomybės nuo laiko grafike (**1.21 pav.**). Kaip matome, MRF4 bandinys daug sparčiau nusėda

eksperimento pradžioje ir išlieka praktiškai nepakitęs vėliau. Taip pat galime daryti išvadą, jog didesnis tepalo kiekis, įmaišytas į skystį sumažina sedimentaciją.



1.21 pav. Sedimentacijos laipsnio priklausomybė nuo laiko [55]

Nusėdusiam MR skysčiui išmaišyti sukurtas mechaninio maišymo įrenginys. Jo principinė schema pavaizduota (1.22 pav., a), o realaus įrenginio bendras vaizdas – (1.22 pav., b) dalyje.



1.22 pav. Mechaninis MR skysčio maišytuvas; a – eksperimentinio stendo schema, b – eksperimentinis stendas [55]

Prie stovo pritvirtintas variklis, kuris aukščio reguliatoriaus pagalba gali judėti vertikalia kryptimi. Prie variklio prijungtas stovėlis su ašmenimis, kuriuos įkišus į talpą su MR skysčiu, dalelės išmaišomos. Variklio greitis reguliuojamas kontrolieriu. Tačiau šis įrenginys turi ir tam tikrų minusų. Taip agresyviai paveikus daleles, jų skersmuo tampa skirtingas ir taip pasikeičia skysčio magnetoreologinės savybės. Taip pat šis būdas netinkamas naudoti uždaroose sistemose. Nepakankamai ilgai maišant gali likti dalis dalelių nusėdusių talpos apačioje [55].

1.5.3. Sedimentacijos nustatymas pasveriant

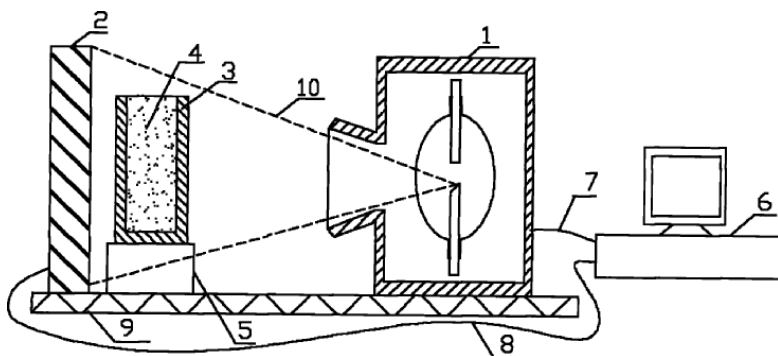
Didžiausias pasaulyje magnetoreologinių skysčių gamintojas iš JAV kompanija LORD, savo puslapyje nurodo, jų skysčiuose sedimentacija praktiškai nevyksta [56]. Tačiau iš praktikos žinoma, jog dažniausiai taip nebūna. Taip pat yra minima, jog daugumoje jų gaminamų prietaisų, kuriuose panaudojamas MR skystis, jis išsimaišo savaime, kadangi gali įtaise judėti. Tačiau yra ir kitokių šio skysčio pritaikymo būdų, kur savaiminis maišymasis negalimas. Tuomet pasiūlytas gana originalus būdas. Panaudojant galono svorio talpą (angl. weight-per-gallon cup) (**1.23 pav.**), išmatuojamas dalelių kiekis skystyje. Į šį puodelį paimamas MR skysčio mėginys, kuris pasveriamas tiksliomis svarstyklėmis ir gautas rezultatas palyginamas su kompanijos duotu jų parduodamo pilnai išmaišyto skysčio mase prie tam tikros temperatūros. Tačiau šis būdas yra nepatikimas, kadangi nėra pasakyta iš kurios įtaiso dalies skystis yra paimamas. Taip pat uždaroose sistemose jo gali būti neįmanoma realizuoti. Dalelių išmaišymui rekomenduojamas dažų maišytuvas (angl. shaker). Šis prietaisas veikia taip pat kaip ir anksčiau aptartas mechaninis maišytuvas.



1.23 pav. Standartizuotos MR matavimo talpos (weight per gallon cup) [57]

1.5.4. Sedimentacijos nustatymas panaudojant rentgeno spindulius

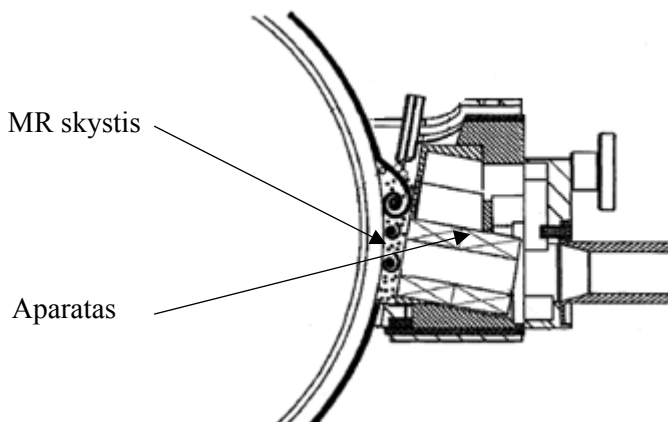
Patente [58] yra detalai išdėstomas įtaiso, naudojančio rentgeno spindulius veikimas (**1.24 pav.**). Jo veikimo principas paremtas tuo, kad MR skysčio bandinys 4 yra supilamas į keturkampę talpą 3, kuri bazuojama ant pado 5, kuris yra pastatytas tarp rentgeno spindulių šaltinio 1 ir šiems spinduliams jautraus ekrano 2. Valdymo signalas iš kompiuterio 6 laidais 7 perduodamas spindulių šaltiniui. Spindulys į ekraną yra paleidžiamas tam tikru kampu, kuris paveiksle žymimas 10 numeriu. Kadangi MR skystyje esant skirtingai dalelių koncentracijai, rentgeno spinduliai yra absorbuojami skirtingai, ant ekrano 2 gaunamas juodai baltas vaizdas su tamsesnėmis ir šviesesnėmis dėmėmis. Gauta nuotrauka per sąsają 8 perduodama į kompiuterį kur yra apdorojama. Pagal dėmių skaičių bei jų išsidėstymą galima spręsti apie MR skysčio nusėdimą ar dalelių susikibimą, kadangi yra sukurta duomenų bazė, kur palyginimo būdu nustatoma skysčio konsistencija.



1.24 pav. Magnetoreologinio skysčio sedimentacijos nustatymas panaudojant rentgeno spindulius: 1 – rentgeno lempa, 2 – fotoelementas, 3 – indas su MR skysčiu, 4 – MR skystis, 5 – stovas indui, 6 – personalinis kompiuteris, 7 – sąsaja rentgeno lempai valdyti kompiuteriu, 8 – fotoelemento jungtis su kompiuteriu, 9 – pagrindas, 10 – rentgeno spinduliai [58]

1.5.5. Sedimentacijos nustatymas naudojant specialų prietaisą

Patente [59] aprašoma magnetoreologinio skysčio dalelių koncentracijos nustatymas ir jos kontroliavimas. Įtaise naudojama iš vielos susukta ritė, kuria elektros generatoriaus pagalba leidžiama nuolatinė elektros srovė. Taip sukuriamas magnetinis laukas (**1.25 pav.**)

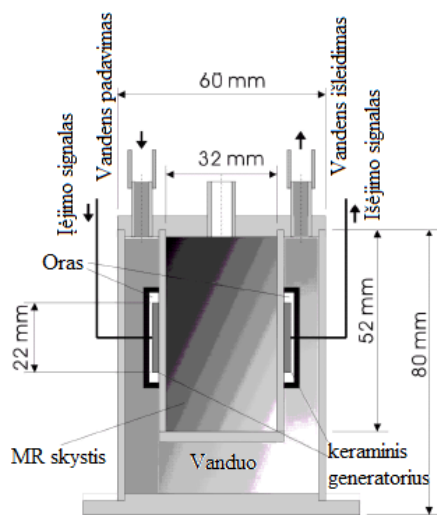
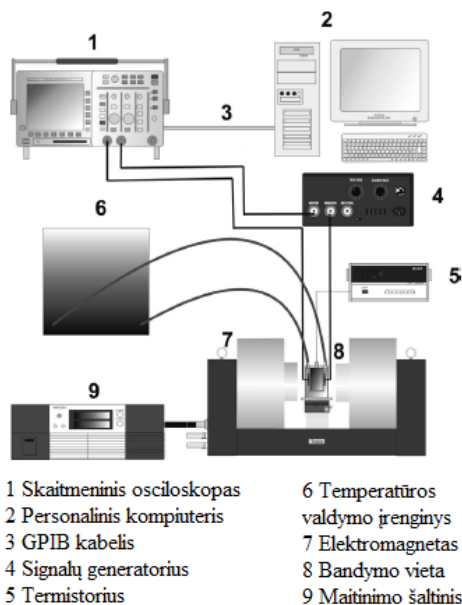


1.25 pav. Aparatas MR skysčio nusėdimui ir koncentracijai matuoti ir kontroliuoti [59]

Kai magnetinis laukas pasiekia MR skystį, sistemos induktyvumas pradeda kisti kintant dalelių išsidėstymui skystyje. Matuojamoji ritė, lygiai tokia pati kaip ir sukurianti magnetinį lauką, yra naudojama lygiagrečiai induktyvumui matuoti. Specialus jutiklis, prijungtas abejose ritėse, matuoja varžas ir siunčia jų reikšmes į grįžtamojo ryšio valdiklį, kuris kontroliuoja papildymo aparatą, tiekiantį papildomą magnetoreologinį skystį į sistemą. Ši sistema taip pat gali būti sujungta su integruotu skysčio papildymo moduliu, kuris gauna ir iš naujo išmaišo MR skystį, paskui jį vėl grąžindamas atgal į sistemą.

1.5.6. MR skysčio dalelių būsenos nustatymas panaudojant ultragarsą

Darbuose [60, 61] tyrinėjamas liekamas dalelių susikabinimas nustojus jas veikti magnetiniu lauku. (1.26 pav., a) parodyta sujungimo schema. Panaudojant šį stendą, galima apskaičiuoti ultragarso sklaidimo greitį tiriamame skystyje. (1.26 pav., b) parodytas detalesnis bandymo įtaiso vaizdas. Du 5 mm skersmens keraminiai generatoriai naudojami kaip ultragarso siųstuvas ir imtuvas. Šiame eksperimente naudojamas 2 MHz dažnis. Visas bandymo įtaisas yra pagamintas iš skaidraus akrilo. Skysčio temperatūra keturkampiam matavimo inde (32 x 32 mm) yra kontroliuojama ir palaikoma pastovi temperatūros valdymo įrenginiu. Šis pastoviai temperatūrai palaikyti naudoja vandenį. Magnetinis laukas sukuriamas nuolatinės srovės magneto, kurio magnetinis laukas gali būti keičiamas nuo 0 iki 550 mT. Menamas kampas ϕ tarp magnetinio lauko linijų ir tarp ultragarso bangų sklaidimo linijų gali būti keičiamas nuo 0 iki 180 laipsnių. Rezultatams atvaizduoti panaudotas skaitmeninis osciloskopas.



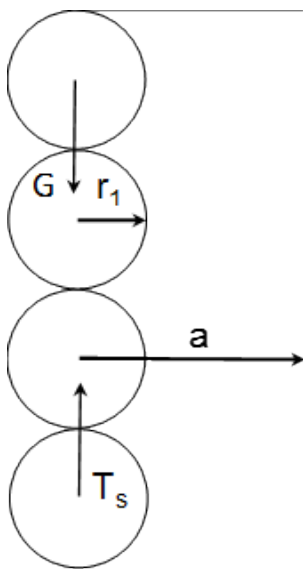
1.26 pav. MR skysčio dalelių būsenos nustatymas panaudojant ultragarsą: a – sujungimo schema, b – detalus bandymo įtaiso vaizdas [60]

1.6. Skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje buvo atlikta išsami literatūros analizė. Apžvelgti magnetoreologiniai ir elektoreologiniai skysčiai, jų privalumai ir trūkumai, panaudojimo sritis bei jų savybės ir parametrai. Taip pat detalai ištyrinėtos pjezoelektrinės medžiagos, kurios vėliau darbe bus naudojamos. Atlikta jau esamų sedimentacijos nustatymo MR skysčiuose būdų apžvalga. Kiekvienas iš aptartų metodų turi rimtų trūkumų. Atlikus detalią paiešką ir apžvalgą nepavyko rasti pigaus, patikimo, tikslaus ir kompaktiško būdo.

2. MAGNETOREOLOGINIŲ SKYSČIŲ SEDIMENTACIJOS MATEMATINIS MODELIAVIMAS

Siekiant detaliau išsiaiškinti procesus, vykstančius dalelėms sėdant magnetoreologiniame skystyje, sukurtas matematinis modelis, aprašantis dalelių nusėdimo procesą. Supaprastindami modelį imame, kad sėda vienos dalelės dydžio x ir y plokštumoje ir neriboto ilgio z plokštumoje dalelių juosta (**2.1 pav**). Aprašomas šios juostos judėjimas jai tolygiai slenkant žemyn. Taip pat įvertinama ir kaip kinta dalelių greitis artėjant prie sienelės nejudamo indo, kuriame yra MR skystis. Kadangi dalelių nusėdimo procesas pilnai sustabdomas negali būti, matematiškai aprašyta begalinės dalelių juostos reakcija į harmoninius virpesius, taip stengiantis jas palaikyti skystyje ir neleisti joms nusėsti. Taip pat aprašytas atgalinis skysčio judėjimas indo viduje.



2.1 pav. Modelio principinė schema

2.1. Tolygus skysčio dalelių ilgos juostos judėjimas prie sienelės

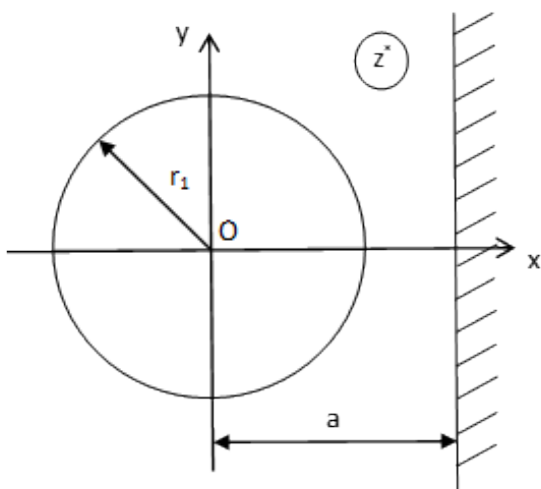
Tarkime, kad labai ilga $2r_1$ skersmens apskrita juosta (cilindras) juda klampiame skystyje. (**2.2 pav.**) parodytas juostai statmenas pjūvis x, y plokštumoje, o atstumu a nuo juostos apskritimo centro yra sienelė. Koordinatės, statmenas x, y plokštumai, žymėsime z^* . Laikome, kad juosta z^* ašies kryptimi juda greičiu U , o sienelė nejuda. Pagalbinę z plokštumą pavaizduota (**2.3 pav.**).

Laikome, kad skysčio dalelių greitis lygiagretus z^* ašiai $v_x = v_y = 0$, todėl $v_z = v(x, y, z)$. Klampa nespūdaus skysčio dinamikos lygtys tampa tokiomis:

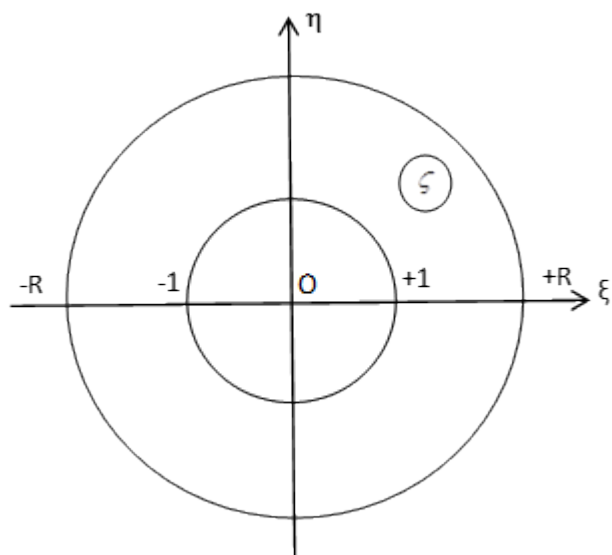
$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0, \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z}, \text{ o tolydumo lygtis } \frac{\partial v}{\partial z} = 0.$$

Čia p – slėgis skystyje, μ – klampos koeficientas. Iš $\frac{\partial v}{\partial z} = 0$ seka $v_z = v(x, y)$.

Slėgio kitimo z^* kryptimi nepaisysime, taigi tiriamo be galo ilgą juostą, judančią pastoviu greičiu U . Kadangi $\frac{\partial p}{\partial z} = 0$, tai greitis tenkina Laplaso diferencialinę lygtį $\Delta v = 0$. Laikome, kad kiti išoriniai paviršiai, t. y. sienelė nejuda. Galime taikyti šio kraštinio uždavinio ir kito, analoginio, plokštumos uždavinio matematinę analogiją [61, 432 p.]. Analoginiame tekėjime tiriamo idealaus skysčio tekėjimą tokioje pat srityje, kur vietoje sienelių greičių U ir 0 įrašomos tėkmės funkcijos vertės tame analogiškame uždavinyje. Esminis skirtumas – skystis idealus, taigi be klampos.

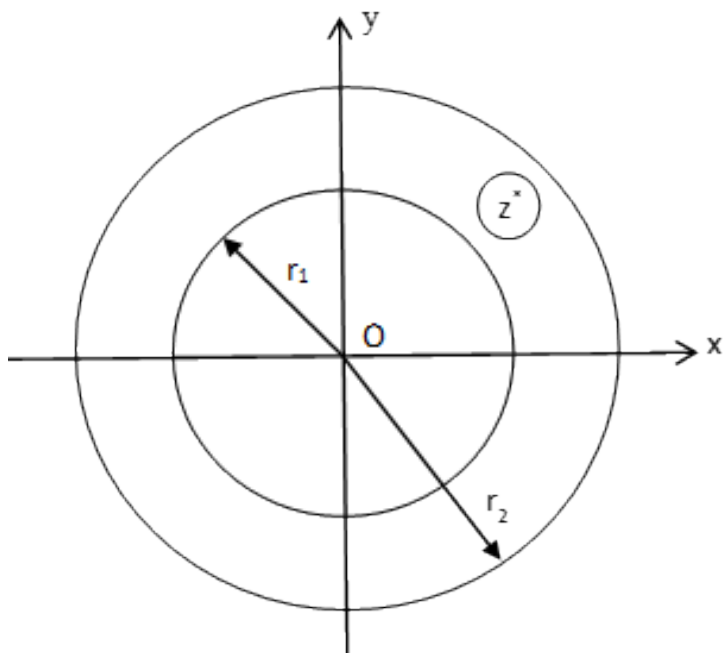


2.2 pav. Skysčio tekėjimo sritis x, y plokštumoje



2.3 pav. Pagalbinė ζ plokštuma

(2.4 pav.) parodytas dviejų koncentriškų cilindrų, kurių spinduliai r_1 ir r_2 , pjūvis. Tame pjūvyje tarp cilindrų esančio idealaus nespūdaus skysčio judėjimą galime aprašyti kompleksiniu potencialu $w = w(z^*)$, čia $z^* = x + iy$ yra kompleksinis nepriklausomas kintamasis, o $w = w(z^*)$ – analizinė funkcija.



2.4 pav. Du koncentriški cilindrai, kurių spinduliai r_1 ir r_2

Pereidami prie polinių koordinačių r, θ galima rašyti $z^* = re^{i\theta}$, o sūkurinio taško kompleksinį potencialą aprašome taip:

$$w = \frac{\Gamma}{2\pi}\theta - i\frac{\Gamma}{2\pi}\ln r \quad (2.1)$$

Kadangi $w = \varphi + i\phi$, čia φ – greičio potencialas, ϕ – tėkmės funkcija, tai pridėję konstantą gauname

$$\phi = -\frac{\Gamma}{2\pi}\ln r + C \quad (2.2)$$

akivaizdu, kad kai $r = r_1$ ir $r = r_2$ tai $\phi = \text{const}$, taigi visi koncentriški apskritimai gali būti laikomi sienelėmis.

Dabar galime taip aprašytą idealaus skysčio tekėjimą plokštumoje x, y sugretinti su klampaus skysčio tekėjimu z ašies, statmenos x, y plokštumai, kryptimi. Čia cilindras, kurio spindulys r_1 , juda greičiu U , o spindulio r_2 cilindras nejuda, todėl iš (2.2)

$$\begin{cases} U = -\frac{\Gamma}{2\pi}\ln r_1 + C \\ 0 = -\frac{\Gamma}{2\pi}\ln r_2 + C \end{cases} \quad (2.3)$$

Išreiškę iš čia $C = \Gamma\frac{\ln r_2}{2\pi}$, $\Gamma = \frac{2\pi U}{\ln r_2 - \ln r_1}$ galime iš (2.4) nustatyti skysčio dalelių greičio priklausomybę nuo atstumo:

$$v = U \frac{\ln r_2 - \ln r}{\ln r_2 - \ln r_1} \quad (2.4)$$

Čia įrašytas greitis $v(x, y)$ z ašies kryptimi vietoje tėkmės funkcijos $\phi(x, y)$ formulėje (2.3). Kaip žinome ši funkcija taip pat tenkina Laplaso lygtį $\Delta\phi = 0$.

Galima parodyti, kad idealaus skysčio cirkuliacija Γ susijusi su klampaus skysčio trinties jėga T [61, 434 p.] :

$$T = \mu\Gamma \quad (2.5)$$

čia μ – skysčio klampos koeficientas. Gauname jėgą, kuria klampus skystis veikia į spindulio r_1 cilindro ilgį vieneta z ašies kryptimi:

$$T = \frac{2\pi\mu U}{\ln r_2 - \ln r_1} \quad (2.6)$$

Jei žinome idealaus skysčio tekėjimą kurioje nors kompleksinio kintamojo $z^* = x + iy$ srityje ir konformiškai atvaizduojame tą sritį į bet kurią kitą sritį, tai tuo pačiu gauname skysčio tėkmę ir kitoje srityje. **(2.3 pav.)** parodyta sritis ζ plokštumoje iš antrojo paveikslo gaunama įrašius $r_1 = 1, r_2 = R$. Funkcija

$$\zeta = \frac{(A+1)z + r_1(A-1)}{(A-1)z + r_1(A+1)} \quad (2.7)$$

konformiškai atvaizduoja (2.2 pav.) parodytą sritį $|z| > r_1$, $Re z = x < a$ į apačioje parodytą žiedą $1 < |\zeta| < R$. Formulėje (2.5) [62, 85p.]

$$A = \sqrt{\frac{a-r_1}{a+r_1}}, R = \frac{1+A}{1-A} \quad (2.8)$$

Dabar vėl sugretiname idealaus skysčio tekėjimą x, y plokštumoje ir klampaus skysčio tekėjimą z ašies kryptimi srityje, kuri parodyta (2.3 pav.). Iš formulės (2.3) gauname skysčio dalelių greitį

$$v = U \frac{\ln R - \ln |\zeta|}{\ln R} \quad (2.9)$$

o iš (2.6) gauname ilgio vienetą veikiančią jėgą

$$T = \frac{2\pi\mu U}{\ln R} \quad (2.10)$$

Spindulį R turime apskaičiuoti iš (2.8).

Pažymėkime nedimensinį parametą parodantį kaip arti judanti juosta yra prie sienelės.

$$\alpha = \frac{a-r_1}{r_1} \quad (2.11)$$

Tuomet galime apskaičiuoti:

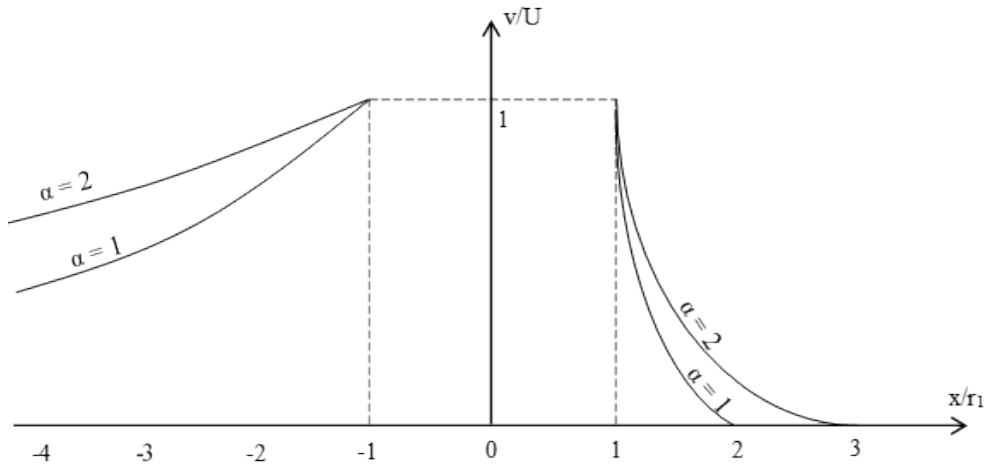
$$A^2 = \frac{\alpha}{2+\alpha}, R = \frac{\sqrt{2+\alpha} + \sqrt{\alpha}}{\sqrt{2+\alpha} - \sqrt{\alpha}} = 1 + \alpha + \sqrt{\alpha(2+\alpha)}$$

Matome, kad jei judanti juosta yra labai arti prie sienelės, t. y. jei $\alpha \rightarrow 0$, tai $R \rightarrow 1$ ir iš (2.11) gauname $T \rightarrow \infty$, t. y. jėga dėl klampos neapprėžtai auga. O jei juosta tolsta nuo sienelės, tai $\alpha \rightarrow \infty$ ir $R \rightarrow \infty$, todėl $T \rightarrow 0$. Lygiai taip pat $T \rightarrow \infty$ formulėje (2.6), jei r_2 neapprėžtai didėja.

Apskaičiuosime skysčio dalelių, esančių ant x ašies, greitį. Laikydami z koordinatę realia: $z = x$, gausime realų ir $\zeta = \xi = \frac{r_1 - Rx}{x - r_1 R}$, todėl (2.9) galime perrašyti taip:

$$\frac{v}{U} = 1 - \frac{\ln \frac{r_1 - Rx}{x - r_1 R}}{\ln R} \quad (2.12)$$

Kai $x = \pm r_1$, tai $|\xi| = 1$, todėl $v = U$, kaip ir turi būti. Jei $x = a = r_1(1 + \alpha)$, tai $\xi = \frac{1 - R(1 + \alpha)}{1 + \alpha - R} = R$, todėl iš (2.13) gauname $\frac{v}{U} = 1 - \frac{\ln R}{\ln R} = 0$, taigi $v = 0$, kaip ir turi būti ant nejudančios sienelės. Akivaizdu taip pat, kad jei $x \rightarrow -\infty$, tai $\xi = \frac{-R + r_1/x}{1 - Rr_1/x} \rightarrow -R$, todėl skysčio greitis labai toli kairėje taip pat artėja prie nulio. **(2.5 pav.)** parodyta santykinio greičio priklausomybė nuo santykio x/r_1 .



2.5 pav. Santykinė skysčio greičio v/U priklausomybė nuo x/r_1 .

Nubraižysime linijas x, y plokštumoje, kur greitis $v = \text{const}$. Pasirinkę bet kurią santykį $v/U \leq 1$ iš (2.9) apskaičiuojame $|\zeta| = \rho = R^{1-v/U}$. Matome, kad kai $1 \leq \rho \leq R$ tai ζ plokštumoje šis ρ aprašo apskritimą, ant kurio yra pasirinktas greitis $v = \text{const}$. Žinome, kad tiesinė trupmeninė transformacija bet kurią tiesę ar apskritimą atvaizduoja į tiesę ar apskritimą. Jei tiesę laikysime apskritimu, einančiu per be galo nutolusį tašką, tai visi apskritimai atvaizduojami į apskritimus. Be to galime matyti, kad šiuo atvaizdavimu reali tiesė ζ plokštumoje atvaizduojama į x ašį. Taškai $\zeta = +\rho$ ir $\zeta = -\rho$ atvaizduojami į taškus atitinkamai

$$z_v = r_1 \frac{1 + R\rho}{R + \rho}, z_v^* = r_1 \frac{1 - R\rho}{R - \rho}$$

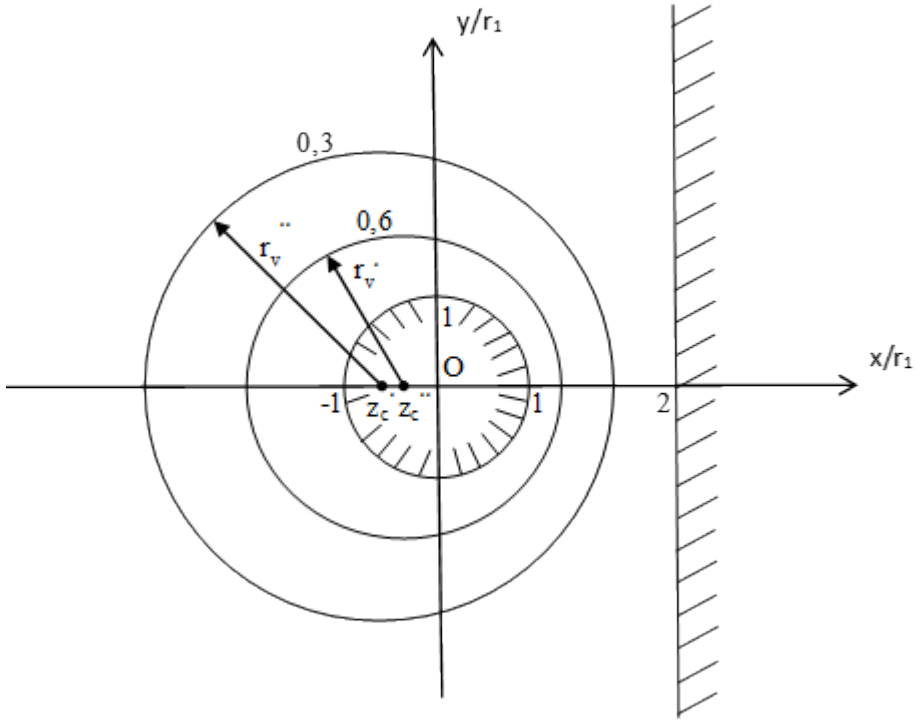
Tą galime matyti iš (2.12). Kadangi tai apskritimas, tai jo spindulys

$$r_v = \frac{z_v - z_v^*}{2} = r_1 \rho \frac{R^2 - 1}{R^2 - \rho^2} \quad (2.13)$$

o jo centro koordinatė

$$z_c = \frac{z_v + z_v^*}{2} = -r_1 R \frac{\rho^2 - 1}{R^2 - \rho^2} \quad (2.14)$$

Matome, kad kai $\rho = 1$, tai $r_v = r_1$, $z_c = 0$. Jei ζ plokštumoje $\rho \rightarrow R$, tai x, y plokštumoje $r_v \rightarrow \infty$ ir $z_c \rightarrow -\infty$. **(2.6 pav.)** nubraižytos vienodų greičių $v = \text{const}$ linijos kai juosta juda šalia nejudančios sienelės.



2.6 pav. Santykinio skysčio greičio v/U vienodų verčių linijos kai $\alpha = 1$.

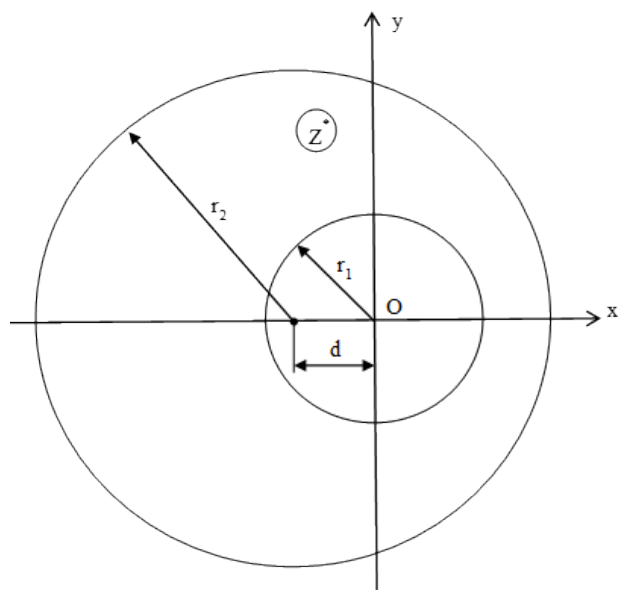
Jei juosta juda ne šalia sienelės, bet didesnio cilindro, kurio spindulys r_2 viduje, tai skysčio tekėjimo sritį **(2.6 pav.)** z^* plokštumoje konformiškai atvaizduojanti analizinė funkcija yra (2.7), bet konstantos A ir R apskaičiuojamos ne iš (2.8), bet

$$A = \frac{\sqrt{r_2^2 - (d + r_1)^2}}{\sqrt{r_2^2 - (d - r_1)^2}}, R = \frac{1 + \sqrt{\Delta_0}}{1 - \sqrt{\Delta_0}}, \Delta_0 = \frac{(r_2 - r_1)^2 - d^2}{(r_2 + r_1)^2 - d^2} \quad (2.15)$$

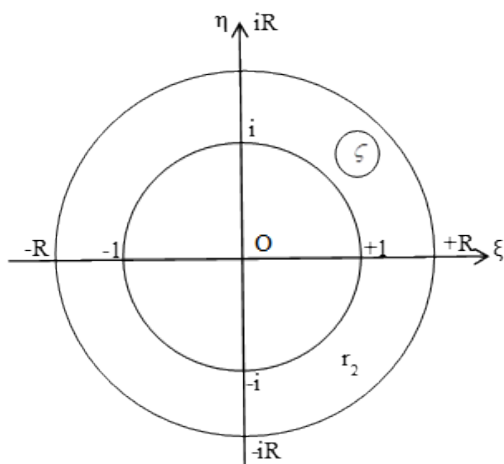
Čia d yra atstumas tarp apskritimų, kurių spinduliai r_1, r_2 , centrų **(2.7 pav.)**. Skysčio dalelių greitį v ir cilindro ilgio vienetą veikiančią jėgą T skaičiuojame iš (2.9) ir (2.10) lygybių, bet R turime skaičiuoti iš (2.16), o

$$|\zeta| = |\xi| = \left| \frac{(A + 1)x + r_1(A - 1)}{(A - 1)x + r_1(A + 1)} \right| \quad (2.16)$$

kur A nustatome iš (2.15).



a



b

2.7 pav. Skysčio tėkmės sritis x,y plokštumoje tarp cilindro, kurių spinduliai r_1, r_2 ir pagalbinė sritis ζ plokštumoje: a – atstumas tarp apskritimų, kurių spinduliai r_1, r_2 , centrų, b – pagalbinė sritis ζ plokštumoje

Jei judančio cilindro centras yra atstumu $a = 2r_1$ nutolęs nuo sienelės, tai iš (2.11) matome, kad $\alpha = 1$ ir tada $R = 1 + \alpha + \sqrt{\alpha(2 + \alpha)} = 2 + \sqrt{3}$, o tangentinė jėga dėl klampos

$$T_1 = \frac{2\pi\mu U}{\ln(2 + \sqrt{3})} = \frac{2\pi\mu U}{1,317} \quad (2.17)$$

Laikydami, kad atstumas nuo judančio cilindro iki nejudančio paviršiaus dešinėje yra toks pat, t. y. $r_2 - (d + r_1) = r_1$ (**2.7 pav.**), galime apskaičiuoti kaip tangentinę jėgą T priklauso nuo didžiojo apskritimo spindulio r_2 . Pažymėję $r_2/r_1 = s$ ir laikydami $s \geq 2$ gauname $\Delta_0 = \frac{2s-3}{6s-3}$. Jei $s = 2$, tai $R = 2$ (nes $r_2 = 2r_1$ ir $d = 0$), todėl

$$T = \frac{2\pi\mu U}{\ln 2} = \frac{2\pi\mu U}{0,693} \quad (2.18)$$

taigi $T = 1,90 T_1$ yra beveik dvigubai didesnė už jėgą, kai judantis cilindras yra prie sienelės. Kai $s \rightarrow \infty$, t. y. kai r_2 neapribotai didėja, tai $R \rightarrow \frac{1+1/\sqrt{3}}{1-1/\sqrt{3}} = 2 + \sqrt{3}$ ir $T \rightarrow T_1$.

2.2. Tolygiai slenkančios skysčio dalelių juostos virpesiai

Labai ilga juosta, kurios skersmuo yra spindulio r_1 apskritimas, pastoviu greičiu U slenka išilgai to cilindro ašies z ir virpa z ašies kryptimi pagal dėsnį $z = b \sin \omega t$. Laikome, kad šis judantis cilindras yra kito, didesnio ir nejudančio, spindulio r_2 cilindro viduje. Kraštinės sąlygas galime aprašyti taip:

$$\begin{cases} v(r_1) = U + b\omega \cos \omega t \\ v(r_2) = 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

Skystį, esantį tarp cilindrų laikome klampiu nespūdžiu. Tarkime, kad skysčio dalelių greičiai lygiagretūs z ašiai ir slėgio gradientas z ašies kryptimi lygus nuliui:

$$v_r = v_\varphi = 0, \frac{\partial p}{\partial z} = 0, v_z = v(r, t)$$

Gauname skysčio dinamikos lygtį, aprašytą cilindrinėmis koordinatėmis r, φ, z :

$$\frac{\partial v}{\partial t} = v_s \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right) \quad (2.20)$$

Čia v_s – skysčio kinematinis klampos koeficientas. Sprendinį aprašome taip: $v = \varphi(t)f(r)$. Įrašę į (2.20) atidaliname kintamuosius ir prilyginame konstantai:

$$\frac{1}{v\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{f'' + f'/r}{f} = i\lambda^2 \quad (2.21)$$

todėl $\frac{d\varphi}{\varphi} = v_s \lambda^2 i dt$. Integruodami gauname:

$$\varphi = \varphi_0 e^{v_s \lambda^2 i t} = \varphi_0 (\cos v_s \lambda^2 t + i \sin v_s \lambda^2 t) \quad (2.22)$$

Kita lygtis iš (2.20)

$$f'' + \frac{1}{r} f' - i\lambda^2 f = 0 \quad (2.23)$$

Čia funkcijos f išvestinės skaičiuojamos kintamojo r atžvilgiu. Pakeitę nepriklausomą kintamąjį $\xi = \sqrt{i}\lambda r$ gauname modifikuotą Beselio diferencialinę lygtį:

$$\frac{d^2 f}{d\xi^2} + \frac{1}{\xi} \frac{df}{d\xi} - f = 0 \quad (2.24)$$

Lygties (2.24) bendrasis sprendinys [63, 13p.]

$$f(\xi) = C_1 I(\xi) + C_2 K(\xi) \quad (2.25)$$

Čia $I(\xi) = I_0(\xi)$ ir $K(\xi) = K_0(\xi)$ yra nulinės eilės Kelvino funkcijos (antroji funkcija dar vadinama Makdonaldo). Nepriklausomas kintamasis $\xi = \sqrt{i}r = e^{\pi i/4} r$ yra kompleksinis skaičius, todėl Kelvino funkcijos taip pat kompleksinės [63, 14 p.], [64, 200 p.] :

$$I_0(xe^{\pi i/4}) = ber(x) + i bei(x) \quad (2.26)$$

$$K_0(xe^{\pi i/4}) = ker(x) + i kei(x) \quad (2.27)$$

Atsižvelgę į kraštinę sąlygą (2.19), ieškome sprendinio, kurio laiko funkcija (2.20) yra harmoninė ir $v_s \lambda^2 = \omega$, todėl parenkame

$$\lambda = \sqrt{\frac{\omega}{v_s}} \quad (2.28)$$

Sprendinyje (2.20) galime parinkti $C_1 = 1$, $C_2 = C' + iC''$, čia C' , C'' yra realūs skaičiai. Tuomet

$$\begin{aligned} v(r,t) &= \varphi(t)f(r) = \varphi_0(\cos \omega t + i \sin \omega t) \\ &[ber\lambda r + i bei\lambda r + (C' + iC'')(ker\lambda r + i kei\lambda r)] \\ &= \varphi_0(\cos \omega t + i \sin \omega t)[A(r) + i B(r)] \end{aligned} \quad (2.29)$$

ir todėl

$$\begin{cases} A(r) = ber\lambda r + C'ker\lambda r - C''ker\lambda r \\ B(r) = bei\lambda r + C'kei\lambda r + C''ker\lambda r \end{cases} \quad (2.30)$$

Konstantą φ_0 laikome realiu skaičiumi ir toliau tiriamo tik sprendinio $v(r,t)$ realiąją dalį:

$$v_d(r,t) = \varphi_0[A(r)\cos \omega t - B(r)\sin \omega t] \quad (2.31)$$

Sprendinys (2.31) tenkins antrąją kraštinę sąlygą (2.19), jei įrašysime $A(r_2) = 0$, $B(r_2) = 0$, todėl iš (2.29) gauname

$$\begin{cases} C'ker\lambda r_2 - C''kei\lambda r_2 + ber\lambda r_2 = 0 \\ C'kei\lambda r_2 + C''ker\lambda r_2 + bei\lambda r_2 = 0 \end{cases} \quad (2.32)$$

Kadangi

$$\begin{vmatrix} \ker \lambda r_2 & -\ker \lambda r_2 \\ \ker \lambda r_2 & \ker \lambda r_2 \end{vmatrix} = \ker^2 \lambda r_2 + \ker^2 \lambda r_2 \neq 0 \quad (2.33)$$

tai iš (2.27) galime apskaičiuoti konstantas $C' = C'(r_2)$, $C'' = C''(r_2)$.

Pažymėkime

$$\begin{cases} A(r_1) = c_1 \cos \gamma_1 \\ B(r_1) = c_1 \sin \gamma_1 \end{cases} \quad (2.34)$$

Tuomet galime apskaičiuoti

$$\begin{cases} c_1 = \sqrt{A^2(r_1) + B^2(r_1)} \\ \tan \gamma_1 = B(r_1)/A(r_1) \end{cases} \quad (2.35)$$

Jei (2.31) įrašysime į (2.29), tai gausime greitį kai $r = r_1$:

$$v_d(r_1, t) = \varphi_0 c_1 \cos(\omega t + \gamma_1) \quad (2.36)$$

jei konstantą φ_0 nustatysime iš sąlygos:

$$\varphi_0 = \frac{b\omega}{c_1} \quad (2.37)$$

Gavome, kad sprendinys (2.35) tenkina pirmąją kraštinę sąlygą (2.19), kurioje $U = 0$ ir nėra fazės skirtumo γ_1 . Tačiau stacionariams virpesiams šis fazės skirtumas neturi jokios reikšmės. Formaliai šį skirtumą galime eliminuoti pakeitę pradinį laiko momentą, t. y. įrašę $t' = t + \frac{\gamma_1}{\omega}$. Lygtyse (2.26) ir (2.30) rašome v_d pažymėdami, kad ši sprendinio dalis tenkina dinaminę kraštinės sąlygos dalį.

Kartais patogiau taikyti Hankelio funkcijas [65, 128 p.]

$$\ker x = \frac{2}{\pi} \ker x, \quad \ker x = -\frac{2}{\pi} \ker x$$

Jeigu (2.21) lygtyje įrašysime $\lambda = 0$, tai gausime $\dot{\varphi} = 0$ todėl $\varphi = \text{const}$, o antroji lygtis gali būti užrašyta taip: $r f'' + f' = 0$, arba $(r f')' = 0$ ir todėl $r f' = C_1^*$. Dalindami iš r ir integruodami randame $f = C_1^* \ln r + C_2^*$. Kadangi galime laikyti $\varphi = \text{const} = 1$, tai skysčio dalelių greitis:

$$v(r) = C_1^* \ln r + C_2^* \quad (2.38)$$

Kraštinės sąlygos stacionariai tėkmei $v(r_1) = U$, $v(r_2) = 0$. Įrašę į (2.33) gauname:

$$\begin{cases} C_1^* \ln r + C_2^* = U \\ C_1^* \ln r + C_2^* = 0 \end{cases} \quad (2.39)$$

Išreiškę iš šių lygčių konstantas C_1^* , C_2^* ir įrašę į sprendinį (2.34) gauname:

$$v_s(r) = U \frac{\ln r - \ln r_2}{\ln r_1 - \ln r_2} \quad (2.40)$$

Šis sprendinys tenkina stacionariąją kraštinės sąlygos (2.19) dalį. Visą kraštinę sąlygą (2.19) tenkina sprendinių (2.25) ir (2.38) suma, kurią galime užrašyti ir taip:

$$v(r,t) = U \frac{\ln r - \ln r_2}{\ln r_1 - \ln r_2} + b\omega \frac{A(r)\cos \omega t - B(r)\sin \omega t}{c_1} \quad (2.41)$$

Funkcijos $A(r)$, $B(r)$ teikiamos (2.26) lygtimis.

TANGENTINĖ JĖGA

Įtempis ant cilindro paviršiaus dėl klampaus skysčio $p_{rz} = \mu \frac{\partial v}{\partial r}$, todėl jėga į viso cilindro z krypties ilgio vienetą:

$$T = 2\pi r_1 p_{rz} = 2\pi \mu r_1 \frac{\partial v}{\partial r} \quad (2.42)$$

Iš (2.40) apskaičiuojame tangentinę jėgą dėl stacionaraus cilindro judėjimo

$$T_s = \frac{2\pi \mu U}{\ln r_1 - \ln r_2} \quad (2.43)$$

Kadangi $r_2 > r_1$, tai $T_s < 0$: cilindrą veikianti jėga nukreipta priešingai greičiui U ir ašiai z , taigi iš tiesų tai jėgos projekcija.

Tangentinės jėgos dalis, atsiradusi dėl cilindro virpesių, gaunama diferencijuojant sprendinį (2.31):

$$\frac{\partial v}{\partial r} = \varphi_0 \lambda (A^* \cos \omega t - B^* \sin \omega t) \quad (2.44)$$

kur

$$\begin{cases} A^* = ber' \lambda r_1 + C' ker' \lambda r_1 - C'' kei \lambda r_1 \\ B^* = bei \lambda r_1 + C' kei \lambda r_1 - C'' ker \lambda r_1 \end{cases} \quad (2.45)$$

Čia $ber'(x)$, $ker'(x)$ yra šių funkcijų išvestinės jų argumentų x atžvilgiu, o po diferencijavimo įrašyta $r = r_1$. Pažymėkime

$$A^* = c_2 \cos \gamma_2, B^* = c_2 \sin \gamma_2$$

Tuomet $c_2 = \sqrt{A^{*2} + B^{*2}}$, $\tan \gamma_2 = \frac{B^*}{A^*}$. Dinaminės jėgos komponentės modulis bus:

$$T_{dm} = 2\pi\mu b\omega \frac{c_1}{c_2} \lambda r_1 \quad (2.46)$$

Modifikuotų Beselio funkcijų išvestines galima išreikšti tokiomis pat pirmos eilės funkcijomis [64, p.129] :

$$\begin{aligned} (ber\ x)' &= \frac{1}{\sqrt{2}}(ber_1x + bei_1x) & (kei\ x)' &= \frac{1}{\sqrt{2}}(ker_1x + kei_1x) \\ (bei\ x)' &= \frac{1}{\sqrt{2}}(bei_1x + ber_1x) & (ker\ x)' &= \frac{1}{\sqrt{2}}(kei_1x + ker_1x) \end{aligned}$$

SPRENDINIO APROKSIMACIJOS

Tyrinėsime mažų Beselio funkcijų argumentų atveją. Pažymėkime

$$x = \lambda r, \quad x_j = \lambda r_j, \quad j = 1, 2 \quad (2.47)$$

Tuomet, jei $|x| \ll 1$, galime taikyti aproksimacijas [66, 267 p.] :

$$ber\ x \approx 1, \quad bei\ x \approx \frac{x^2}{4}, \quad her\ x \approx -\frac{1}{2}, \quad hei\ x \approx \frac{2}{\pi}y, \quad y = \ln \frac{\gamma_c x}{2} \quad (2.48)$$

Čia pažymėta $\gamma_c = 1,781$, o $\ln \gamma_c = C = 0,5772$ yra žinoma Oilerio konstanta. Lygybėse (2.48) yra pirmosios aproksimacijos. Įrašę jas į (2.32) gauname tiesinių lygčių sistemą

$$\begin{cases} y_2 C' - \frac{\pi}{4} C'' = 1 \\ \frac{\pi}{4} C' + y_2 C'' = 0 \end{cases} \quad (2.49)$$

kurios sprendinys yra

$$C' = \frac{16y_2}{u_0}, \quad C'' = -\frac{4\pi}{u_0}, \quad u_0 = \pi^2 + 16y_2^2 \quad (2.50)$$

Dabar iš (2.35) galime apskaičiuoti pirmąsias funkcijų aproksimacijas

$$A_i(r) = 16y_2 \frac{y_2 - y}{u_0}, \quad B_1(r) = 4\pi \frac{y - y_2}{u_0} \quad (2.51)$$

Įrašę čia $r = r_1$ galime apskaičiuoti konstantą $c_1^2 = \frac{u_0}{\pi^2} B_1^2(r_1)$, o iš (2.51):

$$c_1 = 4 \frac{|y_1 - y_2|}{\sqrt{u_0}} = 4 \frac{\ln r_2 - \ln r_1}{\sqrt{u_0}} \quad (2.52)$$

todėl iš (2.36) $\varphi_0 = \frac{b\omega}{4 \ln r_2 - \ln r_1} \sqrt{u_0}$ gauname. Dabar galime taip aprašyti pirmąją aproksimaciją:

$$v(r,t) = b\omega \frac{\ln r_2 - \ln r}{\ln r_2 - \ln r_1} \frac{4y_2 \cos \omega t + \pi \sin \omega t}{\sqrt{\pi^2 + 16y_2^2}} \quad (2.53)$$

Akivaizdu, kad dešinėje esančios trupmenos modulis yra vienetas, todėl

$$v(r,t) = b\omega \frac{\ln r_2 - \ln r}{\ln r_2 - \ln r_1} \cos(\omega t - \gamma_r) \quad (2.54)$$

kur pradinė fazė $\gamma_r = \arctan \frac{\pi}{4y_2} = \text{const}$. Matome, kad pirmosios aproksimacijos skysčio dalelių greičiai nepriklauso nuo atstumo r , taigi skystis virpa su cilindru sinchroniškai. Diferencijuodami r atžvilgiu ir po to iš (2.42) įrašę $r = r_1$ gauname įtempį bei dinaminę tangentinės jėgos vertę:

$$T_{d1} = -2\pi\mu \frac{b\omega}{\ln r_2 - \ln r_1} \cos(\omega t - \gamma_r) \quad (2.55)$$

Šios harmoninės jėgos modulis yra $T_{d1m} = \frac{2\pi\mu b\omega}{\ln r_2 - \ln r_1}$. Palyginę su (2.43) matome, kad tangentinės jėgos modulis skaičiuojamas taip pat, kaip ir cilindru tolygiai judant, greitį U pakeičiant greičio moduliu $b\omega$.

Nustatyti antrąją aproksimaciją yra žymiai sudėtingiau. Tarkime, kad tolesniuose skaičiavimuose paliksime dėmenis su $x^2 = (\lambda r)^2$, bet nepaisysime mažų skaičių x^4 ir aukštesniųjų laipsnių. Tuomet vietoje aproksimacijų (2.48) gauname [65, 127 p.]

$$\ker x = -y + \frac{\pi x^2}{16} \quad \text{kei } x = -\frac{\pi}{4} + \frac{x^2}{4}(1-y) \quad (2.56)$$

Tiesinių lygčių sistema konstantoms nustatyti yra tokia:

$$\begin{cases} C' \left(y_2 - \frac{\pi x_2^2}{16} \right) - C'' \left(\frac{\pi}{4} - \frac{1-y_2}{4} x_2^2 \right) = 1 \\ C' \left(\frac{\pi}{4} - \frac{1-y_2}{4} x_2^2 \right) + C'' \left(y_2 - \frac{\pi x_2^2}{16} \right) = \frac{x_2^2}{4} \end{cases} \quad (2.57)$$

Laikydami si nustatyto tikslumo iš šių lygčių apskaičiuojame

$$C' = 16 \frac{y_2}{u_0} + 16 \frac{2\pi y_2}{u_0^2} x_2^2 \quad C'' = -\frac{4\pi}{u_0} + 4 \frac{-\pi^2 + 16y_2^2}{u_0^2} x_2^2 \quad (2.58)$$

Galime nustatyti aproksimacijas

$$\begin{cases} A(r_1) = A_0 + A_1 x_1^2 + A_2 x_2^2 \\ B(r_1) = B_0 + B_1 x_1^2 + B_2 x_2^2 \end{cases} \quad (2.59)$$

kur

$$\begin{aligned} A_0 &= 1 - C'y_1 + \frac{\pi}{4}C'', A_1 = \frac{\pi}{16}C' + C''\frac{y_1 - 1}{4}, A_2 = \frac{\pi}{4}C'' - C'y_1 \\ B_0 &= -\frac{\pi}{4}C' - C''y_1, B_1 = \frac{1}{4} + C'\frac{1 - y_1}{4} + C''\frac{\pi}{16}, B_2 = -\frac{\pi}{4}C'' - C'y_1 \end{aligned} \quad (2.60)$$

Jei, kaip ir aukščiau, žymėsime

$$A'(r) = \frac{dA}{dr} = A^* \lambda, \quad A^* = \frac{dA}{dr}, \quad B'(r) = \frac{dB}{dr} = B^* \lambda, \quad B^* = \frac{dB}{dx} \quad (2.61)$$

tai gausime išvestines

$$\begin{cases} A'(r_1) = -\frac{C'}{r_1} + A_1^* \lambda^2 r_1^2 \\ B'(r_1) = -\frac{C''}{r_1} + B_1^* \lambda^2 r_1^2 \end{cases} \quad (2.62)$$

kur

$$A_1^* = \frac{\pi}{8}C' + C''\frac{2y_1 - 1}{4}, B_1^* = \frac{1}{2} + C'\frac{1 - 2y_1}{4} + \frac{\pi}{8}C'' \quad (2.63)$$

Užrašysime tik antrąją aproksimaciją, kuri turi būti sumuojama su pirmąja aproksimacija:

$$\frac{T_{d2}}{2\pi\mu} = \varphi_0 [x_1 A_2^*(r_1) \cos \omega t - x_1 B_2^*(r_1) \sin \omega t] \quad (2.64)$$

kur pažymėta

$$\begin{cases} x_1 A_2^*(r_1) = -16 \frac{2\pi y_2}{u_0^2} x_2^2 + \pi \frac{2y_2 - 2y_1 + 1}{u_0} x_1^2 \\ x_1 B_2^*(r_1) = 4 \frac{\pi^2 - 16y_2^2}{u_0^2} x_2^2 + \left(\frac{1}{2} - \frac{\pi^2}{2u_0} + 4y_2 \frac{1 - 2y_1}{u_0} \right) x_1^2 \end{cases} \quad (2.65)$$

Formulėje (2.64) galime įrašyti $\varphi_0 = \frac{b\omega}{c_1}$ ir $c_1 = 4 \frac{\ln r_2 - \ln r_1}{\sqrt{u_0}}$. Suprantama, kad apie jėgos sinchronizaciją su cilindro judėjimu, apie kurią rašyta pirmajai aproksimacijai, čia nebėra kalbos.

2.3. Atgalinis tekėjimas

Kai spindulio r_1 cilindras, esantis kito, didesnio cilindro viduje, pastoviu greičiu U juda z ašies kryptimi ir tas didesnis cilindras kažkur tolumoje yra uždarytas, tai be tėkmės z ašies kryptimi turi susidaryti atgalinis tekėjimas – toks, kad suminis viso tekėjimo debitas būtų lygus nuliui. Jeigu toks tekėjimas susidarė, o suprantama, kad

jis turi susidaryti, tai didesniame spindulio r_2 cilindre turi atsirasti slėgio gradientas. Tokiu būdu skysčio hidrodinaminė lygtis:

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial t} = v_s \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right) \quad (2.66)$$

kur ρ yra skysčio tankis, v_s – kinematinės klampos koeficientas, p – slėgis skystyje. Tarkime, kad tekėjimas stacionarus, o slėgio gradientas pastovus:

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} = w_0 = \text{const}, \quad \frac{\partial v}{\partial t} = 0, \quad v_s \rho = \mu \quad (2.67)$$

Iš (2.66) gauname lygtį $rw_0 = rv'' + v'$, kurią galime užrašyti taip: $\frac{d(rv')}{dr} = rw_0$, todėl po integravimo ir dalybos iš r bus $v' = \frac{w_0}{2}r - \frac{C_1}{r}$. Iš čia, dar kartą integruojant:

$$v = \frac{w_0}{4}r^2 - C_1 \ln r + C_2 \quad (2.68)$$

Kraštinės sąlygos

kai $r = r_1$, tai $v = U$,

kai $r = r_2$, tai $v = 0$.

Įrašę į (2.68) gauname dvi lygtis:

$$\begin{cases} U = \frac{w_0}{4}r_1^2 - C_1 \ln r_1 + C_2 \\ 0 = \frac{w_0}{4}r_2^2 - C_1 \ln r_2 + C_2 \end{cases} \quad (2.69)$$

Išsprendę iš čia C_1 ir C_2 bei įrašę į (2.68) gauname diferencialinę lygtį ir kraštinės sąlygas tenkinantį sprendinį:

$$v = w_0 \frac{r^2 - r_2^2}{4} + \left(U + w_0 \frac{r_2^2 - r_1^2}{4} \right) \frac{\ln r_2 - \ln r}{\ln r_2 - \ln r_1} \quad (2.70)$$

Jei nėra atgalinio tekėjimo, t. y. jei $w_0 = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} = 0$, tai

$$v = U \frac{\ln r_2 - \ln r}{\ln r_2 - \ln r_1} \quad (2.71)$$

(2.70) lygtyje nežinome slėgio gradiento w_0 . Jį nustatysime, iš sąlygos, kad debitas $Q = 0$.

Jei greitis v , tai per spindulio r ir pločio dr žiedą tekantis skysčio tūris yra $dQ = v2\pi r dr$, todėl visas debitas $Q = 2\pi \int_{r_1}^{r_2} v r dr$. Čia turime įrašyti greitį iš (2.70). Po integravimo gauname:

$$\frac{Q}{2\pi} = \frac{4U + w_0 s_v}{16 \ln(r_2/r_1)} \left(s_v - 2r_1^2 \ln \frac{r_2}{r_1} \right) - w_0 \frac{s_v^2}{16} \quad (2.72)$$

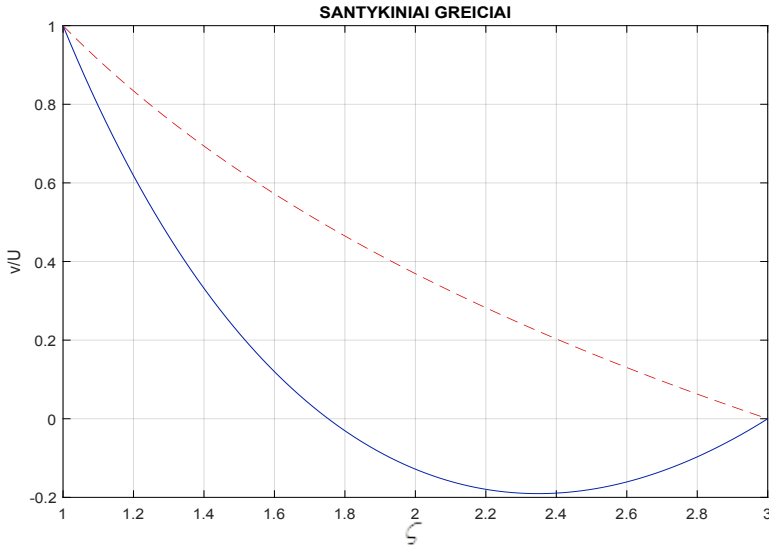
Čia pažymėta $s_v = r_2^2 - r_1^2$. Įrašę į (2.72) $Q = 0$ galime išreikšti:

$$w_0 = 4U \frac{\delta_v}{s_v} \quad (2.73)$$

kur

$$\delta_v = \frac{k^2 - 1 - 2 \ln k}{(k^2 + 1) \ln k + 1 - k^2} \quad (2.74)$$

čia $k = r_2/r_1 > 1$.



2.8 pav. V/U priklausomybė nuo ζ .

Jei (2.73) įrašysime į sprendinį (2.70), tai tikrasis skysčio greitis, atsižvelgiant į atgalinį tekėjimą, apskaičiuojamas iš lygybės:

$$\frac{v}{U} = (1 + \delta_v) \frac{\ln r_2 - \ln r}{\ln r_2 - \ln r_1} - \delta_v \frac{r_2^2 - r^2}{r_2^2 - r_1^2} \quad (2.75)$$

Pažymėję $\zeta = r/r_1$ galime perrašyti (2.75) taip:

$$\frac{v}{U} = (1 + \delta_v) \left(1 - \frac{\ln \zeta}{\ln k} \right) - \delta_v \frac{k^2 - \zeta^2}{k^2 - 1} \quad (2.76)$$

Matome, kad kai $\zeta = 1$, tai $v = U$, o kai $\zeta = k = r_2/r_1$, tai $v = 0$.

Tangentinis įtempis greičiu U judančio cilindro paviršiuje $p_{rz} = \mu \frac{\partial v}{\partial r}$. Čia po diferenciacijavimo reikia įrašyti $r = r_1$. Padauginę iš $2\pi r_1$ gausime ilgio vieneta veikiančią tangentinę jėgą:

$$T_z = 2\pi\mu U \left(\frac{2\delta_v r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{1 + \delta_v}{\ln r_2 - \ln r_1} \right) \quad (2.77)$$

Įrašę $k = r_2/r_1$, galime jėgą aprašyti taip:

$$T_z = 2\pi\mu U \left(\frac{2\delta_v}{k^2 - 1} - \frac{1 + \delta_v}{\ln k} \right) \quad (2.78)$$

Jei atgalinio tekėjimo nėra, tai $\delta_v = 0$ ir iš (2.78) gauname žinomą šios jėgos reikšmę:

$$T_{z0} = - \frac{2\pi\mu U}{\ln r_2 - \ln r_1} = - \frac{2\pi\mu U}{\ln k} \quad (2.79)$$

o jei $r_2 \rightarrow r_1$, t. y. $k \rightarrow 1$, tai tangentinė jėga neapibrėžtai auga $T_z \rightarrow \infty$.

Aptarsime tą atveją, kai r_1 yra labai mažas, t. y.

$$k = \frac{r_2}{r_1} = 10^n \gg 1 \quad (2.80)$$

Tuomet galime apskaičiuoti $\delta_v = \frac{1}{\ln k - 1} + \frac{\ln k}{(\ln k - 1)^2 k^2} + \dots$

Įrašę į (2.78) gausime:

$$\frac{T_z}{2\pi\mu U} = - \frac{1}{\ln k - 1} + \frac{2\ln k - 3}{(\ln k - 1)^2 k^2} + \dots \quad (2.81)$$

Palyginę su tangentinės jėgos verte (2.79) kai nepaisome atgalinio tekėjimo, matome, kad atsižvelgiant į atgalinį tekėjimą pirma aproksimacija visada didesnė.

2.4. Tangentinės jėgos skaičiavimas

Tangentinės jėgos skaičiavimas MRF-122EG skysčiui:

$$r_1 = 7 \cdot 10^{-4} \text{ cm}, \quad r_2 = 10r_1 = 7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}, \quad f_v = 2000 \text{ Hz},$$

$$\omega = 2\pi f_v = 0,4\pi \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}, \quad \mu = 0,042 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 4,2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{kg}}{\text{cm} \cdot \text{s}},$$

$$\rho = 2,38 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{cm^3}, \vartheta = \frac{\mu}{\rho} = 1,76 \cdot 10^{-2} \frac{cm^2}{s}, \lambda = \sqrt{\frac{\omega}{\vartheta}} = 8,45 \frac{1}{cm},$$

$$x_1 = \lambda r_1 = 0,0059, x_2 = \lambda r_2 = 0,059.$$

Pirmoji aproksimacija:

Tangentinės jėgos modulis:

$$T_{d1m} = \frac{2\pi\mu b\omega}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \frac{2\pi\mu b\omega}{\ln 10} = 2,73 \mu b\omega$$

$$T_{s1m} = \frac{2\pi\mu U}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = 2,73 \mu U$$

$$U = \frac{2 \cdot \rho \cdot r_1^2 \cdot g}{9 \cdot \mu} = 1,068 \cdot 10^{-15} \frac{m}{s} = 1,068 \cdot 10^{-13} \frac{cm}{s}$$

$$T_{s1m} = 2,73 \mu U = 1,22 \cdot 10^{-19} \frac{N}{cm}$$

Tai stacionari jėga, tenkanti cilindro ilgio vienetui z ašies kryptimi.

Tarkime, kad virpesių amplitudė

$$b = \frac{r_1}{4} = 1,75 \cdot 10^{-4} cm$$

Tuomet virpesių greičio amplitudė:

$$b\omega = 0,7\pi \frac{cm}{s} = 2,2 \frac{cm}{s}$$

$$T_{d1m} = 2,73 \mu b\omega = 2,52 \cdot 10^{-6} \frac{N}{cm}$$

Antroji aproksimacija:

$$\text{Įrašome: } x_1 = 0,0059, x_2 = 0,059, y_1 = \ln \frac{\sqrt{x_1}}{2} = -4,32, y_2 = \ln \frac{\sqrt{x_2}}{2} = -3,17,$$

$$\mu_0 = \pi^2 + 16y_2^2 = 171,06, \sqrt{\mu_0} = 13,08, c_1 = 4 \frac{\ln r_2 / r_1}{\sqrt{\mu_0}} = 4 \frac{\ln 10}{13,08} = 0,704.$$

Iš (2.53) lygties gauname:

$$x_1 \cdot A_2^*(r_1) = 40,128,$$

$$x_2 \cdot B_2^*(r_1) = -80,7.$$

Tuomet antroji aproksimacija:

$$\begin{aligned} \frac{T_{d2}}{\mu b\omega} &= \frac{2\pi}{c_1} [x_1 A_2^*(r_1) \cos \omega t - x_2 B_2^*(r_1) \sin \omega t] = \frac{2\pi}{0,704} \\ &\cdot (40,128 \cos \omega t + 80,7 \sin \omega t) = \\ &= 8,92 \sin(\omega t - r^*) \end{aligned}$$

$$\begin{cases} c^* \cos r^* = 40,128 \\ c^* \sin r^* = -80,7 \end{cases}$$

todėl

$$tgr^* = \frac{40,128}{-80,7} = -0,497$$

$$r^* = \text{atan}(-0,497) = -0,456$$

$$T_{d2} = \mu b \omega \cdot 8,92 \sin(\omega t - r^*) = 3,33 \cdot 10^{-7} \frac{N}{cm}$$

O pirmosios aproksimacijos:

$$\begin{cases} 4y_2 = c \cos r_r \\ \pi = c \sin r_r \end{cases}$$

$$tgr_r = \frac{\pi}{4y_2} = \frac{\pi}{4 \cdot 3,17} = 0,248.$$

$$r_r = \text{atan}(0,248) = 0,243$$

Žinoma, r_r nesutampa su r^* .

Tangentinės jėgos skaičiavimas MRF-140CG skysčiui:

$$r_1 = 8 \cdot 10^{-4} \text{ cm}, r_2 = 10r_1 = 7 \cdot 10^{-3} \text{ cm}, f_v = 2000 \text{ Hz},$$

$$\omega = 2\pi f_v = 0,4\pi \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}, \mu = 0,280 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 2,8 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{cm \cdot s},$$

$$\rho = 3,64 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{cm^3}, \vartheta = \frac{\mu}{\rho} = 7,69 \cdot 10^{-2} \frac{cm^2}{s}, \lambda = \sqrt{\frac{\omega}{\vartheta}} = 4,04 \frac{1}{cm},$$

$$x_1 = \lambda r_1 = 0,0032, x_2 = \lambda r_2 = 0,032.$$

Pirmoji aproksimacija:

Tangentinės jėgos modulis:

$$T_{d1m} = \frac{2\pi\mu b \omega}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \frac{2\pi\mu b \omega}{\ln 10} = 2,73 \mu b \omega$$

$$T_{s1m} = \frac{2\pi\mu U}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = 2,73 \mu U$$

$$U = \frac{2 \cdot \rho \cdot r_1^2 \cdot g}{9 \cdot \mu} = 1,422 \cdot 10^{-14} \frac{m}{s} = 1,422 \cdot 10^{-12} \frac{cm}{s}$$

$$T_{s1m} = 2,73 \mu U = 1,08 \cdot 10^{-17} \frac{N}{cm}$$

Tai stacionari jėga, tenkanti cilindro ilgio vienetui z ašies kryptimi.

Tarkime, kad virpesių amplitudė

$$b = \frac{r_1}{4} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$$

Tuomet virpesių greičio amplitudė:

$$b\omega = 0,8\pi \frac{cm}{s} = 2,5 \frac{cm}{s}$$

$$T_{d1m} = 2,73 \mu b \omega = 1,92 \cdot 10^{-5} \frac{N}{cm}$$

Antroji aproksimacija:

$$\text{Įrašome: } x_1 = 0,0032, x_2 = 0,032, y_1 = \ln \frac{\sqrt{x_1}}{2} = -4,26, y_2 = \ln \frac{\sqrt{x_2}}{2} = -3,11, \\ \mu_0 = \pi^2 + 16y_2^2 = 164,35, \sqrt{\mu_0} = 12,82, c_1 = 4 \frac{\ln r_2 / r_1}{\sqrt{\mu_0}} = 4 \frac{\ln 10}{12,82} = 0,718.$$

Iš (2.53) lygties gauname:

$$x_1 \cdot A_2^*(r_1) = 12,74, \\ x_2 \cdot B_2^*(r_1) = -24,99.$$

Tuomet antroji aproksimacija:

$$\frac{T_{d2}}{\mu b \omega} = \frac{2\pi}{c_1} [x_1 A_2^*(r_1) \cos \omega t - x_2 B_2^*(r_1) \sin \omega t] = \frac{2\pi}{0,718} \\ \cdot (12,74 \cos \omega t + 24,99 \sin \omega t) = 8,74 \sin (\omega t - r^*)$$

$$\begin{cases} c^* \cos r^* = 12,74 \\ c^* \sin r^* = -24,99 \end{cases}$$

todėl

$$tgr^* = \frac{12,74}{-24,99} = -0,509$$

$$r^* = \text{atan}(-0,497) = -0,471$$

$$T_{d2} = \mu b \omega \cdot 7,18 \sin (\omega t - r^*) = 2,53 \cdot 10^{-7} \frac{N}{cm}$$

O pirmosios aproksimacijos:

$$\begin{cases} 4y_2 = c \cos r_r \\ \pi = c \sin r_r \end{cases}$$

$$tgr_r = \frac{\pi}{4y_2} = \frac{\pi}{4 \cdot 3,17} = -0,248.$$

$$r_r = \text{atan}(-0,248) = -0,243$$

Tangentinės jėgos skaičiavimas MUDZH-3 skysčiui:

$$r_1 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ cm}, r_2 = 10r_1 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ cm}, f_v = 2000 \text{ Hz},$$

$$\omega = 2\pi f_v = 0,4\pi \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}, \mu = 0,280 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 2,8 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{cm} \cdot \text{s}},$$

$$\rho = 2,92 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}, \vartheta = \frac{\mu}{\rho} = 9,59 \cdot 10^{-2} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}, \lambda = \sqrt{\frac{\omega}{\vartheta}} = 3,62 \frac{1}{\text{cm}},$$

$$x_1 = \lambda r_1 = 0,0018, x_2 = \lambda r_2 = 0,018.$$

Pirmoji aproksimacija:

Tangentinės jėgos modulis:

$$T_{d1m} = \frac{2\pi \mu b \omega}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} = \frac{2\pi \mu b \omega}{\ln 10} = 2,73 \mu b \omega$$

$$T_{s1m} = \frac{2\pi\mu U}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = 2,73 \mu U$$

$$U = \frac{2 \cdot \rho \cdot r_1^2 \cdot g}{9 \cdot \mu} = 4,456 \cdot 10^{-15} \frac{m}{s} = 4,456 \cdot 10^{-13} \frac{cm}{s}$$

$$T_{s1m} = 2,73\mu U = 3,4 \cdot 10^{-18} \frac{N}{cm}$$

Tai stacionari jėga, tenkanti cilindro ilgio vienetui z ašies kryptimi.

Tarkime, kad virpesių amplitudė

$$b = \frac{r_1}{4} = 1,75 \cdot 10^{-4} cm$$

Tuomet virpesių greičio amplitudė:

$$b\omega = 1,57 \frac{cm}{s}$$

$$T_{d1m} = 1,199 \cdot 10^{-5} \frac{N}{cm}$$

Antroji aproksimacija:

$$\text{Irašome: } x_1 = 0,0018, x_2 = 0,018, y_1 = \ln \frac{\sqrt{x_1}}{2} = -4,49, y_2 = \ln \frac{\sqrt{x_2}}{2} = -3,34,$$

$$\mu_0 = \pi^2 + 16y_2^2 = 188,59, \sqrt{\mu_0} = 13,73, c_1 = 4 \frac{\ln r_2 / r_1}{\sqrt{\mu_0}} = 4 \frac{\ln 5}{13,73} = 0,67.$$

Iš (2.53) lygties gauname:

$$x_1 \cdot A_2^*(r_1) = 3,27,$$

$$x_2 \cdot B_2^*(r_1) = -6,98.$$

Tuomet antroji aproksimacija:

$$\frac{T_{d2}}{\mu b \omega} = \frac{2\pi}{c_1} [x_1 A_2^*(r_1) \cos \omega t - x_2 B_2^*(r_1) \sin \omega t] = \frac{2\pi}{0,67}$$

$$\cdot (40,128 \cos \omega t + 80,7 \sin \omega t) =$$

$$= 9,37 \sin(\omega t - r^*)$$

$$\begin{cases} c^* \cos r^* = 3,27 \\ c^* \sin r^* = -6,98 \end{cases}$$

todėl

$$\operatorname{tgr}^* = \frac{3,27}{-6,98} = -0,47$$

$$r^* = \operatorname{atan}(-0,47) = -0,44$$

$$T_{d2} = \mu b \omega \cdot 9,37 \sin(\omega t - r^*) = 1,58 \cdot 10^{-6} \frac{N}{cm}$$

O pirmosios aproksimacijos:

$$\begin{cases} 4y_2 = c \cos r_r \\ \pi = c \sin r_r \end{cases}$$

$$tgr_r = \frac{\pi}{4y_2} = \frac{\pi}{4 \cdot (-3,34)} = -0,235.$$

$$r_r = \text{atan}(-0,235) = -0.231.$$

Tangentinės jėgos skaičiavimas MRHCCS4-B skysčiui:

$$r_1 = 9 \cdot 10^{-4} \text{ cm}, r_2 = 10r_1 = 9 \cdot 10^{-3} \text{ cm}, f_v = 2000 \text{ Hz},$$

$$\omega = 2\pi f_v = 0,4\pi \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}, \mu = 0,310 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 3,1 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{cm} \cdot \text{s}},$$

$$\rho = 2,67 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3}, \vartheta = \frac{\mu}{\rho} = 1,16 \cdot 10^{-3} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}, \lambda = \sqrt{\frac{\omega}{\vartheta}} = 3,29 \frac{1}{\text{cm}},$$

$$x_1 = \lambda r_1 = 0,0029, x_2 = \lambda r_2 = 0,029.$$

Pirmoji aproksimacija:

Tangentinės jėgos modulis:

$$T_{d1m} = \frac{2\pi\mu b\omega}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \frac{2\pi\mu b\omega}{\ln 10} = 2,73 \mu b\omega$$

$$T_{s1m} = \frac{2\pi\mu U}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = 2,73 \mu U$$

$$U = \frac{2 \cdot \rho \cdot r_1^2 \cdot g}{9 \cdot \mu} = 1,46 \cdot 10^{-14} \frac{\text{m}}{\text{s}} = 1,46 \cdot 10^{-12} \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$T_{s1m} = 2,73 \mu U = 1,236 \cdot 10^{-17} \frac{\text{N}}{\text{cm}}$$

Tai stacionari jėga, tenkanti cilindro ilgio vienetui z ašies kryptimi.

Tarkime, kad virpesių amplitudė

$$b = \frac{r_1}{4} = 1,75 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$$

Tuomet virpesių greičio amplitudė:

$$b\omega = 2,83 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$$

$$T_{d1m} = 2,73 \mu b\omega = 2,39 \cdot 10^{-5} \frac{\text{N}}{\text{cm}}$$

Antroji aproksimacija:

$$\text{Įrašome: } x_1 = 0,0029, x_2 = 0,029, y_1 = \ln \frac{\sqrt{x_1}}{2} = -4,2, y_2 = \ln \frac{\sqrt{x_2}}{2} = -3,05, \mu_0$$

$$= \pi^2 + 16y_2^2 = 158,54, \sqrt{\mu_0} = 12,59, c_1 = 4 \frac{\ln r_2/r_1}{\sqrt{\mu_0}} = 4 \frac{\ln 5}{12,59} = 0,73.$$

Iš (2.53) lygties gauname:

$$x_1 \cdot A_2^*(r_1) = 11,25,$$

$$x_2 \cdot B_2^*(r_1) = -21,58.$$

Tuomet antroji aproksimacija:

$$\frac{T_{d2}}{\mu b \omega} = \frac{2\pi}{c_1} [x_1 A_2^*(r_1) \cos \omega t - x_1 B_2^*(r_1) \sin \omega t] = \frac{2\pi}{0,73} \cdot (11,25 \cos \omega t + 21,58 \sin \omega t) =$$

$$= 8,60 \sin(\omega t - r^*)$$

$$\begin{cases} c^* \cos r^* = 11,25 \\ c^* \sin r^* = -21,58 \end{cases}$$

todėl

$$\operatorname{tg} r^* = \frac{11,25}{-21,58} = -0,52$$

$$r^* = \operatorname{atan}(-0,52) = -0,48$$

$$T_{d2} = \mu b \omega \cdot 8,60 \sin(\omega t - r^*) = 3,16 \cdot 10^{-6} \frac{N}{cm}$$

O pirmosios aproksimacijos:

$$\begin{cases} 4y_2 = c \cos r_r \\ \pi = c \sin r_r \end{cases}$$

$$\operatorname{tg} r_r = \frac{\pi}{4y_2} = \frac{\pi}{4 \cdot (-3,05)} = -0,26.$$

$$r_r = \operatorname{atan}(-0,26) = -0,25$$

Tangentinės jėgos skaičiavimas MRHCCS4-A skysčiui:

$$r_1 = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ cm}, r_2 = 10r_1 = 1,1 \cdot 10^{-2} \text{ cm}, f_v = 2000 \text{ Hz},$$

$$\omega = 2\pi f_v = 0,4\pi \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}, \mu = 0,32 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 3,2 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{cm \cdot s},$$

$$\rho = 3,15 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{cm^3}, \vartheta = \frac{\mu}{\rho} = 1,13 \cdot 10^{-3} \frac{cm^2}{s}, \lambda = \sqrt{\frac{\omega}{\vartheta}} = 3,57 \frac{1}{cm},$$

$$x_1 = \lambda r_1 = 0,0039, x_2 = \lambda r_2 = 0,039.$$

Pirmoji aproksimacija:

Tangentinės jėgos modulis:

$$T_{d1m} = \frac{2\pi\mu b \omega}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = \frac{2\pi\mu b \omega}{\ln 10} = 2,73 \mu b \omega$$

$$T_{s1m} = \frac{2\pi\mu U}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} = 2,73 \mu U$$

$$U = \frac{2 \cdot \rho \cdot r_1^2 \cdot g}{9 \cdot \mu} = 2,57 \cdot 10^{-15} \frac{m}{s} = 2,57 \cdot 10^{-13} \frac{cm}{s}$$

$$T_{s1m} = 2,73 \mu U = 2,18 \cdot 10^{-17} \frac{N}{cm}$$

Tai stacionari jėga, tenkanti cilindro ilgio vienetui z ašies kryptimi.

Tarkime, kad virpesių amplitudė

$$b = \frac{r_1}{4} = 1,75 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$$

Tuomet virpesių greičio amplitudė:

$$b\omega = 3,45 \frac{cm}{s}$$

$$T_{d1m} = 2.73 \mu b\omega = 2,92 \cdot 10^{-5} \frac{N}{cm}$$

Antroji aproksimacija:

$$\text{Įrašome: } x_1 = 0,0039, x_2 = 0,039, y_1 = \ln \frac{\sqrt{x_1}}{2} = -4,09, y_2 = \ln \frac{\sqrt{x_2}}{2} = -2,95,$$

$$\mu_0 = \pi^2 + 16y_2^2 = 148,92, \sqrt{\mu_0} = 12,20, c_1 = 4 \frac{\ln r_2/r_1}{\sqrt{\mu_0}} = 4 \frac{\ln 5}{12,2} = 0,75.$$

Iš (2.53) lygties gauname:

$$x_1 \cdot A_2^*(r_1) = 21,70,$$

$$x_2 \cdot B_2^*(r_1) = -40,03.$$

Tuomet antroji aproksimacija:

$$\frac{T_{d2}}{\mu b\omega} = \frac{2\pi}{c_1} [x_1 A_2^*(r_1) \cos \omega t - x_2 B_2^*(r_1) \sin \omega t] = \frac{2\pi}{0,75}$$

$$\cdot (21,7 \cos \omega t + 40,03 \sin \omega t) =$$

$$= 8,37 \sin(\omega t - r^*)$$

$$\begin{cases} c^* \cos r^* = 21,70 \\ c^* \sin r^* = -40,03 \end{cases}$$

todėl

$$tgr^* = \frac{21,70}{-40,03} = -0,54$$

$$r^* = \text{atan}(-0,54) = -0,49$$

$$T_{d2} = \mu b\omega \cdot 8,37 \sin(\omega t - r^*) = 3,86 \cdot 10^{-6} \frac{N}{cm}$$

O pirmosios aproksimacijos:

$$\begin{cases} 4y_2 = c \cos r_r \\ \pi = c \sin r_r \end{cases}$$

$$tgr_r = \frac{\pi}{4y_2} = \frac{\pi}{4 \cdot (-2,95)} = 0,27.$$

$$r_r = \text{atan}(0,27) = 0,26$$

2.5. Sedimentacijos nustatymas magnetoreologiniuose skysčiuose matuojant jų elektrinę varžą

Magnetinių dalelių magnetizacija magnetoreologiniame skystyje gali būti aprašyta pagal formulę [68]:

$$M = \rho_p \cdot m \cdot L(\xi) \quad (2.82)$$

čia:

$$L(\xi) = 1 - \frac{1}{\xi} \quad (2.83)$$

Langevin funkcija. Jos dėmuo ξ išreiškiamas tokia formule [69]:

$$\xi = \frac{\pi\mu_o M_s a^3 H}{6 kT} \quad (2.84)$$

Tuomet magnetizacija išreiškiama formule [68]:

$$M = M_s \left(1 - \frac{6kT}{\pi\mu_o M_s a^3 H} \right) = M_s \cdot \left(1 - \frac{1}{\xi} \right) \quad (2.85)$$

čia:

$$M_s = \rho_p \cdot m \quad (2.86)$$

$$\rho_p = \frac{M_s}{m} \quad (2.87)$$

Dviejų dipolių, esančių tarp matavimo elektrodų, judėjimo lygtis[68]:

$$\frac{\pi}{6} a^3 \rho \frac{d^2 x}{dt^2} + 3\pi\eta a \frac{dx}{dt} + \frac{\pi}{6} \mu_o a^3 M \delta = 0 \quad (2.88)$$

Pritaikius pradines sąlygas $x = x_{\max}$, kai $t = 0$ ir $H \neq 0$, šios lygties sprendinys yra:

$$x = x_{\max} - \frac{\mu_o M}{18\eta} \delta a^2 t \quad (2.89)$$

Pritaikius (2.85) lygtį, kai $T = 300K$, $6kT$ yra daug mažesnis nei $\pi\mu_o M_s a^3 H$, gauname:

$$x = x_{\max} - \frac{\mu_o M_s}{18\eta} \delta a^2 t \quad (2.90)$$

arba

$$x = x_{\max} - \frac{kT\xi}{3\pi\eta H} \quad (2.91)$$

Remiantis šiais lygčių sprendiniais, elektrinė ekvivalentinė MRS rezistoriaus varža gali būti išreikšta formule:

$$R = \frac{2\rho_m}{3\pi\varphi a l} \left(x_{\max} - \frac{\mu_o M_s}{18\eta} \delta a^2 t \right) \quad (2.92)$$

kuri gali būti išreikšta:

$$R = R(t) = R_{max} - \frac{\rho_m \mu_o M_s}{27\pi l \eta} a \delta t \quad (2.93)$$

arba

$$R = R(t) = R_{max} - \frac{2\rho_m t \delta k T \xi}{9\pi^2 l \eta a H} \quad (2.94)$$

čia:

$$R_{max} = \frac{2\rho_m x_{max}}{3\pi a l \varphi} \quad (2.95)$$

Pagal Stoko dėsnį (Stokes' law), dalelių sėdimo greitis priklauso nuo sėdimo jėgos F_g , priklausančios nuo skirtumo tarp svorio jėgos ir keliančiosios Archimedo jėgos dalelėje, kurios abi priklauso nuo gravitacijos ir gali būti aprašomos pagal formulę:

$$F_g = (\rho_p - \rho_t) g \frac{4}{3} \pi a^3 \quad (2.96)$$

čia: ρ_p – magnetinių dalelių tankis, ρ_t – nešančiojo skysčio tankis, g – laisvojo kritimo pagreitis, a – magnetinės dalelės spindulys.

Trinties jėga, veikianti mažą dalelę, sėdančią klampiamame skystyje, gali būti aprašyta formule:

$$F_d = 6\pi\eta av \quad (2.97)$$

čia: F_d – trinties jėga, η – dinaminė klampa, a – magnetinės dalelės spindulys, v – tekėjimo greitis.

Esant jėgų balansui $F_d = F_g$, greitis v tampa galutiniu (sedimentacijos) greičiu. Jeigu magnetinė dalelė, esanti MRF, krenta veikiamą tik savo svorio, tuomet sedimentacijos greitis yra gaunamas, kai trinties jėga F_d kartu su keliama jėga yra lyginamos su sėdimo jėga F_g (kai $\rho_p > \rho_t$ dalelės krenta vertikaliai žemyn). Taigi, sedimentacijos greitis gali būti užrašytas:

$$U = \frac{2(\rho_p - \rho_t)}{9\eta} g a^2 \quad (2.98)$$

čia: ρ_p – magnetinių dalelių tankis, ρ_t – nešančiojo skysčio tankis, g – laisvojo kritimo pagreitis, a – magnetinės dalelės spindulys, η – dinaminė klampa.

Magnetinių dalelių, esančių MRS, sedimentacijos laipsnis dažniausiai yra apibūdinamas sedimentacijos koeficientu S . Ši konstanta yra santykis tarp sedimentacijos greičio ir pagreičio (dažniausiai laisvojo kritimo pagreičio g) ir yra išreiškiama:

$$S = \frac{U}{g} \quad (2.99)$$

Sedimentacijos koeficiento S matavimo vienetas yra Svedbergas ($1 \text{ Sb} = 10^{-13} \text{ s}$). Realiomis sąlygomis, kadangi sedimentacija yra lėtas procesas, dažniausiai naudojamas dydis yra megaSvedbergai ($1 \text{ MSb} = 10^{-7} \text{ s}$).

I (2.98) formulę įrašius (2.99) formulės išraišką gauname:

$$S = \frac{U}{g} = \frac{2(\rho_p - \rho_t)}{9\eta} a^2 \quad (2.100)$$

Vietoje magnetinių dalelių tankio įstatę išraišką iš (2.87) formulės, gauname:

$$s = \frac{U}{g} = \frac{2\left(\frac{M_s}{m} - \rho_t\right)}{9\eta} a^2 \quad (2.101)$$

Iš čia galime išvesti M_s išraišką:

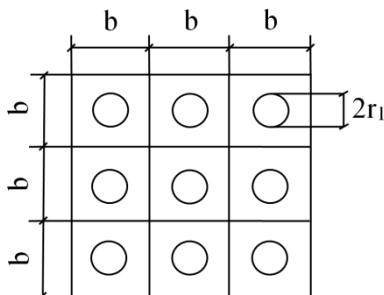
$$M_s = m \cdot \left(\rho_t + \frac{9S\eta}{2a^2}\right) = \frac{9S\eta m}{2a^2} + \rho_t m \quad (2.102)$$

Įstatę gautą išraišką į (2.92) lygtį, gauname:

$$R = R(S) = \frac{2\rho_m x_{\max}}{3\pi l \varphi a} - \frac{\rho_m \mu_0 m \cdot (2a^2 \rho_t + 9S\eta)}{54\pi l \eta a^2} a \delta t \quad (2.103)$$

2.6. Koreguota atgalinio tekėjimo teorija

Daug spindulio r_1 juostų (cilindrų) skystyje tolygiai leidžiasi žemyn greičiu U .



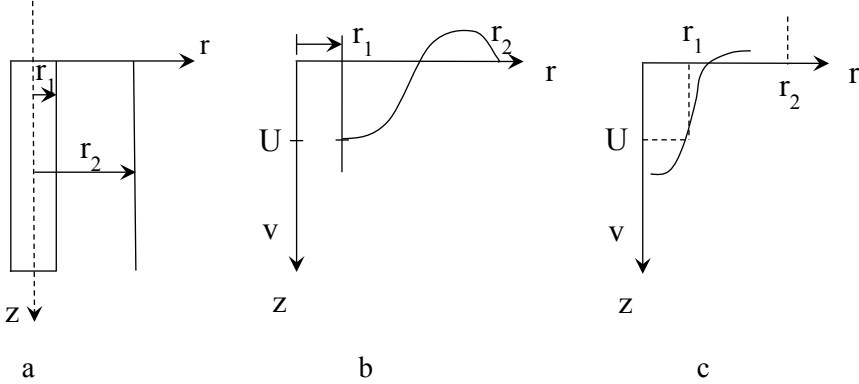
Galime laikyti, kad kiekviena juosta yra kvadratėlyje $b \times b$. Supaprastindami, kvadratėlį pakeičiame apskritimu, plotu lygiu kvadratėliui, taigi $\pi r_2^2 = b^2$.

Esminis skirtumas bus kraštinėje sąlygoje kai $r = r_2$.

Senojoje teorijoje laikėme, kad skysčio greitis lygus nuliui, kai $r = r_2$:

2.9 pav. Besileidžiančių cilindrų principinė schema

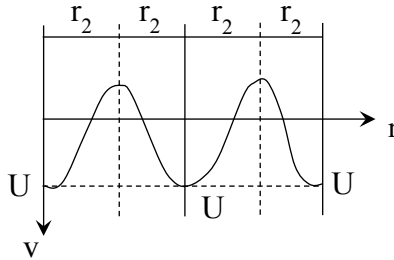
$$\begin{cases} v(r_2) = 0 \\ v(r_1) = U \end{cases}$$



2.10 pav. Koordinatės r priklausomybė nuo greičių: a,b – senoji teorija, c – naujoji teorija

Naujoje teorijoje laikome, kad $v(r_2) \neq 0$, bet grafikas $v(r)$ yra horizontalus, t.y.

$$\begin{cases} v(r_1) = U \\ \left. \frac{dv(r)}{dr} \right|_{r=r_2} = 0 \end{cases} \quad (2.104)$$



2.11 pav. Greičio U kitimo grafikas

Taigi $v(r_2) \neq 0$ ir turėtų būti $v(r_2) < 0$ dėl atgalinio tekėjimo. Turėjome ankstesnėje teorijoje skysčio greičių sprendinį:

$$\begin{cases} v' = \frac{w_c}{2}r - \frac{C_1}{r} \\ v = \frac{w_o}{2}r - C_1 \ln r + C_2 \end{cases} \quad (2.105)$$

Dabar bus kitos konstantų C_1 ir C_2 vertės. Iš (2.104) seka:

$$\begin{cases} C_1 = \frac{w_o}{2} r_2^2 \\ C_2 = U - \frac{w_o}{4} r_1^2 + \frac{w_o}{2} r_2^2 \ln r_1 \end{cases} \quad (2.106)$$

Konstantas iš (2.106) įrašome į (2.105) ir gauname:

$$v(r) = \frac{w_o}{4} (r^2 - r_1^2) + \frac{w_o}{2} r_2^2 \ln \frac{r_1}{r} + U \quad (2.107)$$

Įrašę į (2.107) $r = r_1$, gauname $v(r_1) = U$, o išdiferencijavus:

$$\frac{dv}{dr} = \frac{w_o}{2} r - \frac{w_o}{2} \frac{r_2^2}{r} \quad (2.108)$$

Ir čia įrašę $r = r_2$, gauname $\left. \frac{dv}{dr} \right|_{r=r_2} = 0$.

Skaičiuosime debitą Q :

$$\begin{aligned} \frac{Q}{2\pi} &= \int_{r_1}^{r_2} v(r) r dr = \frac{w_o}{4} \int_{r_1}^{r_2} r^3 dr - \frac{w_o}{2} r_2^2 \int_{r_1}^{r_2} r \ln r dr + \\ &+ \left(U + \frac{w_o}{2} r_2^2 \ln r_1 - \frac{w_o}{4} r_1^2 \right) \int_{r_1}^{r_2} r dr \end{aligned} \quad (2.109)$$

Gauname:

$$\begin{aligned} \frac{Q}{2\pi w_o} &= \frac{r_2^4 - r_1^4}{16} - \frac{r_2^2}{2} \left(\frac{r_2^2}{2} \ln r_2 - \frac{r_1^2}{2} \ln r_1 + \frac{r_1^2}{4} - \frac{r_2^2}{4} \right) + \\ &+ \left(\frac{U}{w_o} + \frac{r_2^2}{2} \ln r_1 - \frac{r_1^2}{2} \right) \left(\frac{r_2^2}{2} - \frac{r_1^2}{2} \right) = \frac{3r_2^4}{16} + \frac{r_1^4}{16} + \frac{r_2^4}{4} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{U}{w_o} \frac{r_2^2 - r_1^2}{2} \end{aligned} \quad (2.110)$$

Debitas turi būti lygus nuliui. Iš sąlygos $Q = 0$ seka:

$$w_o = -8U \frac{r_2^2 - r_1^2}{3r_2^4 + r_1^4 + 4r_2^4 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.111)$$

Slėgio potencialo vertę $w_o = \frac{10p}{\mu \partial z}$ iš (2.111) įrašome į sprendinį (2.107). Tuomet:

$$\frac{v(r)}{U} = 1 - 2\delta_i \frac{r^2 - r_1^2 + 2r_2^2 \ln \frac{r_1}{r}}{r_1^2} \quad (2.112)$$

kur

$$\delta_i = r_1^2 \frac{r_2^2 - r_1^2}{3r_2^4 + r_1^4 + 4r_2^2 \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (2.113)$$

Jei pažymėsime $k = \frac{r_2}{r_1}$, $\xi = \frac{r}{r_1}$, tai iš (2.112) ir (2.113) gauname:

$$\frac{v(r)}{U} = 1 - 2\delta_i(\xi^2 - 1 - 2k^2 \ln \xi) \quad (2.114)$$

$$\delta_i = \frac{k^2 - 1}{1 + k^4(3 + 4 \ln k)} \quad (2.115)$$

Lygtį (2.112) galima perrašyti taip:

$$\frac{v(r)}{U} = 1 + 2\delta_i \frac{r_1^2 - r^2 + 2r_2^2 \ln \frac{r}{r_1}}{r_1^2} \quad (2.116)$$

Skysčio įtempimo jėga į juostos ilgio vieneta:

$$T_s = 2\pi r_1 p_{rz} = 2\pi \mu r_1 \left. \frac{\partial v}{\partial r} \right|_{r=r_1} \quad (2.117)$$

Todėl

$$T_s = 8\pi \mu \frac{(k^2 - 1)^2}{1 + k^4(3 + 4 \ln k)} U \quad (2.118)$$

Lygybę (2.118) galima perrašyti taip:

$$T_s = 8\pi \mu \frac{\left(1 - \frac{1}{k^2}\right)^2}{\frac{1}{k^4} + 3 + 4 \ln k} U \quad (2.119)$$

Iš (2.119) matyti, kad kai $k \rightarrow \infty$, tai $T_s \rightarrow 0$. Iš (2.118) matome, kad kai $k \rightarrow 1$, t.y. $r_2 \rightarrow r_1$ tai taip pat $T_s \rightarrow 0$. Taigi gauname, kad egzistuoja toks $k = \frac{r_2}{r_1}$ kai T_s yra maksimalus, o greitis U priešingai – minimalus.

Iš (2.112) apskaičiuojame:

$$\frac{v'(r_1)}{U} = -4 \frac{k^2 - 1}{1 + 3k^4 + 4k^4 \ln k} \frac{r^2 - r_2^2}{r_1^2 r} \quad (2.120)$$

Todėl

$$\frac{v'(r_1)}{U} = 4\delta_i \frac{r_2^2 - r_1^2}{r_1^3} = 4\delta_i \frac{k^2 - 1}{r_1} \quad (2.121)$$

TOLYGUS JUOSTOS JUDEJIMAS

Juosta (cilindras), kurios spindulys r_1 yra cilindre, kurio spindulys r_2 . Tarp jų skystis. Svorio jėga, kuri traukia juostą žemyn, tenkanti ilgio vienetui:

$$G_c = \pi r_1^2 \cdot l \cdot (\rho_m - \rho_v) \cdot g \quad (2.122)$$

čia ρ_m – juostos (metalo) tankis,
 ρ_v – skysčio tankis.

Taigi, $\pi r_1^2 \cdot l$ yra ilgio vieneto tūris, o $\pi r_1^2 (\rho_m - \rho_v)$ – juostos ilgio vieneto masė.

Jei juosta juda tolygiai, tai jėgos atsisveria ir $G_c = T_s \neq 0$. Iš (2.43) gauname:

$$T_s = \frac{2\pi\mu U}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (2.123)$$

Gauname grimzdimo greitį:

$$U = \frac{\rho_m - \rho_v}{2\mu} \cdot r_1^2 g \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (2.124)$$

čia T_s yra projekcija į z ašį, todėl neigiama.

Metalinio rutuliuko grimzdimo greitis. Svorio jėga, skystyje traukianti rutuliuką žemyn:

$$G_r = \frac{4}{3}\pi r_1^3 (\rho_m - \rho_v) g \quad (2.125)$$

Jėga, veikianti rutuliuką, kai jis juda skystyje (Stokso formulė):

$$T_r = 6\pi\mu r_1 U \quad (2.126)$$

Jei rutuliukas juda tolygiai, tai $G_r = T_r$ ir

$$U = \frac{\rho_m - \rho_v}{9\mu} 2r_1^2 g \quad (2.127)$$

Gauname dimensijas:

$$\left[\frac{r^2}{\vartheta_s} g \right] = cm^2 \cdot \frac{s}{cm^2} \cdot \frac{cm}{s^2} = \frac{cm}{s}$$

čia $g = 9.81 \frac{m}{s^2}$, o klampumo koeficientas $\mu = \rho_v \vartheta_s$. Kinematinis klampumo koeficientas $[\vartheta_s] = \frac{cm^2}{s}$.

2.7. Eksperimentinių ir teorinių rezultatų palyginimas

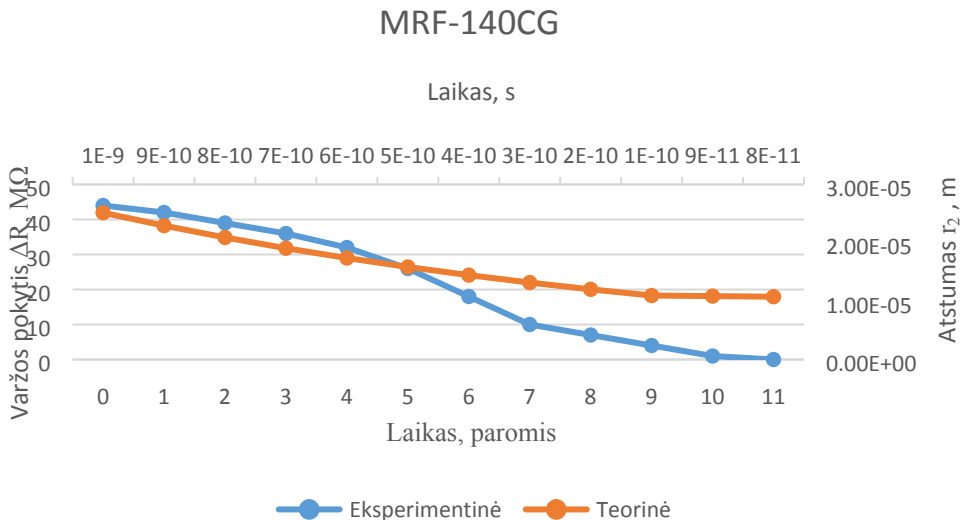
I (2.99) įstatę (2.124) išraišką, gauname sedimentacijos koeficientą:

$$S = \frac{U}{g} = \frac{\rho_m - \rho_v}{2\mu} \cdot r_1^2 \cdot \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) \quad (2.128)$$

Kadangi r_2 atstumas yra tarp dalelių, galime teigti, kad kuo mažesnis yra r_2 , tuo didesnė yra dalelių koncentracija. Pasinaudodami (2.118) formule, galime išsireikšti atstumo r_2 priklausomybę nuo sėdimo greičio:

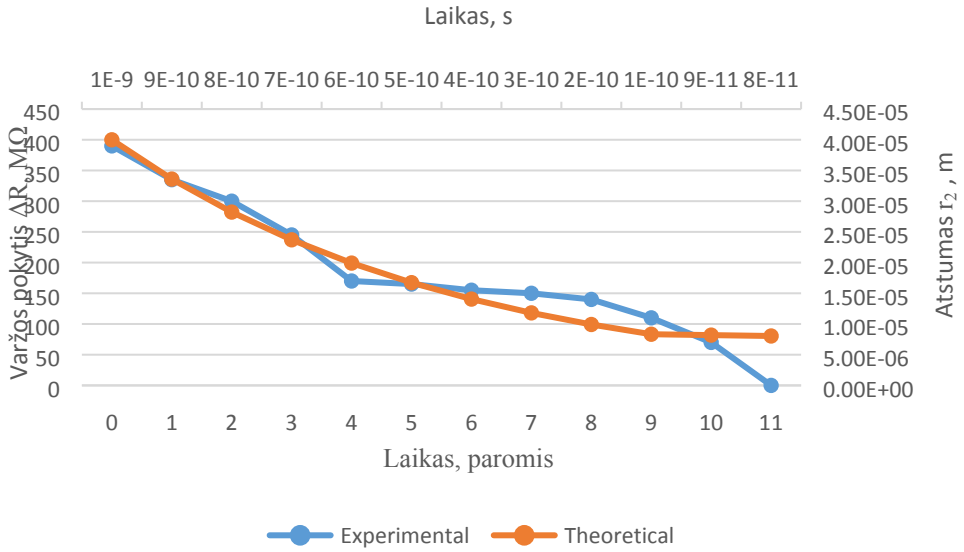
$$r_2 = e^{\left(\frac{2\mu}{(\rho_m - \rho_v)r_1^2} S \right)} \cdot r_1 \quad (2.129)$$

Kadangi šiame darbe sukurtas matematinis modelis veikia tik kai r_2 yra labai mažas ($10^{-6} - 10^{-5}$ m), pasirinktas atitinkamas ir sedimentacijos laikas ($10^{-9} - 10^{-11}$ s). Sedimentacijos laiko priklausomybės S nuo atstumo r_2 grafikai visiems penkiems vėliau tirtiems magnetoreologiniams skysčiams pateiktos (2.12 pav.).



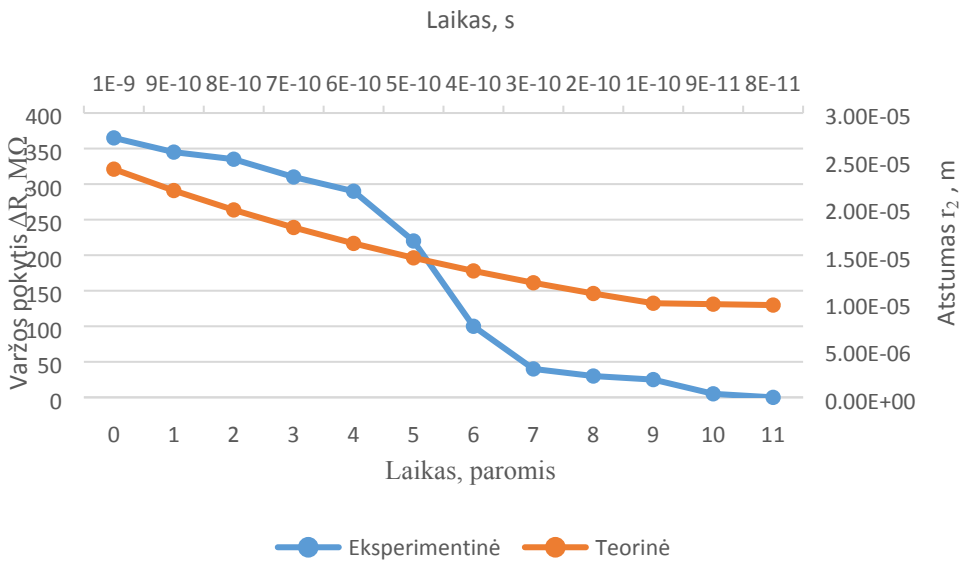
a

MRHCCS4-B



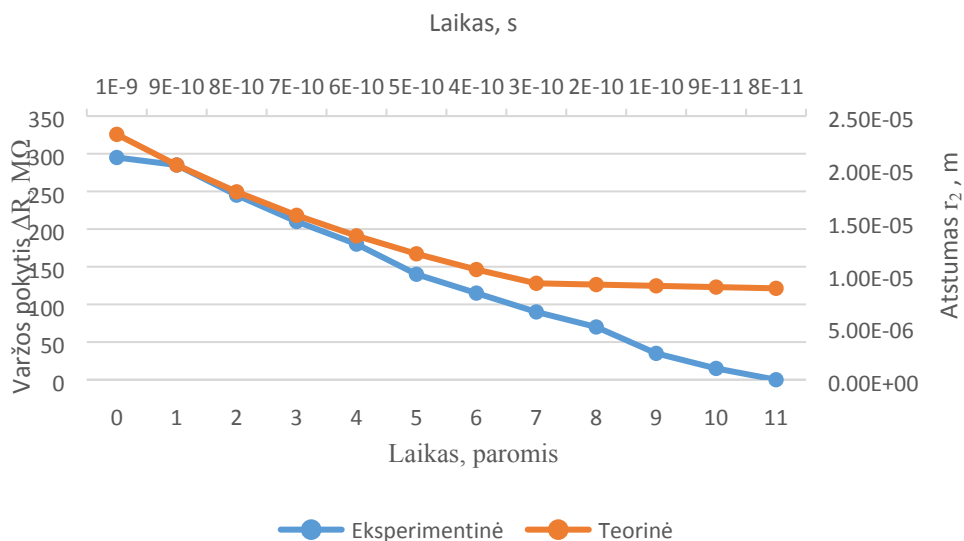
b

MRHCCS4-A



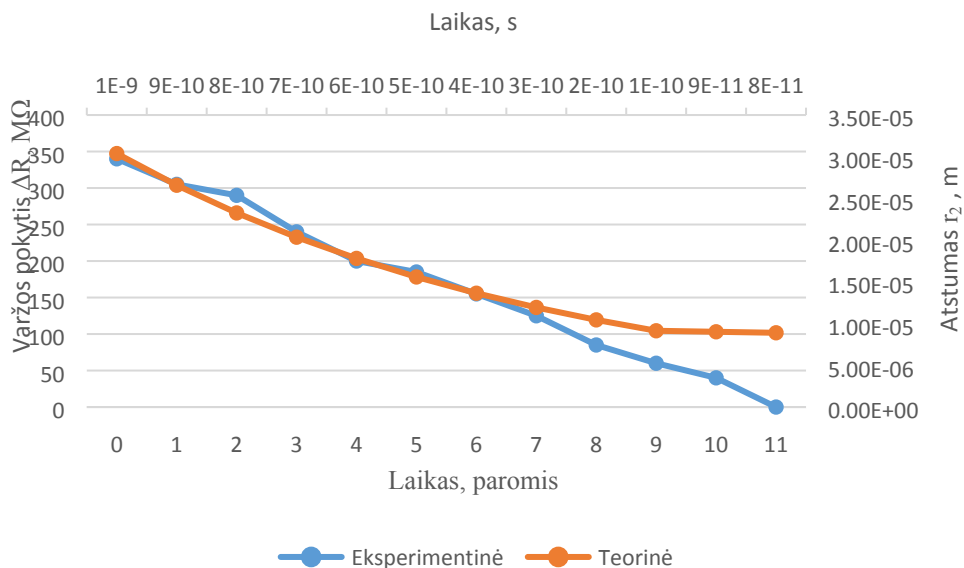
c

MUDZH-3



d

MRF-122EG



e

2.12 pav. Eksperimentiškai ir teoriškai gautos kreivės skirtingiems MR skysčiams: a – MRF-140CG, b – MRHCCS4-B, c – MRHCCS4-A, d – MUDZH-3, e – MRF-122EG.

Kadangi eksperimentiniu būdu tiesiogiai sedimentacijos laipsnio (dalelių koncentracijos matuojamoje skysčio dalyje) skysčiuose pamatuoti nebuvo įmanoma, pasirinkau trečiame skyriuje aprašytą netiesioginį elektrinės varžos matavimo, veikiant skystį magnetiniu lauku, būdą. Pilnai nusėdusio skysčio elektrinė varža buvo pasirinkta kaip atskaitos taškas (didžiausia varžos reikšmė). Imame, kad šiame taške yra didžiausia dalelių koncentracija, kadangi matuojamoje skysčio vietoje praktiškai visos dalelės būna nusėdę. Varžos pokytis ΔR yra gaunamas iš kiekvieno pilnai nusėdusio skysčio varžos atimant varžą, kuri išmatuota praėjus tam tikram dienų skaičiui. Taip netiesiogiai gaunama dalelių koncentracija (nusėdimas). Visų penkių skysčių varžos pokyčių priklausomybės nuo laiko (per kurį vyko sedimentacija) taip pat pavaizduota (**2.9 pav.**).

Nors teorinės ir eksperimentinės kreivių reikšmės skiriasi gana smarkiai, tačiau kreivių pobūdis yra labai panašus. Buvo gauti šių kreivių kiekvienam skysčiui atskirai koreliacijos koeficientai. Skysčiui MRF-140CG šis koeficientas yra 0,970326, MRF-122EG – 0,970326, MRHCCS4-A – 0,953146, MRHCCS4-B – 0,957598, MUDZH-3 – 0,954029. Kaip matome iš gautų rezultatų, teoriniai skaičiavimai ir eksperimentiniai rezultatai yra priklausomi vienas nuo kito.

2.8. Skyriaus apibendrinimas

Matematiškai aprašytas dalelių judėjimas MR skystyje kai jos yra indo viduryje arba prie sienelės. Nustatyta, kad kuo dalelė yra arčiau nejudamo indo sienelės, tuo jos greitis yra mažesnis dėl trinties jėgų. Taip pat sukurtas matematinis modelis, kai neriboto ilgio, vienos dalelės skersmens begalinė juosta yra virpinama harmoniniais virpesiais. Aprašytos tangentinės jėgos stacionari ir dinaminė dedamosios, kurios susidaro skystį veikiant virpesiais. Siekiant gauti kuo tikslesnius rezultatus aprašytos pirmos dvi aproksimacijos. Šios jėgos apskaičiuotos visiems penkiems vėliau darbe eksperimentiškai tirtiems skysčiams. Taip pat apjungus dvi teorijas – varžos matavimo kintant magnetiniam laukui bei sedimentacijos laipsnio nustatymo, išvesta varžos priklausomybės nuo sedimentacijos laipsnio formulė. Ji parodo, kaip kinta varža kai skystyje dalelės sėda ir vyksta sedimentacija. Iškelta teorija ir dėl atgalinio tekėjimo jėgos, kuri nors ir maža, tačiau privalo susidaryti dalelėms skystyje sėdant ir išstumiant po jomis esantį nešantįjį skystį. Šis skystis indo apačioje atsitrenkia į indo dugną ir sukuria priešinga sėdimui kryptimi nukreiptą jėgą. Pateikta ir patobulinta atgalinio tekėjimo teorija, kai atstumas r_2 apibrėžia ne atstumą iki nejudamos sienelės, bet atstumą tarp dviejų dalelių (dalelių koncentraciją). Vėliau eksperimentų būdu bus bandoma patvirtinti sukurtą matematinį modelį. Kadangi nėra galimybių tiesiogiai eksperimentiškai nustatyti dalelių nusėdimo (koncentracijos) MR skystyje, bus pasirinktas netiesioginis metodas – matuojant magnetiniu lauku paveikto MR skysčio varžą. Palygintos teoriškai bei eksperimentiškai gautos kreivės. Jų pobūdis yra labai panašus, o koreliacijos koeficientai visiems penkiems tirtiems skysčiams yra daugiau nei 0,95, kas parodo, kad teoriniai skaičiavimai ir eksperimentiniai rezultatai yra priklausomi vienas nuo kito.

3. SKIRTINGŲ MAGNETOREOLOGINIŲ SKYSČIŲ SEDIMENTACIJOS NUSTATYMO EKSPERIMENTINIS TYRIMAS

Šiame skyriuje bandoma eksperimentais patvirtinti sukurta matematinį modelį. Jame pateikiami penkių skirtingų skysčių tyrimai reometru, įmagnetinimo kreivės, nuotraukos mikroskopu, bei jutiklio elektrinei varžai matuoti kūrimo eiga. Su šiuo jutikliu atlikti sedimentacijos nustatymo eksperimentiniai tyrimai matuojant elektrinę varžą MR skystį veikiant magnetiniu lauku. Atlikti eksperimentiniai sedimentacijos nustatymo matuojant ritės induktyvumą bandymai.

3.1. Eksperimentiniams tyrimams naudoti magnetoreologiniai skysčiai

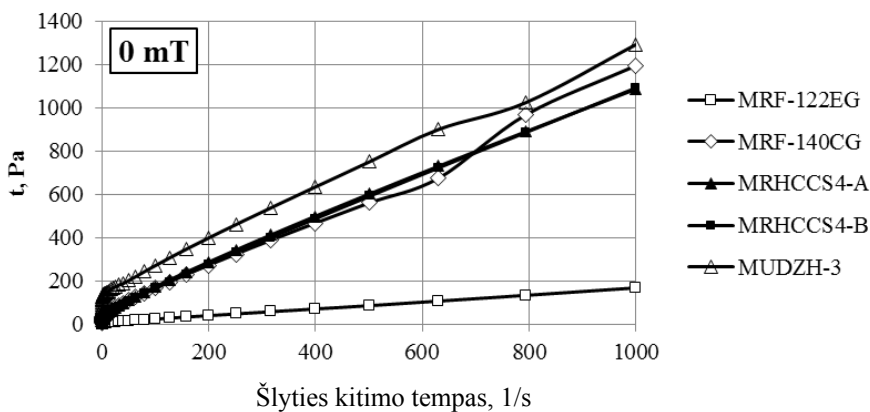
Eksperimentinių bandymų metu buvo ištirti 5 skirtingi magnetoreologiniai skysčiai: MRF-140CG ir MRF-122EG pagaminti kompanijoje „Lord“ , JAV, taip pat MRHCCS4-A ir MRHCCS4-B pagaminti kompanijos „Liquids research company“, JK ir magnetoreologinis skystis МУДЖ-3 pagamintas A.V. Luikovo šilumos ir masės mainų institute, Minske, Baltarusijoje. Šių skysčių dalelių koncentracijos pateiktos 3.1 lentelėje [54,70]:

3.1 lentelė. Dalelių koncentracija skirtinguose magnetoreologiniuose skysčiuose.

MR Skystis	Dalelių koncentracija	Gamintojas
MRF-140CG	85 %	Lord, JAV
MRF-122EG	72 %	Lord, JAV
MRHCCS4-A	70 %	Liquids Research Limited, JK
MRHCCS4-B	80 %	Liquids Research Limited, JK
MUDZH-3	71 %	A.V.Luikovo institutas, BY

3.2. Eksperimentinis magnetoreologinių skysčių tyrimas reometru

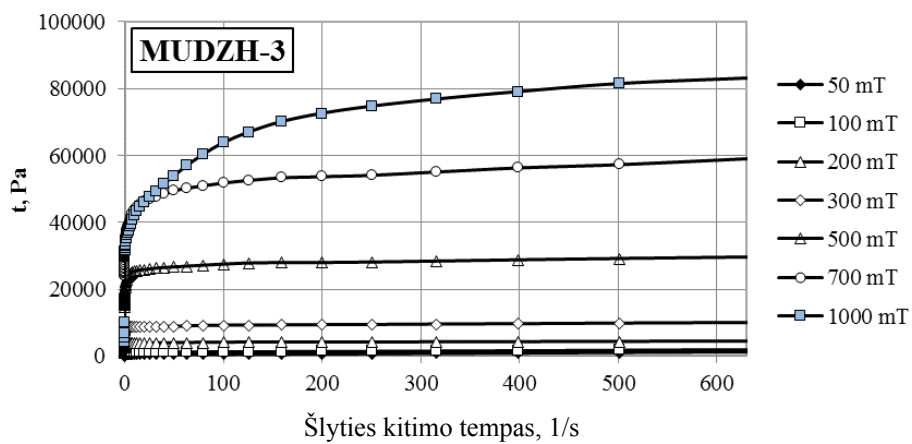
Šlyties įtempių τ priklausomybė nuo šlyties kitimo tempo buvo išmatuota reometru be magnetinio lauko. Rezultatai pateikti (3.1 pav.)



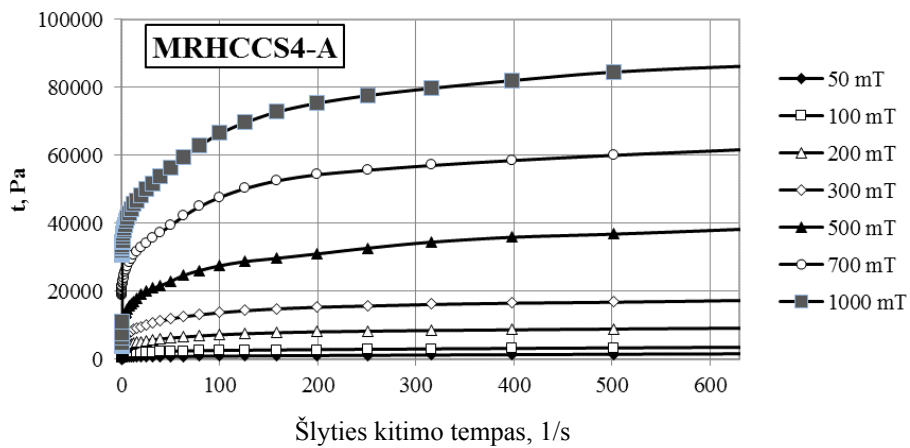
3.1 pav. Šlyties įtempių priklausomybė nuo šlyties kitimo tempo neveikiant magnetiniam laukui

Iš gautų priklausomybių matome, kad didžiausi šlyties įtempiai neveikiant magnetiniu lauku yra skysčio MUDZH-3. Abiejų Liquids Research kompanijoje pagamintų skysčių šlyties įtempiai buvo praktiškai vienodi. Magnetoreologinio skysčio MRF-122EG šlyties įtempiai yra žymiai mažesni nei kitų skysčių. Taip galėjo nutikti dėl įdėtų į skystį priemaišų, o taip pat gali būti ir dėl to, kad dėl jo dalelių koncentracijos, kadangi ji yra mažesnė nei skysčio MRF-140CG, o šio skysčio šlyties įtempiai yra pastebimai didesni. Skysčių šlyties įtempiai, kai jie neveikiami magnetiniu lauku, yra labai svarbus parametras, kai šie skysčiai turi būti naudojami tikruose įtaisuose. Naudojant šį skystį yra geriausia, kai magnetoreologinio skysčio šlyties įtempiai neveikiant jo magnetiniu lauku yra kuo mažesni, kadangi tai gali turėti įtakos mechanizmo, dirbančio šio skysčio pagrindu, efektyvumui. Idealiu atveju, darbinio magnetoreologinio skysčio šlyties įtempiai turėtų būti kuo mažesni, kai jis yra neveikiamas magnetiniu lauku, ir kuo didesni kai jis yra veikiamas magnetiniu lauku, tačiau tai labai sunku pasiekti. Dažniausiai tai būna skirtingi skysčiai, pritaikyti būtent reikiamam mechanizmui.

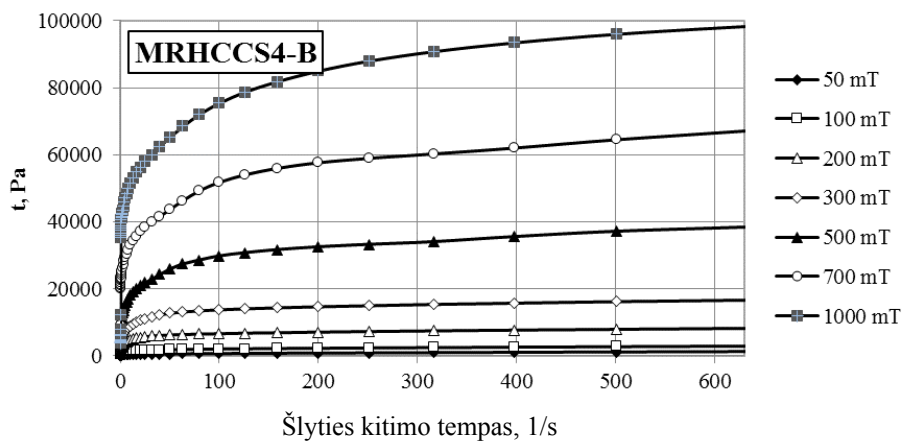
Šlyties įtempių priklausomybė nuo šlyties kitimo tempo buvo išmatuota skysčius veikiant 0 – 1 T magnetiniu lauku. Rezultatai pateikti (3.2 pav.).



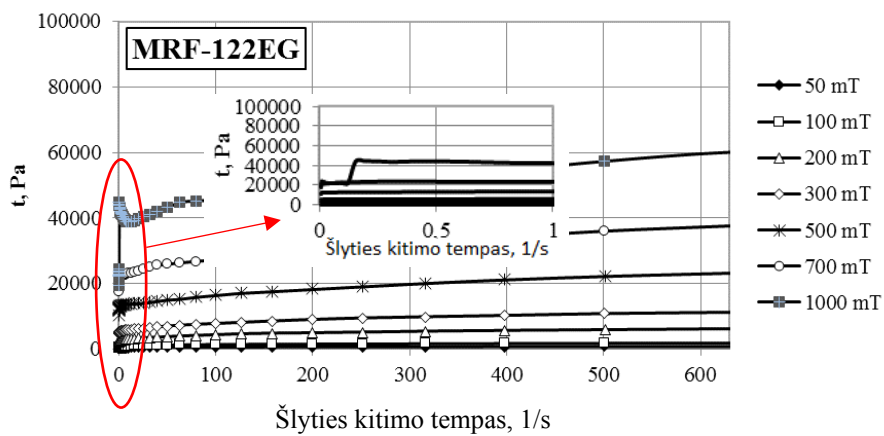
a



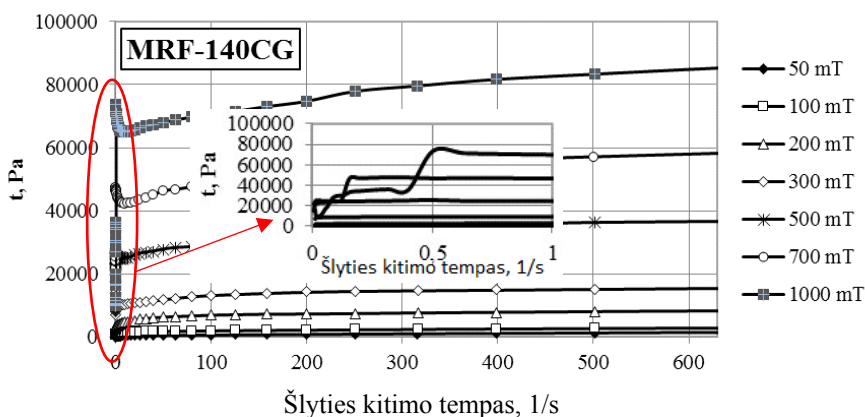
b



c



d



e

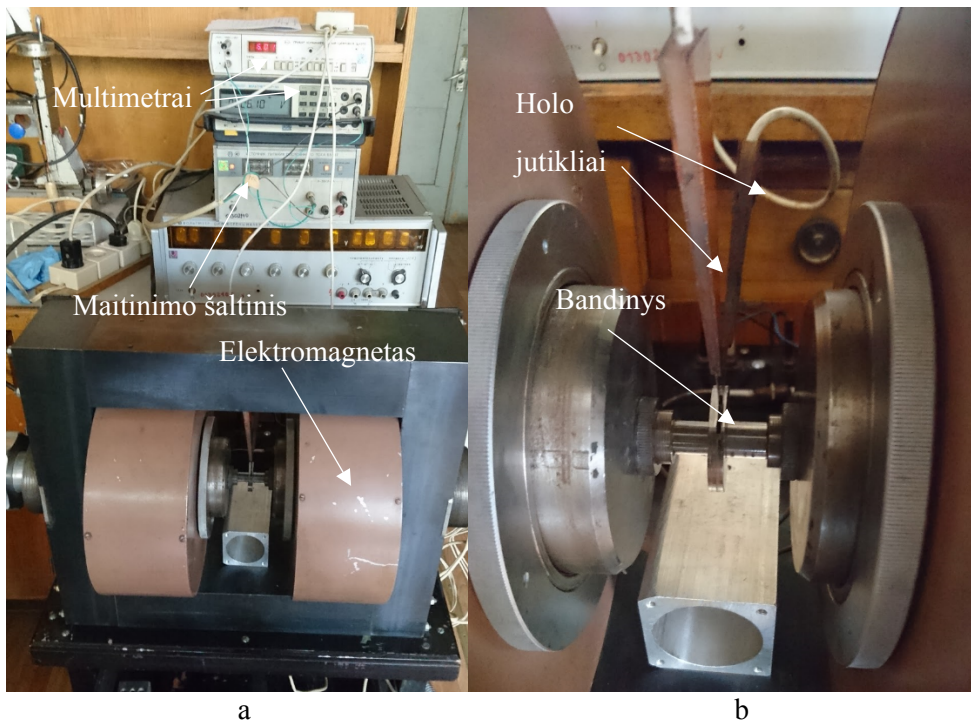
3.2 pav. Šlyties įtempių priklausomybė nuo šlyties kitimo tempo veikiant MR skysčius 0 – 1 T magnetiniu lauku: a) MUDZH-3, b) MRHCCS4-A, c) MRHCCS4-B, d) MRF122-EG, e) MRF-140CG

Kai tiriami magnetoreologiniai skysčiai buvo veikiami mažu magnetiniu lauku (mažesniu nei 500 mT) visų jų šlyties įtempiai buvo panašūs. Kai skysčiai buvo veikiami 500 mT magnetiniu lauku, esant dideliame šlyties kitimo tempui (apie 600 1/s) abiejų Liquids research kompanijos gaminamų skysčių bei MRF-140CG skysčio šlyties įtempiai buvo apie 40 000 Pa. Skysčio MUDZH-3 šlyties įtempiai buvo šiek tiek mažesni nei 30 000 Pa, o skysčio MRF-122EG – tik šiek tiek mažesni nei 20 000 Pa. Kai skysčiai buvo veikiami 700 mT magnetiniu lauku, esant dideliame šlyties kitimo tempui (500 – 600 1/s) magnetoreologinių skysčių MRF-140CG ir MUDZH-3 šlyties įtempiai buvo praktiškai vienodi – apie 60 000 Pa. Skysčio MRHCCS4-B šlyties įtempiai buvo didesni nei MRHCCS4-A skysčio (68 000 Pa ir 61 000 Pa). Skysčio MRF-122EG šlyties įtempiai buvo mažesni nei visų kitų (mažiau nei 40 000 Pa). Kai buvo nustatytas didžiausias įrangos galimas magnetinis laukas (1 T), didžiausi šlyties įtempiai buvo skysčio MRHCCS4-B (beveik 100 000 Pa). Skysčio MRF-122EG šlyties įtempiai buvo pati mažiausi – tik apie 60 000 Pa. Kitų trijų tirtų skysčių šlyties įtempiai buvo praktiškai vienodi (apie 85 000 Pa). Taip pat kai šlyties kitimo greitis buvo labai mažas (mažesnis nei 1) Lord kompanijos gaminamų skysčių šlyties įtempiai staigiai išaugdavo prie stipresnio magnetinio lauko (didesnio nei 700 mT). Taip galėjo nutikti dėl to, kad reometro jutiklis galėjo praslysti. Analizuojant gautus rezultatus galime daryti išvadą, kad geriausias skystis, kai yra naudojamas veikiant jį magnetiniu lauku yra MRHCCS4-B, prasčiausias pagal šį kriterijų – MRF-122EG. Šio skysčio šlyties įtempiai ir veikiant jį magnetiniu lauku, ir kai jis nebuvo veikiamas magnetiniu lauku yra patys mažiausi iš visų matuotų skysčių. Kiti mokslininkai taip pat yra naudoję reometrą magnetoreologinių skysčių tyrimui, tačiau rezultatai gauti šiame darbe skiriasi nuo jų [71,72]. Šiame darbe naudotų magnetoreologinių skysčių dalelių koncentracija yra palyginti labai didelė (apie 70 – 85 % tūrio), taigi jų šlyties įtempiai taip pat yra didesni. Literatūroje yra aprašomi ir

kitokios konstrukcijos reometrai [73,74], tačiau šiame darbe naudotas reometras Anton Paar Physica MCR-301 turi daug papildomų funkcijų, yra naujas ir matavimus atlieka patikimai.

3.3. Magnetoreologinių skysčių įmagnetinimo charakteristikų tyrimai

Buvo atliktas eksperimentinis tyrimas norint gauti eksperimentinę $B - H$ (3.4 pav.) ir $J - H$ (3.5 pav.) kreives trijų tiriamųjų magnetoreologinių skysčių. Lord kompanijos pagamintų skysčių šios charakteristikos yra pateiktos internete, taip pat jas savo disertacijoje tyrė Viktorija Mačiukienė (Įrenginio, skirto magnetoreologinių skysčių parametrų nustatymui, sukūrimas ir tyrimas). Eksperimentui atlikti panaudotas magnetinių savybių matavimo įrenginys (3.3 pav., a), kuriame yra du Holo jutikliai (3.3 pav., b). Holo reiškiniu esmė yra ta, kad laidininke, kuriuo teka srovė, sudarius magnetinį lauką, kurio magnetinė indukcija B statmena srovės tankio vektoriui j , atsiranda skersinis elektros laukas. Jo stiprumo vektorius EH yra statmenas vektoriams j ir B . Reiškinyje paremtas judančių elektros krūvių sąveika su išoriniu magnetiniu lauku. Kai elektros krūvis q juda greičiu v magnetiniame lauke, jį pradeda veikti Lorencio magnetinė jėga.



3.3 pav. Magnetinių savybių matavimo įrenginys: a – bendras vaizdas; b – naudoti 2 Holo jutikliai

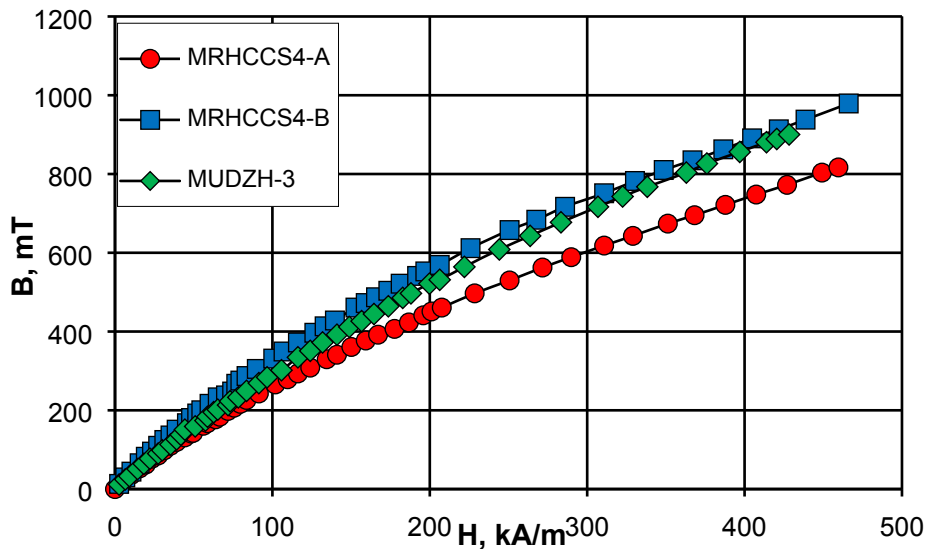
Dviejų tiriamųjų skysčių įmagnetinimo kreivės buvo gautos iš matavimų su dviem Holo jutikliais. Magnetinio lauko indukcija B_0 ore yra išmatuojama su Holo jutikliu. Magnetinio lauko stipris yra apskaičiuojamas:

$$H=B_0/\mu_0 \text{ (išorinis laukas),} \quad (3.1)$$

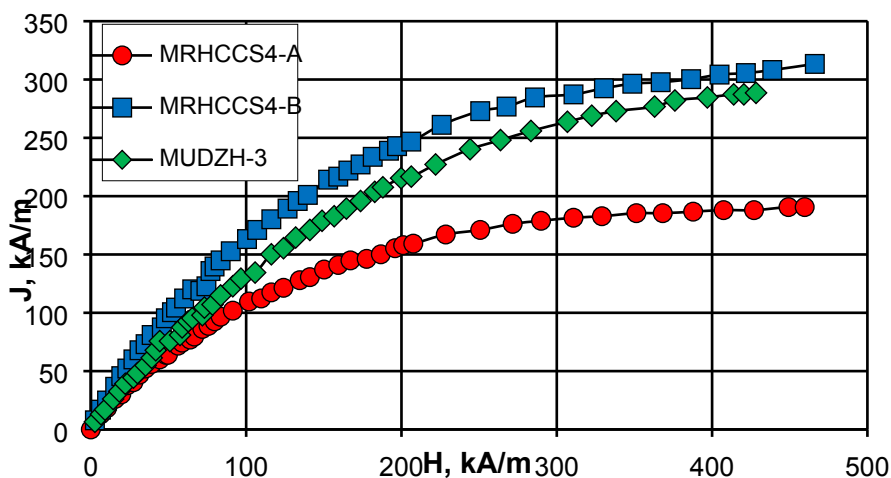
kur, $\mu_0=4\pi\cdot 10^{-7}$ H/m magnetinė skvarba vakuume jos dydis nekintantis, konstanta, Pirmasis Holo jutiklis išmatuoja tiriamojo magnetoreologinio skysčio magnetinę indukciją B (vidinis laukas). Magnetoreologinio skysčio magnetinė indukcija B yra didesnė už oro magnetinę indukciją B_0 . Magnetinio lauko indukcija magnetoreologiniame skystyje apskaičiuojama:

$$B = \mu_0(J+H) \text{ (vidinis laukas),} \quad (3.2)$$

kur, J – įmagnetėjimas.



3.4 pav. Eksperimentinė tirtų magnetoreologinių skysčių $B - H$ kreivė



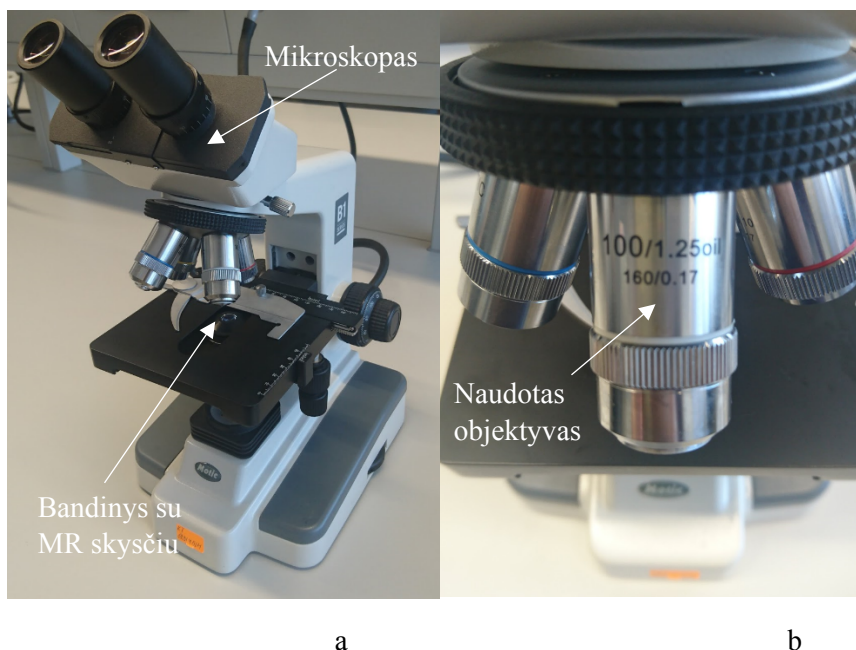
3.5 pav. Eksperimentinė tirtų magnetoreologinių skysčių J – H kreivė

Dėl tiriamojo skysčio indo geometrijos, kai jo ilgis yra daug kartų didesnis, magnetinių laukų išsikraipymas yra neįmanomas. Tuomet, kai turime $\mu_0 H$ iš jutiklių galima nustatyti įmagnetėjimą:

$$J = (\mu - 1)H \text{ arba } B = \mu_0 \mu H, \quad (3.3)$$

3.4. Magnetoreologinių skysčių tyrimas mikroskopu

Siekiant ištirti dalelių formą bei jų dydį, mikroskopo Motic B1-220 A pagalba buvo nufotografuoti visi 5 skysčiai. Mikroskopo bendras vaizdas pateiktas (3.6 pav, a). Kad gauti kuo tikslesnį dalelių vaizdą, buvo pasirinktas 100 kartų didinimas (3.6 pav, b).



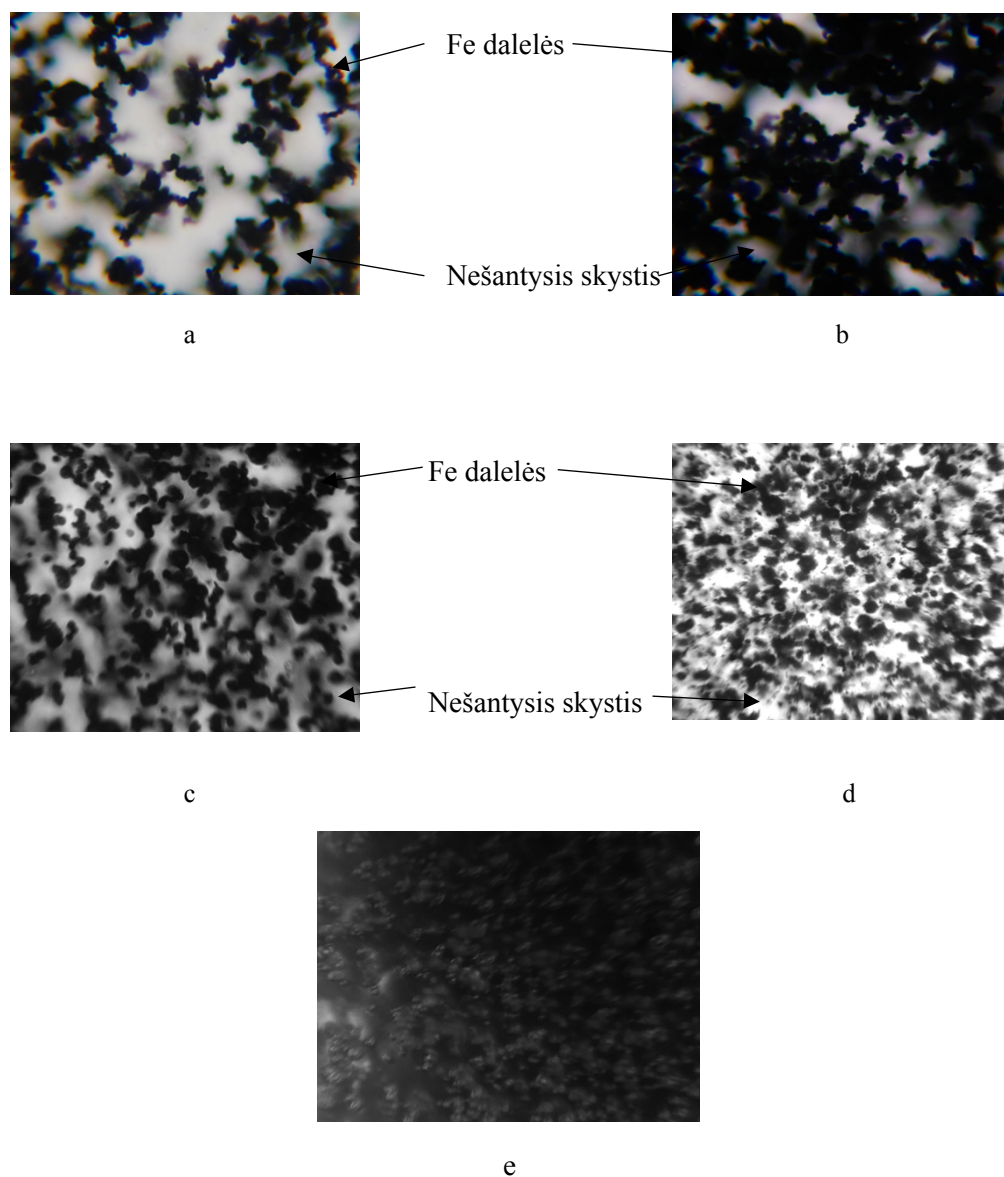
3.6 pav. Mikroskopo bendras vaizdas (a) ir naudotas lęšis padidinimui (b)

Šio mikroskopo pagrindiniai parametrai pateikti 3.2 lentelėje [75].

3.2 lentelė. Mikroskopo B1-220A specifikacija

B1-220A specifikacija	
Optinė sistema	Baigtinė optinė sistema, 160 mm
Stebėjimo anga	Binokulinė, stumdomo tipo
Palinkimas	45 laipsniais, 360 laipsnių aplink
Okuliaras	WF 10X / 18 mm
Fokusavimo tikslumas	2 μ m minimalus padėjimas
Ilgis x plotis x aukštis	245 x 190 x 380 mm
Masė	6.8 kg

Gautos visų 5 tirtų skysčių dalelių nuotraukos (3.7 pav. a, b, c, d, e). Abiejų JK pagamintų skysčių MRHCCS4-A ir MRHCCS4-B dalelės yra daugumoje apvalios ir pagal mastelį apie 5 – 7 mikrometrų skersmens. Kompanijos Lord gaminamo skysčio MRF-140CG dalelės šiek tiek didesnės nei prieš tai minimų skysčių, taip pat ne visai aiškos formos. Skysčio MRF-122EG pamatyti nepavyko. Greičiausiai taip yra todėl, kad yra naudojama daug tepalo, kurio burbuliukai ir matomi per mikroskopą. Taip pat jo dalelių koncentracija yra mažesnė nei kitų tirtų skysčių.



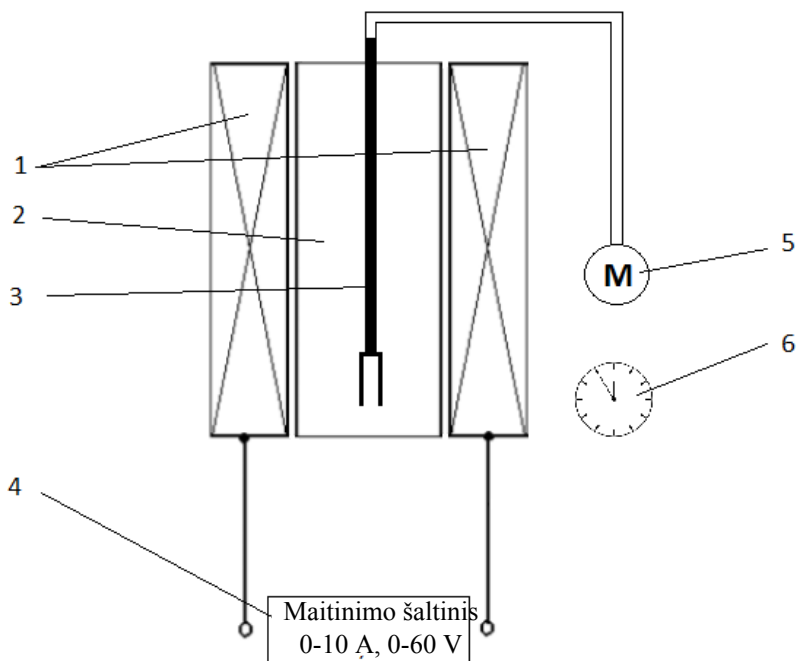
3.7 pav. Mikroskopu gautos MRF nuotraukos: a – MRF-140CG, b – MRHCCS4-A, c – MRHCCS4-B, d – MUDZH-3, e – MRF-122EG

Skysčio pagaminto Baltarusijoje – MUDZH-3 nuotraukoje (**3.7 pav., d**) matome, kad jo dalelės yra didžiausios iš visų tirtų skysčių bei taip pat daugumoje apvalios formos.

3.5. Elektrinės varžos matavimo magnetoreologiniuose skysčiuose jutiklio sukūrimas

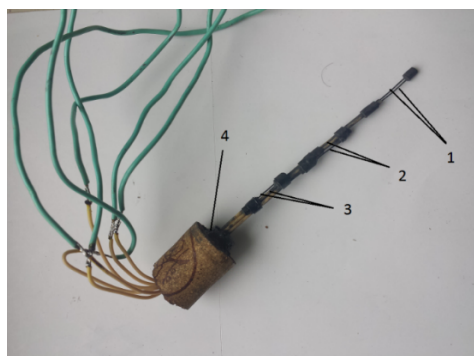
Sedimentacijos laipsniui magnetoreologiniuose skysčiuose nustatyti buvo sukurtas jutiklis, kuris gali pamatuoti magnetiniu lauku paveikto magnetoreologinio skysčio elektrinę varžą, kuri kinta priklausomai nuo dalelių sedimentacijos.

Tyrimams atlikti buvo sukonstruotas bandymų stendas (3.8 pav.). Mėgintuvėlis 2 su magnetoreologiniu skysčiu, buvo patalpintas į ritės 1 vidų, kuriai suteikus įtampą maitinimo šaltiniu 4, susidaro magnetinis laukas. Į skystį įmerkiamas varžos matavimo jutiklis 3, kurio kontaktai pajungiami prie megaoometro 5, kuriuo po laikmačiu 6 nustatyto laiko tarpo (20 sekundžių) nuo magnetinio lauko įjungimo, išmatuojama varža.

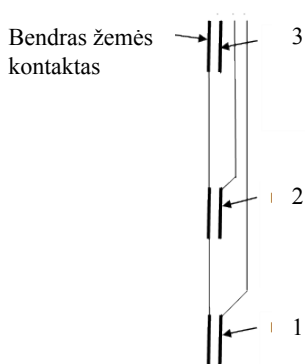


3.8 pav. Bandymų stendas: 1 – magnetinė ritė, 2 – mėgintuvėlis su MR skysčiu, 3 – varžos matavimo jutiklis, 4 – maitinimo šaltinis, 5 – megaoometras, 6 – laikmatis

Eksperimentui buvo sukurti 2 skirtingi jutikliai. Pirmajame jutiklyje elektrodai buvo išdėstyti trijose pozicijose, kad galima būtų pamatuoti indo viršuje, vidurinėje jo dalyje bei apačioje. Atstumas tarp elektrodų 1 mm. Šio jutiklio nuotrauka pateikta (3.9 pav.)



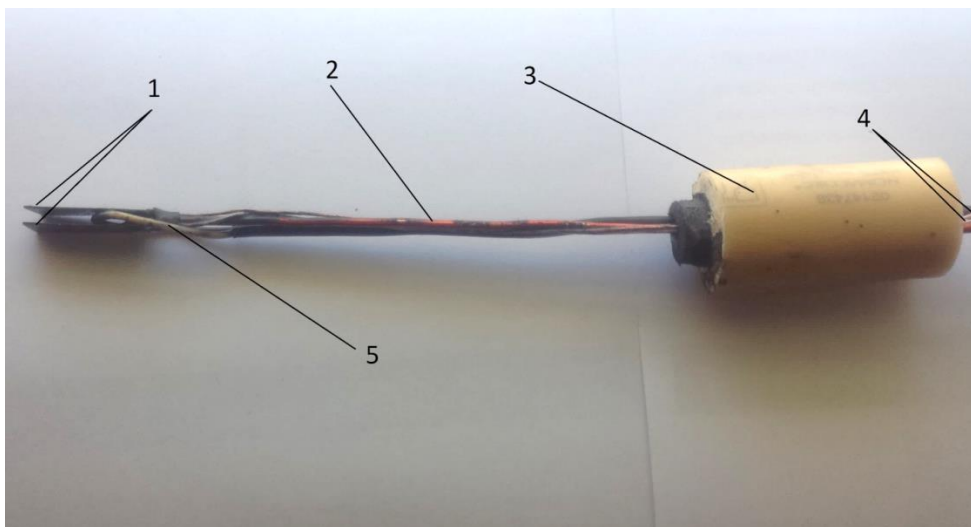
a



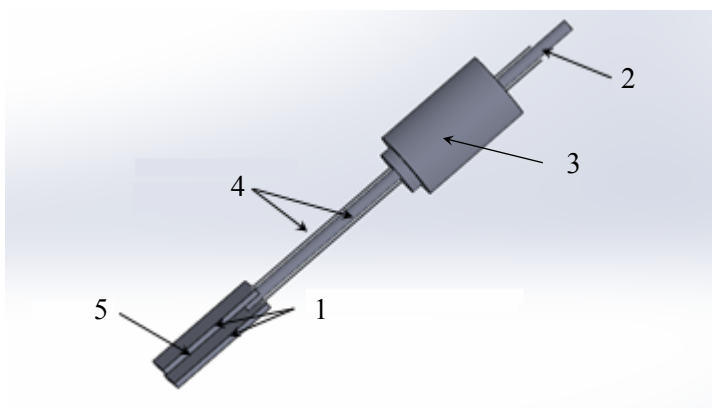
b

3.9 pav. Jutiklis skysčio varžai matuoti: a – bendras vaizdas, b – elektrinė schema; 1 – apatinės dalies kontaktai matavimui, 2 – vidurinėsios dalies kontaktai, 3 – viršutinės (nusėdusios) dalies kontaktai, 4 – kamštis jutiklio prilaikymui

Norint gauti tikslesnius rezultatus, sukonstruotas dar vieno tipo jutiklis. Jo bendras vaizdas pateikiamas (**3.10 pav.**). Šio jutiklio esmė yra plokštelių nuvalymo įtaisas 5. Kad perstūmę jutiklį į kitą padėtį žinotume, jog jame tikrai matuojame būtent toje vietoje esančio skysčio varžą, šiuo įtaisu 5 kartus prieš matuojant buvo išvalomas jutiklis. Tam, kad nereikėtų bandymų metu jutiklio ištraukinėti iš skysčio, abiem skysčiams pagaminta po identišką jutiklį.



a



b

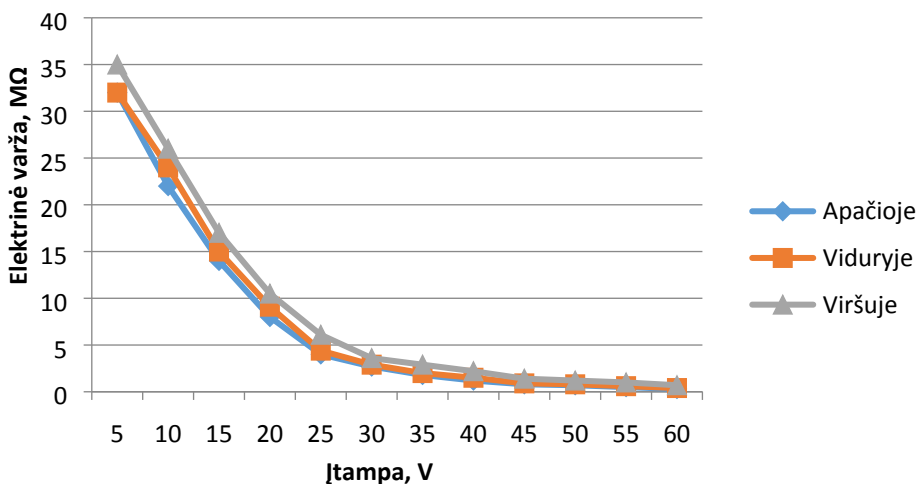
3.10 pav. a – keičiamo aukščio varžos matavimo jutiklis su plokštelių nuvalymo įtaisu, b – šio jutiklio sukurtas kompiuterinis modelis; 1 – kontaktinės plokštelės, 2 – stovėlis, 3 – kamštis, 4 – kontaktiniai laidai, 5 – plokštelių nuvalymo įtaisas

Šiais jutikliais buvo išmatuota abiejų skysčių varža. Matavimai atlikti skysti pilnai išmaišius, po vienos savaitės bei po dviejų savaičių. Pilnai išmaišyto magnetoreologinio skysčio MRF-140CG varžos priklausomybė keičiant magnetinės ritės įtampą pavaizduota (**3.11 pav.**), o skysčio MRF-122EG – (**3.12 pav.**)

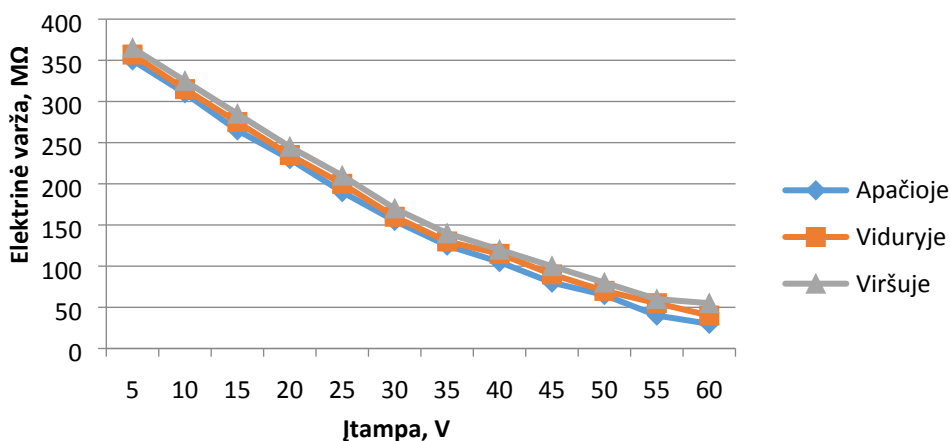
Magnetinio lauko stipris buvo reguliuojamas paduodant skirtingą maitinimo šaltinio įtampą. Magnetinio lauko priklausomybė nuo maitinimo įtampos pateikta 3.3 lentelėje:

3.3 lentelė. Magnetinio lauko stipriai prie skirtingų įtampų

U, V	5	10	15	20	25	30
B, A/m	7245	14491	21736	28982	36227	43473
U, V	35	40	45	50	55	60
B, A/m	50718	57964	65209	72454	79700	86945

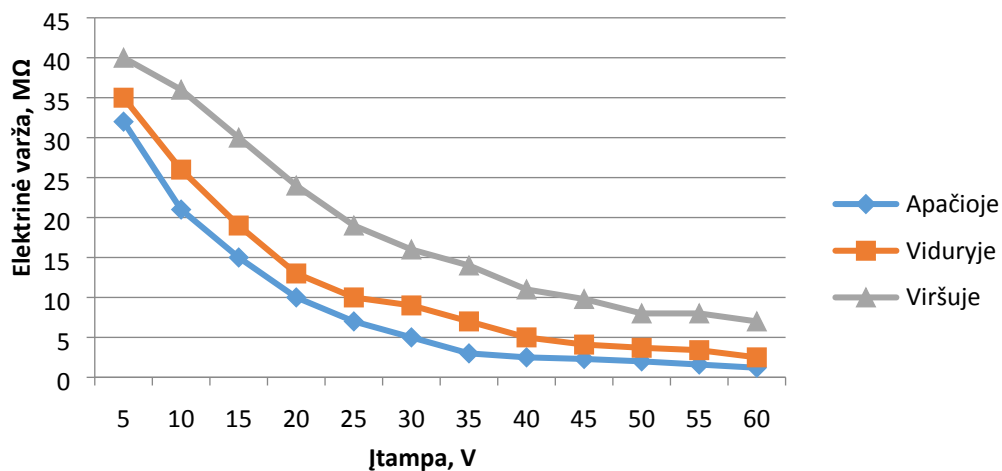


3.11 pav. Elektrinės varžos priklausomybė nuo maitinimo įtampos (magnetinio lauko), kai matuojamas išmaišytas MRF-140CG skystis jutikliu su valymo įtaisu

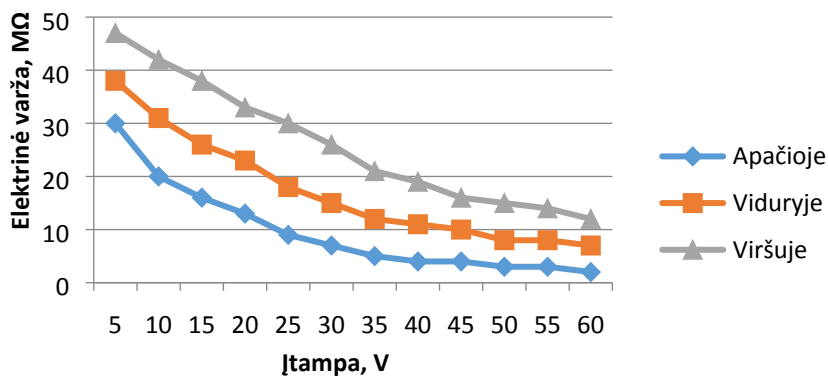


3.12 pav. Elektrinės varžos priklausomybė nuo maitinimo įtampos (magnetinio lauko), kai matuojamas išmaišytas MRF-122EG skystis jutikliu su valymo įtaisu

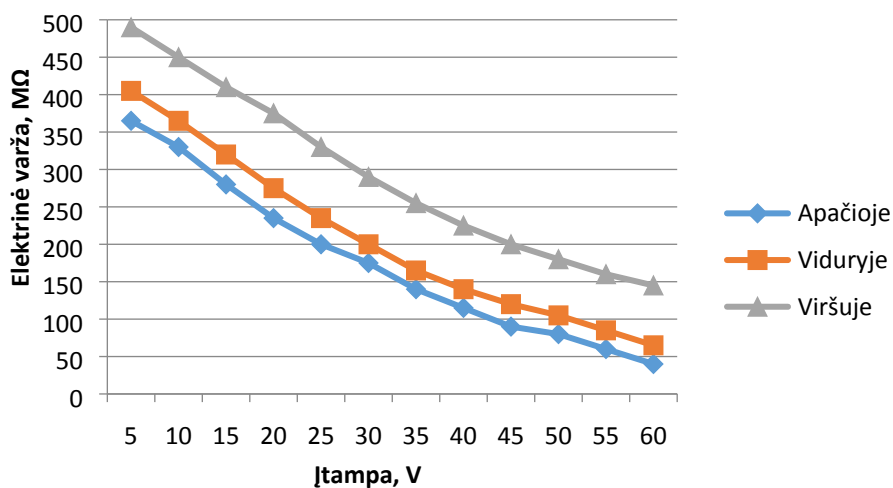
Po šių bandymų abu magnetoreologiniai skysčiai buvo palikti nusėsti. Po savaitės ir dviejų savaitių vėl atlikti analogiški matavimai tais pačiais jutikliais, tokiomis pačiomis sąlygomis. Nusistovėjusio skysčio MRF-140CG varžos priklausomybė nuo įtampos po vienos savaitės pavaizduota (**3.13 pav.**), po dviejų – (**3.14 pav.**) Skysčio MRF-122EG priklausomybės po vienos savaitės pavaizduotos (**3.15 pav.**), po dviejų savaitių – (**3.16 pav.**)



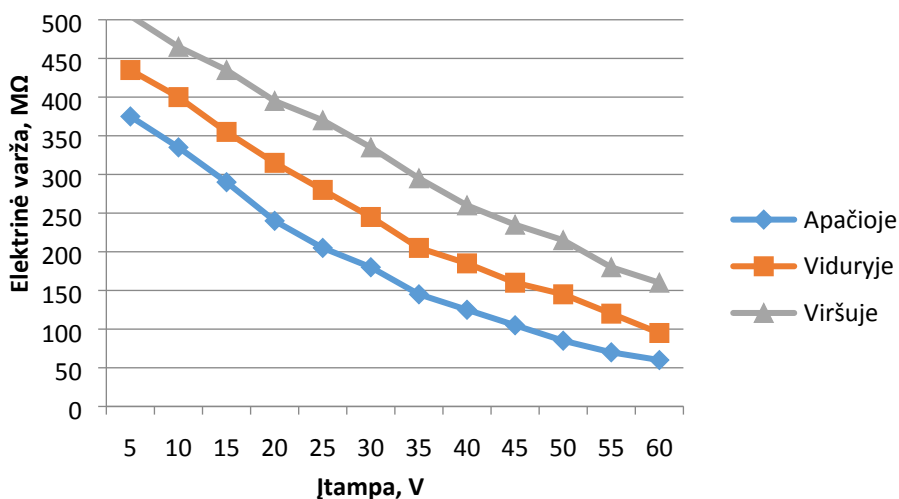
3.13 pav. Elektrinės varžos priklausomybė nuo maitinimo įtamos (magnetinio lauko), kai jutiklius su valymo įtaisais matuojamas per vieną savaitę nusėdęs MRF-140CG skystis



3.14 pav. Elektrinės varžos priklausomybė nuo maitinimo įtamos (magnetinio lauko), kai jutiklius su valymo įtaisais matuojamas per dvi savaites nusėdęs MRF-140CG skystis



3.15 pav. Elektrinės varžos priklausomybė nuo maitinimo įtampos (magnetinio lauko), kai jutikliu su valymo įtaisu matuojamas per vieną savaitę nusėdęs MRF-122EG skystis

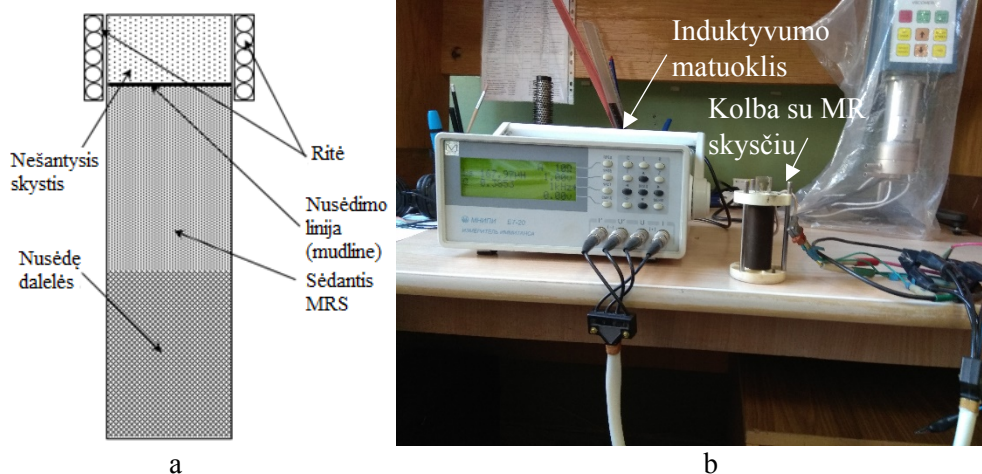


3.16 pav. Elektrinės varžos priklausomybė nuo maitinimo įtampos (magnetinio lauko), kai jutikliu su valymo įtaisu matuojamas per dvi savaites nusėdęs MRF-122EG skystis

Kaip matome iš gautų grafikų, nusėdusio skysčio varžos visuose trijuose sluoksniuose skirasi labiau nei pilnai išmaišytame skystyje.

3.6. Sedimentacijos nustatymas magnetoreologiniuose skysčiuose matuojant ritės magnetinę indukciją

Eksperimentinio stendo (3.17 pav., b) sedimentacijos nustatymui matuojant ritės, kurios viduje yra MR skystis, magnetinę indukciją, principinė schema pateikta (3.17 pav., a).

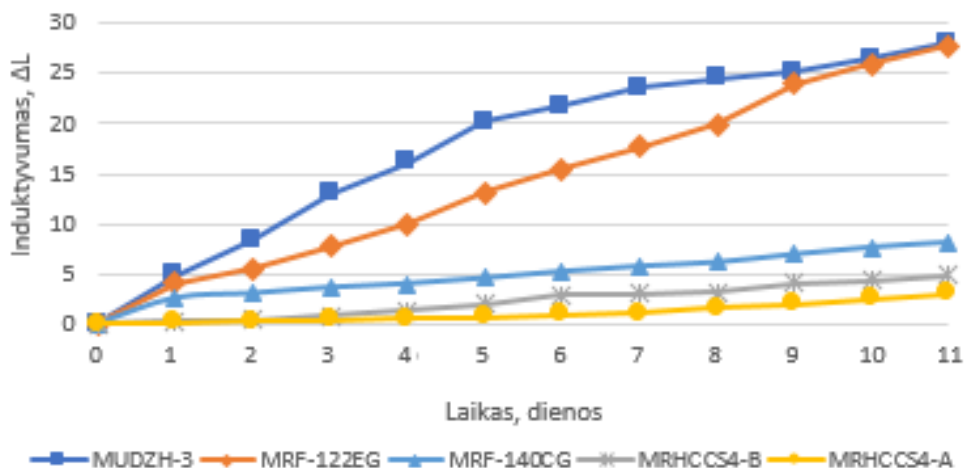


3.17 pav. Sedimentacijos nustatymas matuojant ritės magnetinę indukciją: a – principinė schema: MRS esantis stiklinėje kolboje, kuri patalpinta į matuojamąją ritę, b – eksperimentinis stendas

(3.17 pav., a) pavaizduotas induktyvumo matavimo įrenginio veikimo principas. Įrenginys sukurtas A.V. Luikovo šilumos ir masės mainų institute, Minske, Baltarusijoje [76]. MRS esantis stiklinėje kolboje yra patalpintas į matavimo ritę. MR skysčio mėgintuvėlyje viršutinė dalis yra sutapatinama su ritės pradžia. Kadangi MR skysčio dalelės sėda, tik maža jų dalis lieka viršutiniame sluoksnyje, taigi ten lieka praktiškai vien tik nešantysis skystis. Schemoje taip pat yra pažymėta nusėdimo linija, kuri skiria besėdantį skystį nuo viršuje esančio nešančiojo skysčio su labai mažai dalelių. Mėgintuvėlio apačioje yra jau nusėdusios MRS dalelės.

Buvo atliktas 5 skirtingų MR skysčių sedimentacijos nustatymas panaudojant šį metodą (MRF-140CG, MRF-122EG, iš Lord kompanijos, JAV, MRHCCS4-A ir MRHCCS4-B iš Liquids Research Company, JK ir MUDZH-3, pagamintas A.V. Luikovo šilumos ir masės mainų institute, Minske).

Naudojant šį metodą buvo eksperimentiškai nustatytas ritės induktyvumas. Skirtumas tarp „nulinio“ induktyvumo (pilnai išmaišyto skysčio ritės induktyvumo) ir eksperimento metu gauto induktyvumo buvo apskaičiuotas ir pažymėtas ΔL . Rezultatai pateikiami (3.18 pav.)

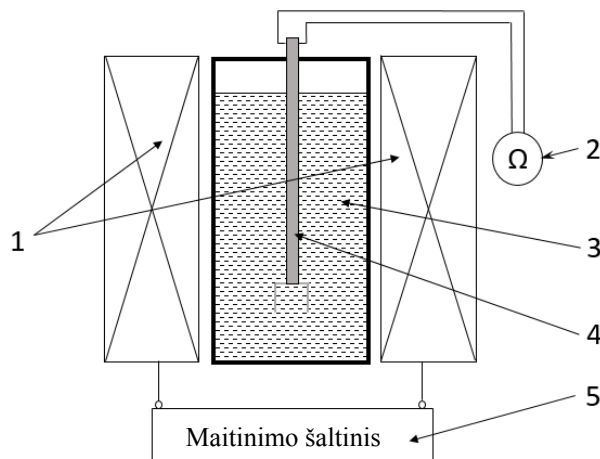


3.18 pav. Kiekvieno skysčio induktyvumo pokytis vykstant sedimentacijai

Skysčių MRF-122EG ir MUDZH-3 induktyvumo pokytis didesnis nei kitų ištirtų skysčių. JK pagaminti skysčiai turi praktiškai vienodą induktyvumo pokytį, tačiau naudojant šį metodą nustatyta, kad sedimentacijos lygis yra šiek tiek didesnis skystyje MRHCCS4-B. Taip pat skysčio MRF-140CG indukcijos pokytis yra didesnis nei Liquids Research co. skysčių, bet mažesnis nei MRF-122EG ir MUDZH-3.

3.7. Sedimentacijos nustatymas magnetoreologiniuose skysčiuose matuojant magnetiniu lauku paveiktų skysčių elektrinę varžą

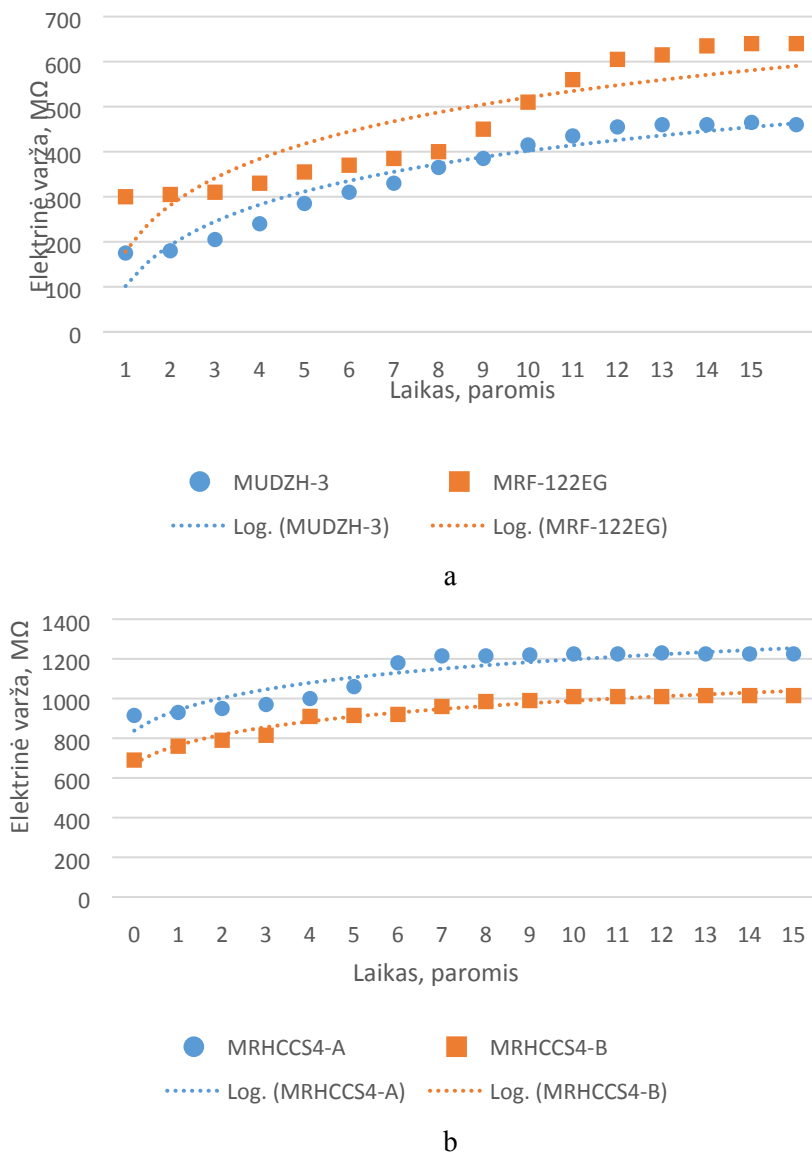
Principinė varžos matavimo MRS, veikiant jį magnetiniu lauku, eksperimento schema pateikta (3.19 pav.).

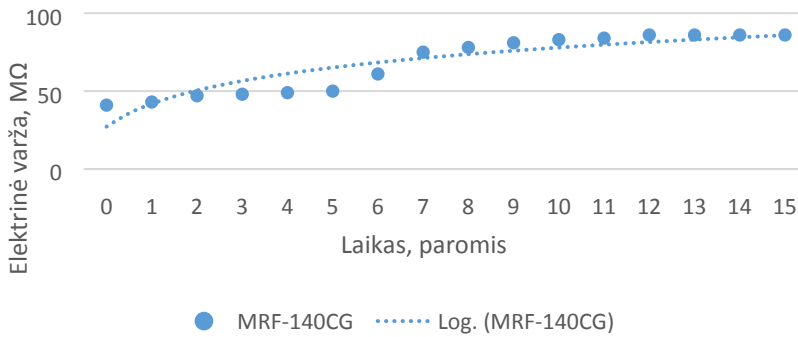


3.19 pav. Eksperimentinė schema: 1 – elektrinė ritė, 2 – ommetras, 3 – mėgintuvėlis su MR skysčiu, 4 – elektrinės varžos matavimo jutiklis, 5 – maitinimo šaltinis

Mėgintuvėlis su MR skysčiu 3 buvo patalpintas į elektrinę ritę 1, kuri buvo prijungta prie maitinimo šaltinio 5. Elektrinės varžos matavimo jutiklis 4 buvo patalpintas į mėgintuvėlį su MR skysčiu, kad būtų galima pamatuoti varžą. Jo kontaktai buvo prijungti prie ommetro 2. Skystis buvo paveiktas magnetiniu lauku. Varža buvo išmatuota panaudojant multimetrą PeakTech 2005, kuris gali matuoti varžą $0,1\Omega - 2\text{ G}\Omega$ ribose.

Visų penkių tirtų skysčių elektrinė varža buvo matuojama kasdien 15 dienų naudojant varžos matavimo metodą, kai magnetinio lauko stipris buvo 80kA/m. Rezultatai pateikiami (3.20 pav.).





c

3.20 pav. Elektrinė varža, kai magnetinio lauko stipris 80kA/m matuojama kasdien 11 dienų 5 MR skysčiams: a – MRF-122EG ir MUDZH-3, b – MRHCCS4-A ir MRHCCS4-B, c – MRF-140CG

MR skysčio MRF-140CG, kurio dalelių koncentracija didžiausia, išmatuota elektrinė varža laikui bėgant buvo mažiausia (40-90 MΩ). Skysčių MRF-122EG ir MUDZH-3 elektrinė varža buvo praktiškai vienoda. Skysčių MRHCCS4-A ir MRHCCS4-B elektrinė varža buvo didžiausia, palyginus su kitais MR skysčiais (700-1300 MΩ). Taip greičiausiai galėjo nutikti dėl Liquid Research co. naudojamų priemonių arba dalelės, naudojamos šiuose MR skysčiuose, yra mažiau laidžios elektrai. Procentaliai mažiausia sedimentacija buvo Liquid Research co skysčių. Ji buvo 4 kartus mažesnė nei Lord kompanijos skysčių ir 6 kartus mažesnė nei MUDZH-3 skysčio.

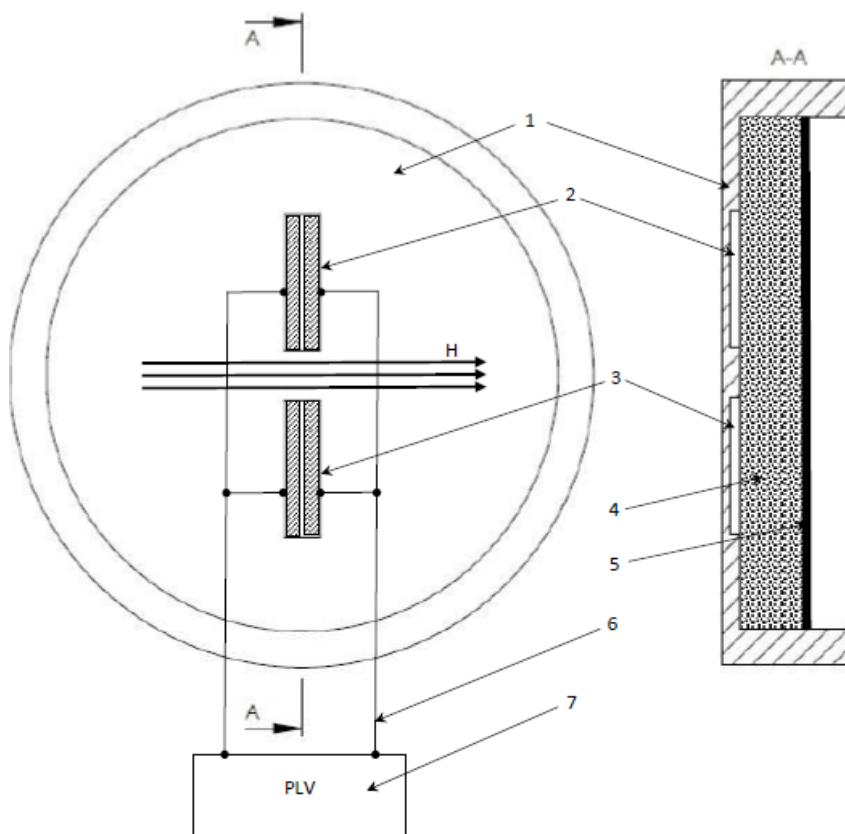
3.8. Skyriaus apibendrinimas

Eksperimentiniuose tyrimuose naudoti penki skirtingi MR skysčiai. Kadangi gamintojai duoda ne visas šių skysčių charakteristikas, norint juos pritaikyti realiame mechanizme reikėjo jas išmatuoti. Pirmiausia reometru buvo matuojama skysčių šlyties įtempiai esant magnetiniam laukui ir be jo, kadangi tai labai svarbi charakteristika, norint turėti geriausias darbinės įtaiso, veikiančio su MR skysčiu charakteristikas. Taip pat buvo išmatuotas šių skysčių įmagnetėjimas, gautos B-H ir J-H kreivės. Kadangi Lord skysčių aprašyme šios kreivės yra, buvo išmatuoti tik likę 3. Kad geriau būtų galima susipažinti su tiriamais skysčiais, jie buvo nufotografuoti mikroskopu. Pagal tai buvo galima nuspręsti apytikrius dalelių dydį bei formą. Kadangi buvo išsikeltas uždavinys sedimentacijai nustatyti, dėl to buvo sukurtas elektrinės varžos veikiant magnetiniam laukui matavimo jutiklis, kuris tyrimų eigoje buvo šiek tiek patobulintas. Šiuo sukurtu jutikliu buvo išmatuota visų trijų MR skysčių sedimentacija. Taip pat buvo panaudotas ir jau žinomas bei naudojamas metodas sedimentacijai nustatyti – matuojant ritės induktyvumą. Taip buvo patvirtintas sukurtas naujas metodas, kadangi visiems penkiems skysčiams šių metodų koreliacijos koeficientas buvo $>0,9$. Taip pat buvo atliekamas naujai sukurtų skysčių sedimentacijos greičio matavimas.

4. ĮRENGINIO MAGNETOREOLOGINIŲ SKYSČIŲ SEDIMENTACIJOS NUSTATYMOI SUKŪRIMAS IR JO DARBINIŲ CHARAKTERISTIKŲ NUSTATYMAS

4.1. Magnetoreologinių skysčių sedimentacijos nustatymo įrenginys

Sukurtame įrenginyje (4.1 pav.) matuojama magnetiniu lauku paveiktų magnetoreologinių skysčių elektrinė varža. Ji priklauso nuo šių parametrų: temperatūros, kiek laiko skystis veikiamas magnetiniu lauku, dalelių koncentracijos, magnetinio lauko stiprio, bei sedimentacijos laipsnio. Nesant magnetinio lauko, skysčio varža yra labai didelė (priklausomai nuo skysčio, gali siekti iki 600 MΩ). Varžai matuoti naudojama paprastas bei pigus jutiklis, susidedantis iš dviejų kontaktinių plokštelių, atskirtų ne daugiau nei 1 mm tarpeliu.



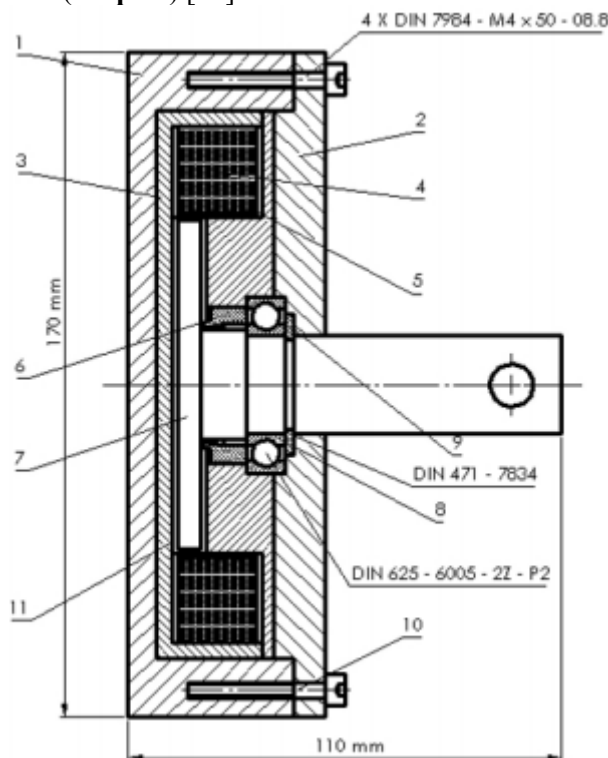
4.1 pav. Įrenginio, skirto magnetoreologinio skysčio sedimentacijai nustatyti, principinė schema ir A – A pjūvis: 1 – matuojamos konstrukcijos korpusas, 2 – viršutinis varžos matavimo jutiklis, 3 – apatinis varžos matavimo jutiklis, 4 – magnetoreologinis skystis, 5 – sandariklis, 6 – laidai, 7 – programuojamas loginis valdiklis.

Įrenginys magnetoreologinio skysčio sedimentacijai nustatyti yra sudarytas iš dviejų įmontuotų į korpusą 1 elektrai laidžios medžiagos plokštelių 2,3, atskirtų viena nuo kitos 1 mm tarpeliu. Jos išdėstytos korpuso viršutinėje ir apatinėje dalyse, kadangi dėl dalelių sedimentacijos skirtingose skysčio vietose jų koncentracija yra nevienoda. Plokštelės sumontuotos korpuse yra izoliuotos. Skystį 4 nuo ištekėjimo sulaiko sandariklis 5. Varža matuojama programuojamu loginiu valdikliu 6.

Viršutinėje ir apatinėje konstrukcijos dalyse valdiklio pagalba išmatuojama $M\Omega$ eilės elektrinė varža ir ji palyginama laiko intervalais. Pagal jų santykį nustatomas sedimentacijos laipsnis. Priklausomai nuo magnetoreologinio skysčio sudėties, dalelių koncentracijos bei matuojamos konstrukcijos ypatumų, ši varža gali skirtis. Prieš naudojant šį įrenginį, būtina atlikti pradinį matavimą ir jo kalibravimą, kad pritaikyti konkrečios konstrukcijos sedimentacijos nustatymui.

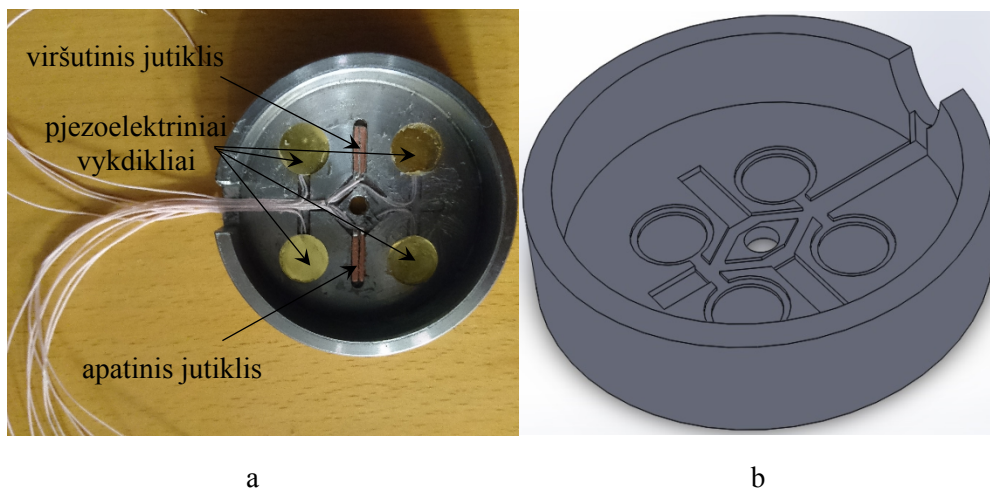
4.2. Sukurto įrenginio pritaikymas magnetoreologiniame stabdyje

Tyrimams atlikti bei įrenginiui išbandyti buvo panaudotas ir modifikuotas jau sukurtas MR stabdis (4.2 pav.) [77].



4.2 pav. Magnetoreologinis stabdis: 1 – korpusas; 2 – korpuso dangtelis, 3 – magnetolaidis, 4 – indukcinė ritė, 5 – indukcinės ritės karkasas, 6 – sandariklis, 7 – diskas, 8 – guolis, 9 – fiksavimo žiedas, 10 – varžtai, 11 – MR skystis

Stabdžio magnetolaidis buvo modifikuotas taip, kad būtų galima nustatyti sedimentaciją jo viduje ir jai įvykus skystį autonomiškai išmaišyti.



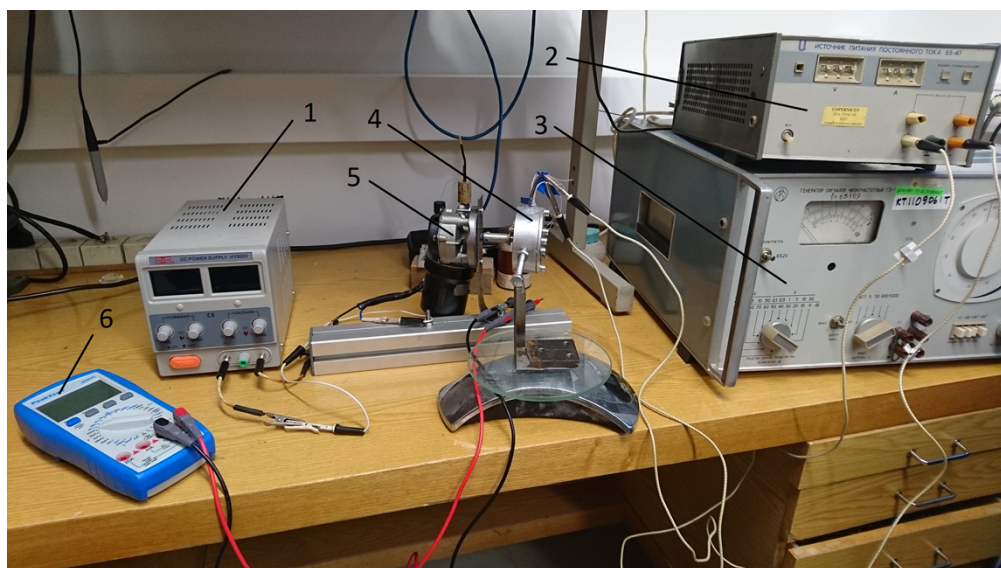
4.3 pav. Modifikuota MR stabdžio detalė: a – bendras vaizdas, b – kompiuterinis modelis

Tam tikslui buvo įmontuoti du varžos matavimo jutikliai sedimentacijos laipsnio nustatymui, bei keturi pjezoelektriniai vykdikliai skysčio esančio viduje išmaišymui. (4.3 pav., a) pateikiamas bendras modifikuotos detalės vaizdas, o (4.3 pav., b) detalė sumodeliuota kompiuteriniu paketu Solidworks.

4.3. Magnetoreologinio stabdžio stabdymo momento priklausomybės nuo magnetoreologinio skysčio sedimentacijos laipsnio tyrimas

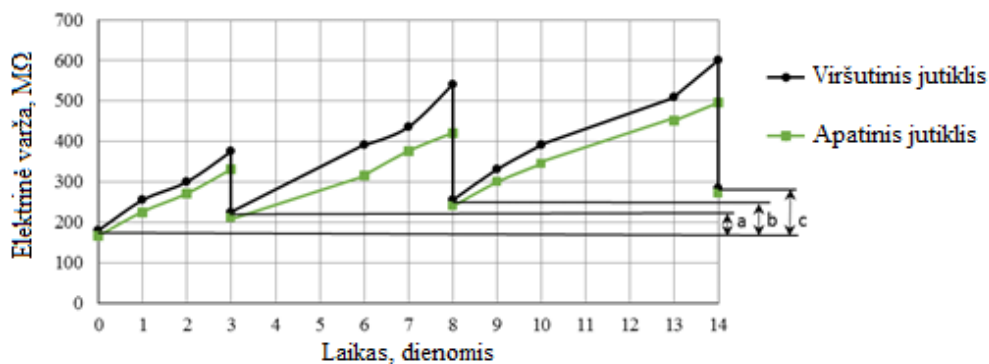
Modifikavus, pilnai surinkus MR stabdį ir užpildžius jį MRF-140CG skysčiu, buvo sukonstruotas eksperimentinis stendas MR stabdžio stabdymo momentui nustatyti (4.4 pav.). Eksperimento tikslas nustatyti, kokią įtaką sedimentacija daro pagrindiniam stabdžio parametrai – jo stabdymo momentui.

Elektros variklis 5 yra standžiai sujungtas su MR stabdžiu ir 12 V maitinamas maitinimo šaltinio 1. Įjungus stabdžio maitinimo šaltinį (3V 1A), vyksta stabdymas ir per sudarytą petį svarstyklių pagalba nustatomas stabdžio stabdymo momentas. Praėjus tam tikram laikui, multimetru pamatuojama varža stabdžio viduje esančiuose jutikliuose ir nustatomas sedimentacijos laipsnis. Jeigu sedimentacija jau įvykusi, įjungiamas generatorius 3, kuris sužadina pjezoelektrinius vykdyklius ir vyksta MR skysčio, esančio MR stabdžio viduje, maišymas. Išmaišius vėl nustatomas sedimentacijos laipsnis pasitikrinimui.



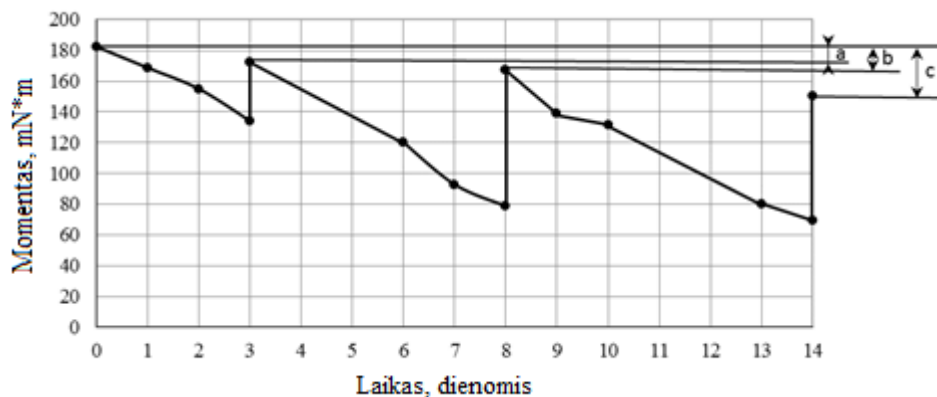
4.4 pav. Eksperimentinis stendas: 1 – variklio maitinimo šaltinis, 2 – MR stabdžio maitinimo šaltinis, 3 – generatorius, 4 – MR stabdis, 5 – elektros variklis, 6 – multimetras

Sedimentacijos laipsnis buvo matuojamas 14 dienų kasdien. Matavimo rezultatai pateikti (4.5 pav.). Praėjus trims dienoms, buvo vienai minutei 2kHz rezonansiniu dažniu įjungti pjezoelektriniai vykdikliai. Ta pati procedūra pakartota atitinkamai po penkių ir vėliau po šešių dienų. Grafike raidėmis a, b ir c parodyta likutinė sedimentacija, kadangi nepavyko MR stabdžio darbinių charakteristikų atstatyti į pradinį lygį.



4.5 pav. Sedimentacijos laipsnio MR stabdyje nustatymas (skystis MRHCCS4-B): a – likutinė sedimentacija po 3 dienų; b – likutinė sedimentacija po 8 dienų; c – likutinė sedimentacija po 14 dienų. Skysčiui išmaišyti 4 pjezo vykdikliai buvo įjungti 1 minutei 60V 2kHz 3, 8 ir 14 dienomis

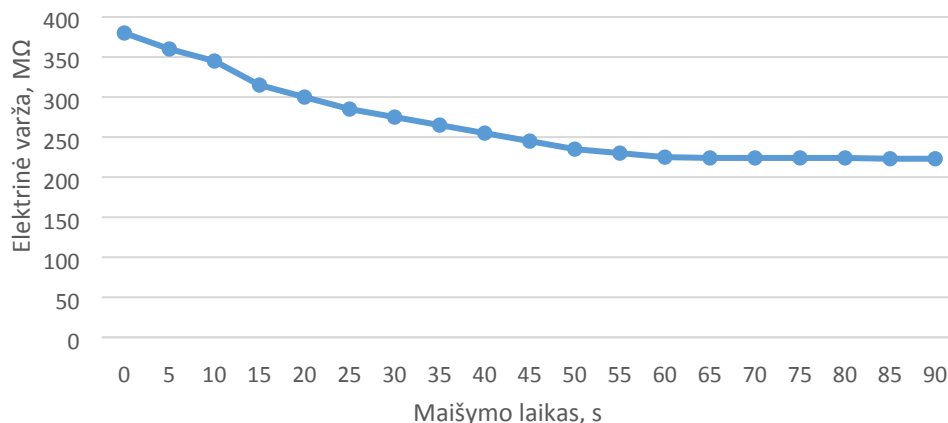
Matuojant sedimentaciją, buvo matuojamas ir MR stabdžio stabdymo momentas (4.6 pav.).



4.6 pav. Stabdymo momento priklausomybė nuo laiko: a – momentas, kai skystis paveiktas sedimentacijos po 3 dienų; b – momentas, kai skystis paveiktas sedimentacijos po 8 dienų; c – momentas, kai skystis paveiktas sedimentacijos po 14 dienų

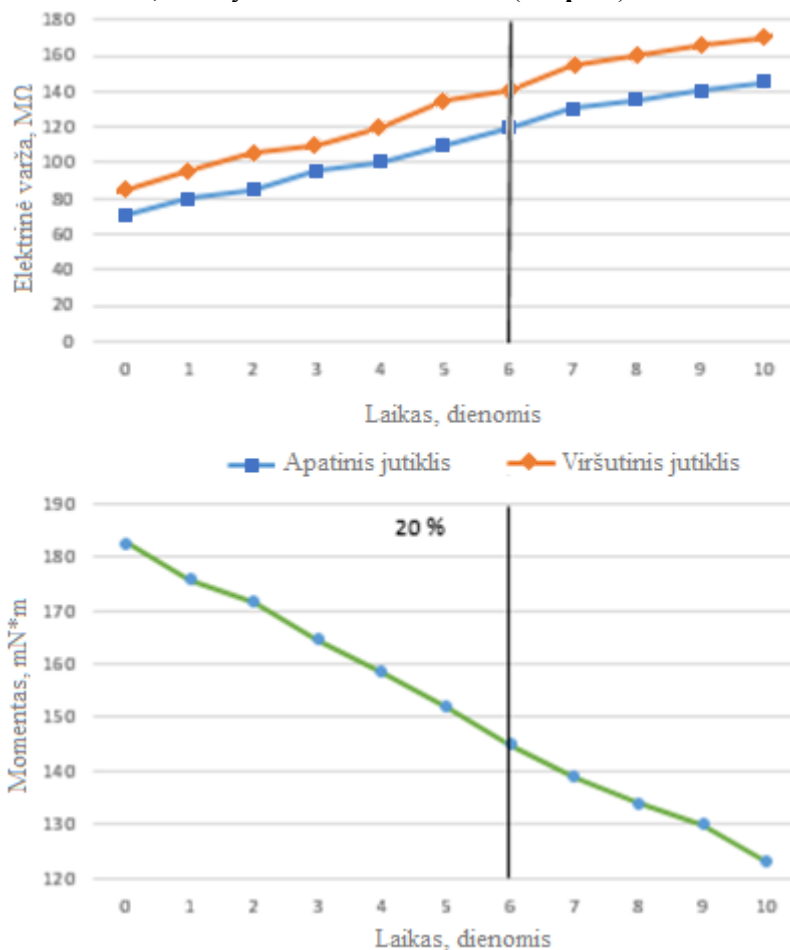
Maišymo laikas buvo pasirinktas 1 minutė todėl, kad po trijų dienų, įjungus pjezovykdiklius, skystis išsimaišė per maždaug 60 sekundžių, kadangi nuo to laiko varža kito labai nežymiai (4.7 pav.).

Varžos kitimas maišant skystį



4.7 pav. Elektrinės varžos kitimas maišant skystį

Buvo nuspręsta MR skystį esantį stabdžio viduje pakeisti į skystį MRHCCS4-B. 10 dienų tuo pačiu stendu buvo matuojamas sedimentacijos laipsnis ir MR stabdžio stabdymo momentas, tik skystis nebuvo maišomas (**4.8 pav.**).

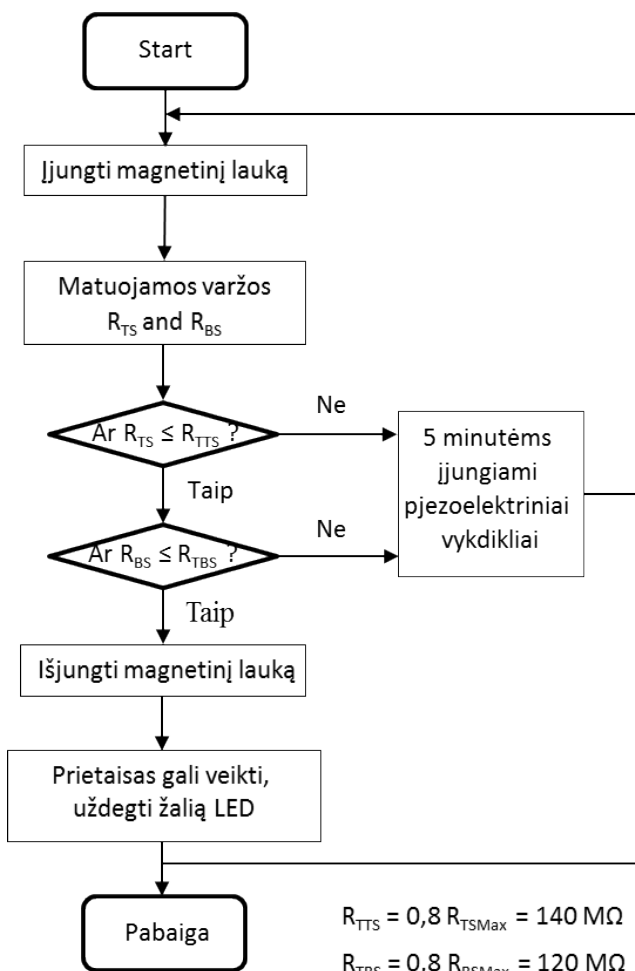


4.8 pav. Varžos ir stabdymo momento matavimas, kai stabdis užpildytas MRHCCS4-B skysčiu: a – varžos kitimas vykstant sedimentacijai, b – momento kitimas vykstant sedimentacijai

Nuspręsta, kad jeigu šiai sistemai dirbant su šiuo skysčiu išmatuota varžos reikšmė yra mažesnė nei $140M\Omega$ viršutiniame jutiklyje ir $120M\Omega$ apatiniame jutiklyje, stabdymo momentas sumažėja mažiau nei 20% nuo pradinės reikšmės ir įtaisas dar gali tinkamai dirbti. Jeigu varža yra didesnė abiejuose jutikliuose, mechanizmas negali tinkamai dirbti ir turi būti atliktas skysčio išmaišymas.

4.4. Autonominio įrenginio magnetoreologinio skysčio sedimentacijos nustatymui sukūrimas

Buvo nuspręsta šiam modifikuotam MR stabdžiui sukurti atskirą įrenginį, kurį prijungus būtų galima nustatyti sedimentacijos laipsnį bei tinkamai išmaišyti skystį, esantį stabdžio viduje. Šio įrenginio loginė blokinė schema pateikta (4.9 pav.), o struktūrinė schema (4.10 pav.).



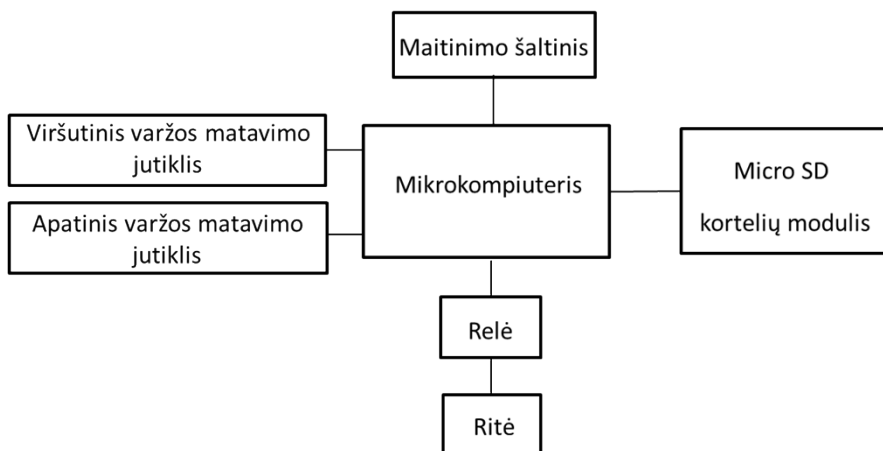
R_T – ribinė varža

R_{TS} – viršutinio jutiklio varža

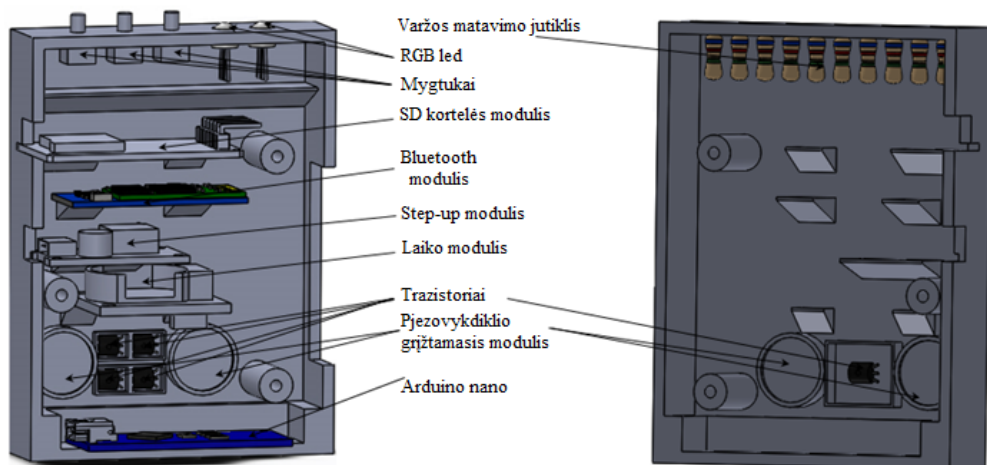
R_{BS} – apatinio jutiklio varža

R_{Max} – maksimali varža

4.9 pav. Kuriamo įrenginio veikimo algoritmas



4.10 pav. Kuriamo įrenginio struktūrinė schema

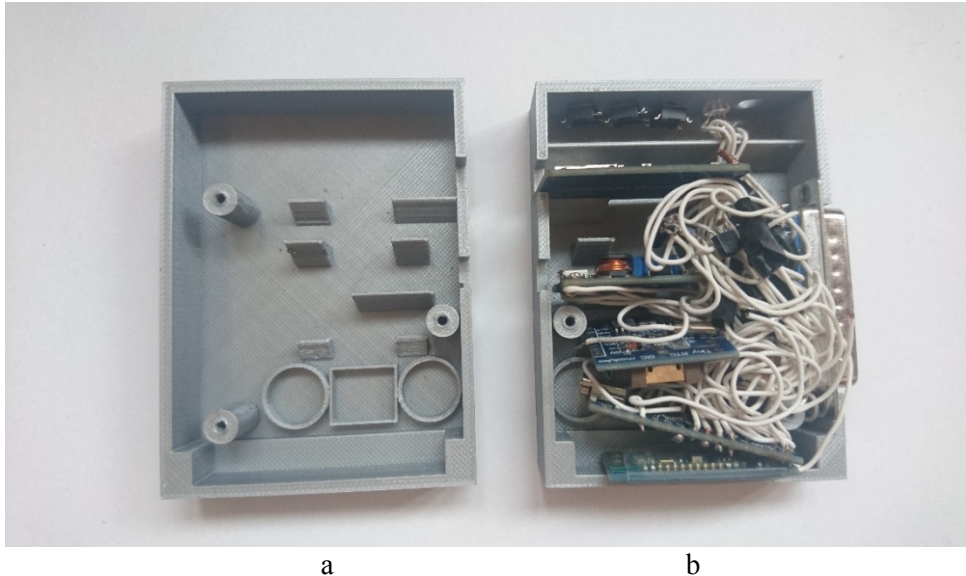


4.11 pav. Sukurto įrenginio kompiuterinis modelis

Įrenginys veikia taip: stabdis su įrenginiu sujungiamas specialia jungtimi. Relės, kurią atstoja tranzistorius pagalba MR stabdžio ritei iš step-up modulio paduodama 30V įtampa ir taip stabdžio viduje sukuriamas magnetinis laukas. Praėjus 30 sekundžių ir nusistovėjus elektrinei varžai, valdikliu išmatuojamos varžos viršutiniame ir apatiniame jutikliuose, esančiuose stabdyje. Kadangi tai didelės varžos, įrenginyje yra lygiagrečiai sujungta 10 varžų ir matuojamas pokytis nuo šios etaloninės varžos. Jeigu išmatuotos varžos yra didesnės už ribines, užsidega raudona lemputė ir mygtuko paspaudimu, arba nustačius galima ir autonomiškai, 4 tranzistoriai įjungia pjėzovykdklikų grįžtamojo ryšio modulius, kurie rezonansiniu dažniu sužadina pjėzovykdklikus, esančius MR stabdyje. Po šios procedūros vėl matuojama varža ir nustatoma, ar dėl sedimentacijos mechanizmas gali dirbti ar ne. Visi matavimų bei išmaišymų duomenys išsaugomi SD kortelėje, taigi galima juos

bet kada peržiūrėti. Pats įrenginys maitinamas per micro-USB jungtį, rekomenduojamos charakteristikos 5V 2A.

Buvo sukurtas įrenginio ir visų reikiamų komponentų kompiuterinis modelis (**4.11 pav.**) ir įrenginio korpusas buvo atspausdintas 3D spausdintuvu (**4.12 pav.**).



4.12 pav. Sukurtas įrenginys: a – korpusas, b – korpusas su elektronikos elementais

Įrenginio viduje komponentai yra sujungti laidais, bei kiekvienas iš jų turi specialų tvirtinimą.

4.5. Skyriaus apibendrinimas

Sukurtas sedimentacijos nustatymo mechanizme ir išmaišymo jo viduje įrenginys, kuris buvo pritaikytas magnetoreologiniam stabdžiui. Tačiau esmė yra pats elektrinės varžos matavimo metodo paprastumas, kadangi šį įrenginį galima būtų pritaikyti ir kitokios konstrukcijos MR stabdyje, sankaboje ir pan. Įrenginys gali dirbti visiškai autonomiškai, arba galima jį valdyti mygtukų pagalba, tam yra indikacinės LED lemputės. Tai pat yra integruotas Bluetooth modulis ir ateityje, susikūrus programėlę išmaniajam telefonui, galima būtų šį įrenginį valdyti tokiu būdu.

BENDROSIOS IŠVADOS

1. Atlikta MR skysčių monitoringo bei darbinės būsenos palaikymo literatūros ir patentinės medžiagos analizė. Susipažinta su keletu metodų sedimentacijai MR skysčiuose stebėti ir keletu įrenginių šiems skysčiams išmaišyti bei nustatyti jų trūkumai.
2. Matematiškai aprašytas dalelių judėjimas MR skystyje, kai jos yra indo viduryje arba prie sienelės. Nustatyta, kad kuo dalelė yra arčiau indo sienelės, tuo jos greitis yra mažesnis dėl trinties jėgų. Taip pat aprašytas matematinis modelis, kai begalinė juosta yra virpinama harmoniniais virpesiais. Aprašytos tangentinės jėgos stacionari ir dinaminė dedamosios. Apjungus dvi teorijas išvesta varžos priklausomybės nuo sedimentacijos laipsnio formulė. Palygintos teoriškai bei eksperimentiškai gautos kreivės. Jų pobūdis yra labai panašus, o koreliacijos koeficientai visiems penkiems tirtiems skysčiams yra daugiau nei 0,95.
3. Reometru ištirti penki skirtingi MR skysčiai. Gautos MR skysčių šlyties įtempiai priklausomybės nuo šlyties kitimo greičio neveikiant magnetiniam laukui bei jam veikiant. Nustatyta, kad MR skysčių neveikiant magnetiniu lauku didžiausi šlyties įtempiai yra skysčio MUDZH-3, mažiausi – MRF-122EG. Nustatyta, kad MR skysčius veikiant 700 mT magnetiniu lauku ir esant dideliame šlyties kitimo greičiui, MRHCCS4-B šlyties įtempiai buvo didžiausi (68 000 Pa), o skysčio MRF-122EG šlyties įtempiai buvo mažiausi (< 40 000 Pa).
4. Sukurtas metodas, leidžiantis nustatyti sedimentacijos laipsnį MR skystyje – matuojant magnetiniu lauku paveikto skysčio elektrinę varžą. Varža gali būti pamatuota veikiant skystį magnetiniu lauku, kadangi priešingu atveju ji yra labai didelė (>600 MΩ) ir nesuteikia reikiamos informacijos. Sukurti trys specialūs MR skysčių elektrinės varžos matavimo jutikliai varžai matuoti. Metodas patikrintas eksperimentiškai ir palygintas su kitu, ritės, kurios viduje yra tiriamasis MR skystis, induktyvumo matavimo metodu. Gautas šių metodų koreliacijos koeficientas visiems tirtiems MR skysčiams artimas vienetui, t.y. patvirtina darbe sukurtą metodą. Lyginant šiame darbe sukurtą metodą su analogais pasaulyje, galima teigti, jog jis yra lengvai pritaikomas, pigesnis bei paprastesnis, o tikslumas praktiškai toks pats.
5. Eksperimentiškai buvo nustatyta sedimentacijos įtaka magnetoreologinio stabdžio stabdymo momentui. Kadangi nustatyta, kad vykstant sedimentacijai MR stabdžio stabdymo momentas prastėja, nuspręsta sukurtą sedimentacijos laipsnio nustatymo įrenginį įmontuoti būtent šiame mechanizme. Įrenginys pritaikytas sedimentacijos laipsnio MR stabdyje nustatymui. Pagal MR stabdžio viduje patalpintų viršutinio ir apatinio varžų matavimo jutiklių signalus, valdikliu galima nustatyti sedimentacijos laipsnį. Esant sedimentacijos laipsniui didesniau už užsiduotą normą, pritaikyti pjezoelektriniai vykdikliai leidžia atstatyti MR skysčio darbinės charakteristikas.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Bell, R. C., Zimmerman, D. T., & Wereley, N. M. (2010). *Impact of nanowires on the properties of magnetorheological fluids and elastomer composites*. Intech.
2. Bossis, G., Kuzhir, P., López-López, M. T., Meunier, A., & Magnet, C. (2013). Importance of Interparticle Friction and Rotational Diffusion to Explain Recent Experimental Results in the Rheology of Magnetic Suspensions.
3. Ashour, O., Rogers, C. A., & Kordonsky, W. (1996). Magnetorheological fluids: materials, characterization, and devices. *Journal of intelligent material systems and structures*, 7(2), 123-130.
4. Sarkar, C., & Hirani, H. (2015). Effect of particle size on shear stress of magnetorheological fluids. *Smart Science*, 3(2), 65-73.
5. Wereley, N. (Ed.). (2013). *Magnetorheology: advances and applications* (Vol. 6). Royal Society of Chemistry.
6. Sherman, S. G., & Wereley, N. M. (2013). Effect of particle size distribution on chain structures in magnetorheological fluids. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(7), 3430-3433.
7. Sheikholeslami, M., Ganji, D. D., & Rashidi, M. M. (2015). Ferrofluid flow and heat transfer in a semi annulus enclosure in the presence of magnetic source considering thermal radiation. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 47, 6-17.
8. Ashtiani, M., Hashemabadi, S. H., & Ghaffari, A. (2015). A review on the magnetorheological fluid preparation and stabilization. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 374, 716-730.
9. Hassan, M., Zeeshan, A., Majeed, A., & Ellahi, R. (2017). Particle shape effects on ferrofluids flow and heat transfer under influence of low oscillating magnetic field. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 443, 36-44.
10. Jolly, M. R., Bender, J. W., & Carlson, J. D. (1999). Properties and applications of commercial magnetorheological fluids. *Journal of intelligent material systems and structures*, 10(1), 5-13.
11. Guo, C. W., Chen, F., Meng, Q. R., & Dong, Z. X. (2014). Yield shear stress model of magnetorheological fluids based on exponential distribution. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 360, 174-177.
12. Bombard, A. J. F., Goncalves, F. R., Shahrivar, K., Ortiz, A. L., & de Vicente, J. (2015). Tribological behavior of ionic liquid-based magnetorheological fluids in steel and polymeric point contacts. *Tribology International*, 81, 309-320.
13. Kumar, R., Anupama, A. V., Kumaran, V., & Sahoo, B. (2018). Effect of solvents on the structure and magnetic properties of pyrolysis derived carbon globules embedded with iron/iron carbide nanoparticles and their applications in magnetorheological fluids. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 16, 167-173.
14. Mankame, N. D., Browne, A. L., & Ulicny, J. C. (2015). *U.S. Patent No. 9,016,318*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

15. Sohn, J. W., Oh, J. S., & Choi, S. B. (2015). Design and novel type of a magnetorheological damper featuring piston bypass hole. *Smart Materials and Structures*, 24(3), 035013.
16. Odenbach, S. (2016). Microstructure and rheology of magnetic hybrid materials. *Archive of Applied Mechanics*, 86(1-2), 269-279.
17. Jönkkäri, I., Isakov, M., & Syrjälä, S. (2015). Sedimentation stability and rheological properties of ionic liquid-based bidisperse magnetorheological fluids. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 26(16), 2256-2265.
18. Shah, K., Seong, M. S., Upadhyay, R. V., & Choi, S. B. (2013). A low sedimentation magnetorheological fluid based on plate-like iron particles, and verification using a damper test. *Smart Materials and Structures*, 23(2), 027001.
19. Kim, M. W., Han, W. J., Kim, Y. H., & Choi, H. J. (2016). Effect of a hard magnetic particle additive on rheological characteristics of microspherical carbonyl iron-based magnetorheological fluid. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 506, 812-820.
20. Xie, L., Choi, Y. T., Liao, C. R., & Wereley, N. M. (2016). Long term stability of magnetorheological fluids using high viscosity linear polysiloxane carrier fluids. *Smart Materials and Structures*, 25(7), 075006.
21. De Vicente, J., Klingenberg, D. J., & Hidalgo-Alvarez, R. (2011). Magnetorheological fluids: a review. *Soft matter*, 7(8), 3701-3710.
22. Sarkar, C., & Hirani, H. (2015). Development of a magnetorheological brake with a slotted disc. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 229(14), 1907-1924.
23. El Majdoub, K., Ghani, D., Giri, F., & Chaoui, F. Z. (2015). Adaptive semi-active suspension of quarter-vehicle with magnetorheological damper. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 137(2), 021010.
24. Rizzo, R., Musolino, A., Bucchi, F., Forte, P., & Frendo, F. (2015). A multi-gap magnetorheological clutch with permanent magnet. *Smart Materials and Structures*, 24(7), 075012.
25. Wahid, S. A., Ismail, I., Aid, S., & Rahim, M. S. A. (2016, February). Magneto-rheological defects and failures: A review. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 114, No. 1, p. 012101). IOP Publishing.
26. Ruzicka, M. (2000). *Electrorheological fluids: modeling and mathematical theory*. Springer Science & Business Media.
27. Hajalilou, A., Mazlan, S. A., Lavvafi, H., & Shameli, K. (2016). Magnetorheological fluid applications. In *Field Responsive Fluids as Smart Materials* (pp. 67-81). Springer, Singapore.
28. Rădulescu, V. D. (2015). Nonlinear elliptic equations with variable exponent: old and new. *Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications*, 121, 336-369.
29. Liu, X., Lu, H., Chen, Q., Wang, D., & Zhen, X. (2013). Study on the preparation and properties of silicone oil-based magnetorheological fluids. *Materials and Manufacturing Processes*, 28(6), 631-636.

30. Liu, L., Huang, X., Shen, C., Liu, Z., Shi, J., Wen, W., & Sheng, P. (2005). Parallel-field electrorheological clutch: Enhanced high shear rate performance. *Applied Physics Letters*, 87(10), 104106.
31. Tonazzini, A., Sadeghi, A., & Mazzolai, B. (2016). Electrorheological valves for flexible fluidic actuators. *Soft Robotics*, 3(1), 34-41.
32. Karimi, H. R. (2018). *Offshore Mechatronics Systems Engineering*. CRC Press.
33. Jolly, M. R., Bender, J. W., & Carlson, J. D. (1998, June). Properties and applications of commercial magnetorheological fluids. In *Smart Structures and Materials 1998: Passive Damping and Isolation* (Vol. 3327, pp. 262-276). International Society for Optics and Photonics.
34. Yin, J., Chang, R., Kai, Y., & Zhao, X. (2013). Highly stable and AC electric field-activated electrorheological fluid based on mesoporous silica-coated graphene nanosheets. *Soft Matter*, 9(15), 3910-3914.
35. Funaki, J. (2009). *U.S. Patent No. 7,589,714*. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
36. Wen, W., Huang, X., Yang, S., Lu, K., & Sheng, P. (2003). The giant electrorheological effect in suspensions of nanoparticles. *Nature materials*, 2(11), 727.
37. Zhao, Y., Xiao, T., Xue, S., & Dong, J. (2004). Experiments and simulated calculations on the resistance to low-velocity impact of layered plates with a sandwiched ERM. *Journal of sound and vibration*, 271(3-5), 615-633.
38. Clercx, H. J. H., & Bossis, G. (1993). Many-body electrostatic interactions in electrorheological fluids. *Physical Review E*, 48(4), 2721.
39. Prekas, K., Shah, T., Soin, N., Rangoussi, M., Vassiliadis, S., & Siores, E. (2013). Sedimentation behaviour in electrorheological fluids based on suspensions of zeolite particles in silicone oil. *Journal of colloid and interface science*, 401, 58-64.
40. Hao, T., Kawai, A., & Ikazaki, F. (1998). Mechanism of the electrorheological effect: evidence from the conductive, dielectric, and surface characteristics of water-free electrorheological fluids. *Langmuir*, 14(5), 1256-1262.
41. Qiu, W., Hong, Y., Mizuno, Y., Wen, W., & Nakamura, K. (2014). Non-contact piezoelectric rotary motor modulated by giant electrorheological fluid. *Sensors and Actuators A: Physical*, 217, 124-128.
42. Dineva, P., Gross, D., Müller, R., & Rangelov, T. (2014). Piezoelectric materials. In *Dynamic Fracture of Piezoelectric Materials* (pp. 7-32). Springer, Cham.
43. Newman, P. G., & Rozycki, G. S. (1998). The history of ultrasound. *Surgical clinics of north America*, 78(2), 179-195.
44. Tiersten, H. F. (2013). *Linear Piezoelectric Plate Vibrations: Elements of the Linear Theory of Piezoelectricity and the Vibrations Piezoelectric Plates*. Springer.
45. Mahajan, A., Graça, M. P. F., Mendiratta, S. K., Monteiro, J. M., & Valente, M. A. (2013). Structure and ferroelectric studies of (Ba_{0.85}Ca_{0.15})(Ti_{0.9}Zr_{0.1})O₃ piezoelectric ceramics. *Materials Research Bulletin*, 48(10), 4395-4401.
46. Tabrizian, R., & Rais-Zadeh, M. (2015, June). The effect of charge redistribution on limiting the kt². Q product of piezoelectrically transduced resonators. In *Solid-State*

- Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS), 2015 Transducers-2015 18th International Conference on* (pp. 981-984). IEEE.
47. Wilbur, M.L., Wilkie, W.K., & Army, U.S. (2004). ACTIVE-TWIST ROTOR CONTROL APPLICATIONS FOR UAVs.
 48. Leadenham, S., & Erturk, A. (2015). Unified nonlinear electroelastic dynamics of a bimorph piezoelectric cantilever for energy harvesting, sensing, and actuation. *Nonlinear Dynamics*, 79(3), 1727-1743.
 49. Jaffe, B. (2012). *Piezoelectric ceramics* (Vol. 3). Elsevier.
 50. Gupta, M.N., Suman, & Yadav, S.K. (2014). Electricity Generation Due to Vibration of Moving Vehicles Using Piezoelectric Effect.
 51. Leng, J. (2014). Magnetorheology: advances and applications, edited by Norman M. Wereley: 33-33.
 52. Iglesias, G. R., López-López, M. T., Delgado, A. V., & Durán, J. D. G. (2011). Description and performance of a fully automatic device for the study of the sedimentation of magnetic suspensions. *Review of Scientific Instruments*, 82(7), 073906.
 53. Ngatu, G. T., & Wereley, N. M. (2007). Viscometric and sedimentation characterization of bidisperse magnetorheological fluids. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(6), 2474-2476.
 54. Lord corporation [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-07-01]. Prieiga internetą: <http://www.lord.com>.
 55. Weight Per Gallon Cups [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-07-01]. Prieiga internetą: <http://www.gardco.com/pages/density/wpg.cfm>.
 56. Magnetorheological fluid sedimentation tester. Inventors: Tan HEPING, Xie NING, Tan XIAOJING. IPC: G01N 15/04. 2011-09-07. Patentscope. [žiūrėta 2018-07-01]. Prieiga per internetą: <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=CN84746242&recNum=4&maxRec=18&office=&prevFilter=&sortOption=Pub+Date+Desc&queryString=FP%3A%28sedimentation+magnetorheological+fluid%29&tab=NationalBiblio>
 57. Method and apparatus for measurement and control of magnetic particle concentration in a magnetorheological fluid. Inventors: William KORDONSKI, Keith BEADLE, Sergei GORODKIN, Arpad SEKERES. IPC: B24B 37/00 (2012.01) ,B24B 49/00 (2012.01). 2012-10-18. Patentscope. [žiūrėta 2018-07-01]. Prieiga per internetą: <http://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2012142221&recNum=12&maxRec=152&office=&prevFilter=&sortOption=Pub+Date+Desc&queryString=ALL%3A%28sedimentation+magnetorheological+fluid%29&tab=PCT+Biblio>
 58. Isnikurniawan, A., Fujita, Y., Tanimoto, S., & Sawada, T. (2014). Investigation of cluster formation in MR fluid under compression using ultrasonic measurement. In *Materials Science Forum* (Vol. 792, pp. 147-152). Trans Tech Publications.
 59. Bramantya, M. A., & Sawada, T. (2011). The influence of magnetic field swept rate on the ultrasonic propagation velocity of magnetorheological fluids. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 323(10), 1330-1333.

60. Chen, S., Huang, J., Jian, K., & Ding, J. (2015). Analysis of influence of temperature on magnetorheological fluid and transmission performance. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2015.
61. Когин Н.Е., Кибель И.А., Розе Н.В., Теоретическая гидромеханика, II, Издат. физико-математической литературы. Москва 1963, 728 с.
62. Коппенфель В., Штальман Ф., Практика конформных отображений, Издат. иностранной литературы, Москва, 1963, 406 с. W.Koppenfels, F.Stallmann, Praxis der Konformen Abbildung, Springer-Verlog, Berlin, 1959.
63. Бейтмен Г., Эрдейи А., Высшие транс-ценгентные функции, Функции Беццеля, ..., Издат. „Наука”, Москва, 1966. Higher Transcendental Functions, vol. 2, New York, 1953.
64. Абрамович М., Стиган И., Справочник по специальным функциям, Издат. „Наука”, Москва, 1979. Handbook of Mathematical Functions, Ed., M.Abramowitz, I.A. Stegun, National Bureau of Standarts, Applied Mathematics Series 55, 1964.
65. Кузнецов С., Специальные функции, Издат. „Высшая Школа”, Москва, 1965.
66. Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф., Специальные функции, Издат. „Наука”, Москва, 1964. Janke-Emde-Losch, Tafeln Hoherer Funktionen, Stuttgart, 1960.
67. Cohen, D., & Nemoto, I. (1984). Ferrimagnetic particles in the lung part 1: The magnetizing process. *IEEE transactions on biomedical engineering*, (3), 261-273.
68. Bica, I. (2006). The influence of the magnetic field on the electrical magnetoresistance of magnetorheological suspensions. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 299(2), 412-418.
69. Sediq, A. S., Waasdorp, S. K. D., Nejadnik, M. R., van Beers, M. M. C., Meulenaar, J., Verrijk, R., & Jiskoot, W. (2017). Determination of the porosity of PLGA microparticles by tracking their sedimentation velocity using a flow imaging microscope (FlowCAM). *Pharmaceutical research*, 34(5), 1104-1114.
70. Liquids Research Ltd [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-07-01]. Prieiga internetą: http://liquidsresearch.co.uk/en-GB/magnetorheological_fluids-51.aspx
71. Wang, X., & Gordaninejad, F. (2006). Study of magnetorheological fluids at high shear rates. *Rheologica acta*, 45(6), 899-908.
72. Kim, M., & Park, S. J. (2016). A comprehensive viscosity model for micro magnetic particle dispersed in silicone oil. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 404, 40-44.
73. Kolekar, S., Kurahatti, R. V., Prashanth, P. K., Kamble, V., & Reddy, N. (2014). Preparation of a silicon oil based magneto rheological fluid and an experimental study of its rheological properties using a plate and cone type Rheometer. *J. ISSS*, 3(1), 19-24.
74. Bashirnezhad, K., Bazri, S., Safaei, M. R., Goodarzi, M., Dahari, M., Mahian, O., Wongwises, S. (2016). Viscosity of nanofluids: a review of recent experimental studies. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 73, 114-123.
75. Motic B1 Series [interaktyvus]. [žiūrėta 2018-07-01]. Prieiga internetą: https://www.motic.com/As_B1_compoundmicroscope/product_166.html

76. Gorodkin, S. R., Kordonski, W. I., Medvedeva, E. V., Novikova, Z. A., Shorey, A. B., & Jacobs, S. D. (2000). A method and device for measurement of a sedimentation constant of magnetorheological fluids. *Review of Scientific Instruments*, 71(6), 2476-2480.
77. Vėžys, J., Mažeika, D., Kandrotaitė-Janutienė, R., Dragašius, E., Kilikevičius, A., & Korobko, E. V. (2018). Sedimentation Influence on Magnetorheological Brake Torque Moment. *Strength of Materials*, 50(2), 357-367.

MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS

Straipsniai žurnaluose su IF:

1. Vėžys, J.; Dragašius, E.; Volkovas, V.; Mystkowski, A.; Korobko, E. *The sedimentation of magnetoheological fluid monitoring system based on resistivity measuring*. Mechanika. Kaunas: KTU. ISSN: 1392-1207, eISSN: 2029-6983. 2016, vol. 22, iss. 5, p. 449-452.
2. Vėžys, J., Mažeika, D., Kandrotaitė-Janutienė R., Dragašius, E., Kilikevičius, A., Korobko, E.V. *Sedimentation influence on magnetorheological brake torque moment*. Strength of Materials, Vol. 50, No. 2, March, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11223-018-9979-4>
3. Vėžys, J., Dragašius, E., Juzėnas, K., Korobko, E., Mystkowski, A. Comparison of different magneto-rheological fluids' stability. Journal of Measurements in Engineering. 2019.

Pranešimai tarptautinėse konferencijose:

1. MSM 2015, Kaunas, 2015 m. July 7-9d. J. Vėžys, E. Dragašius, V. Volkovas "Measuring of resistivity of magnetorheological fluid applied with magnetic field for determination of sedimentation"
2. „Modern technologies in mechanical engineering“, Khmielnitsky nacionalinis universitetas, Ukraina, 2016 April 21-23 d. E. Dragašius, J. Vėžys, D. Mažeika. "Experimental research of sedimentation influence for clutch with magnetorheological fluid"
3. MSM 2016, Bialystok, Lenkija, 2016 m. July 3-8 d. J. Vėžys, V. Volkovas, E. Dragašius, D. Mažeika "Research of electric resistivity change of magnetorheological fluid under magnetic field for diagnostic of sedimentation"

Lietuvos Respublikos patento paraiška:

Su bendraautoriais pateikta LR patento paraiška: J. Vėžys, E. Dragašius, V. Volkovas, E. Uldinskas, E. Korobko. "Magnetoreologinių skysčių sedimentacijos nustatymo įrenginys". Reg. nr. 2017 514.

SL344. 2019-04-23, 14 leidyb. apsk. l. Tiražas 12 egz. Užsakymas 96.
Išleido Kauno technologijos universitetas, K. Donelaičio g. 73, 44249 Kaunas
Spausdino leidyklos „Technologija“ spaustuvė, Studentų g. 54, 51424 Kaunas