

LATVIJAS UNIVERSITĀTE
FIZIKAS, MATEMĀTIKAS UN OPTOMETRIJAS FAKULTĀTE
FIZIKAS NODAĻA

**DIVFĀZU PLŪSMAS
MODEĻEKSPERIMENTI METALURĢIJAS
PROCESU HIDRODINAMIKAS IZPĒTEI**

BAKALaura DARBS

Autors: **Arvīds Viesturs Vimba**

Studenta apliecības Nr.: av16075

Darba vadītājs:

Dr. Phys. Imants Kaldre

Darbs izstrādāts LU Fizikas institūtā

RĪGA 2019

Anotācija

Šajā darbā tiek apskatītas ūdens – gāzes plūsmas modeļeksperimenti. Pēc divfāzu plūsmu un dažādu vielu plūsmu līdzību iepazīšanas, tiek veikta ūdens modeļeksperimentu izveide. Dažādu eksperimentu izveide ļauj iegūt kvantitatīvus datus un parametrus par plūsmu īpašībām. Dati tiek apstrādāti un iegūti plūsmas raksturīgie lielumi un bezdimensionāli skaitļi. Šīs vērtības tiek salīdzinātas ar industrijā pielietotiem risinājumiem un pielietojumiem divfāzu plūsmām.

Atslēgas vārdi: divfāzu plūsma, burbuļu šķelšana, ūdens modeļeksperimenti

Abstract

In the present work water-air flow experimental devices are considered. After an introduction in to two-phase flows and different liquid flows, model-experiments are made. The construction of several experiments allows the acquiring of quantitative data and parameters of flow properties. The data is processed and characteristic values and dimensionless number are obtained. These values are compared with solutions and applications of two-phase flows in industry.

Key words: two-phase flow, bubble splitting, water model-experiments

SATURS

Anotācija	2
SATURS.....	3
APZĪMĒJUMU UN SAĪSINĀJUMU SKAIDROJUMS.....	4
IEVADS.....	5
Autora ieguldījums.....	6
1. TEORĒTISKĀ DAĻA.....	7
1.1. Divfāzu plūsmas	7
1.2. Ūdens – gāzes burbuļu plūsmas	8
1.4. Burbuļu uzpeldes ātrums	11
1.5. Teilora-Kueta plūsma	13
1.6. Alumīnija un ūdens plūsmu līdzības	14
1.7. Bezkontakta degazatora modelis	15
2. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA.....	16
2.1. Plānotie eksperimenti	16
2.2. Modeļa apraksts.....	19
2.3. Modeļa parametri.....	20
2.4. Eksperimenta gaita	21
3. REZULTĀTI.....	24
3.1. Burbuļu izmērs	24
3.2 Gaisa un ūdens attiecība	25
3.3 Burbuļu virsmas laukums	26
3.4. Bezdimensionālie skaitļi.....	27
4. SECINĀJUMI UN TĀLĀKĀS IESPĒJAS.....	28
Pateicības.....	29
Izmantotā literatūra un avoti.....	30

APZĪMĒJUMU UN SAĪSINĀJUMU SKAIDROJUMS

Al - alumīnijs	l/min - litri minūtē
ΔT - temperatūras starpība	m - (mērvienība) metrs
apgr./min. – apgriezieni minūtē	min - minūte
Ar - argons	mm – milimetrs
B - bors	N.p.k – nummurs pēc kārtas
$^{\circ}\text{C}$ – celsija grādi	N_2 - slāpeklis
C_b - berzes koeficients	Nd - neodīms
d - diametrs	Q - plūmas ātrums
d_a - ārējais diametrs	r - radiuss
d_i - iekšējais diametrs	Re - Reinoldsa skaitlis
F - spēks	S - laukums
F_b - berzes spēks	T - temperatūra
F_C - cēlējspēks	v - ātrums
Fe - dzelzs	V - tilpums
g - (mērvienība) grams	β - termālās izplešanās koeficients
g - brīvās krišanas paātrinājums	μ - dinamiskā viskozitāte
h - augstums	ν - frekvence
h_a - ārējais augstums	π - matemātiska konstante
h_i - iekšējais augstums	ρ - blīvums
Hz - hercs	σ - virsmas spraigums
L - raksturīgais izmērs	

IEVADS

Metalurģijas industrijā aug pieprasījums pēc augstas tīrības alumīnija, kas nodrošina augstu detaļu izturību, militārajos, rūpnieciskās ražošanas, elektrotehnikas, medicīnas u.c. procesos izmantotajās iekārtās. [1] Alumīnija kvalitātes pakāpi nosaka vielas tīrība, tātad to pazemina nevēlamu elementu piejaukumu daudzums vielā, piemēram ūdeņradis, dzelzs un sārņu metāli. Šos piejaukumus var novērst caur degazāciju¹. Industrijā ļoti augstu atzinību ir saņēmuši rotorī. Rotors ir degazācijas iekārtas daļa, to veido grafitā galva, kuru iemērc izkausētā alumīnijā, lai iepludinātu kādu inerta gāzi (Ar, N₂). Lai nodrošinātu lielu efektīvo darba laukumu ar vidi, rotora galvai jārotē ar lieliem apgriezieniem, tādējādi ievadītās gāzes burbuļi sašķeļas, darba virsma strauji pieaug, un virsmas laukuma pret tilpuma attiecība kļūst ļoti augsta. Skarbo darba apstākļu dēļ, šī metodes galvenā problēma ir detaļu īsais darba mūžs (lūztošas lāpstiņas, citi mehāniski defekti), to iespējams novērst lietojot bezkontakta degazatorus. [2] [3]

Mūsdienās elektromagnētiskās bezkontakta metalurģijas iekārtas kļuvušas izplatītākas, jo tajās izmantotie retzemju (NdFeB) magnēti ir daudz pieejamāki. Šo tehnoloģiju iespējams izmantot arī alumīnija degazācijai, izveidojot bezkontakta alumīnija degazatoru. Bezkontakta degazatori ir iekārtas, kas veic šķidrā alumīnija degazāciju bez tieša kontakta ar darba vidi, visbiežāk caur mainīgu magnētisko lauku. Vienkāršākais šādas iekārtas piemērs ir plāna caurule, caur kuru plūst kausēts alumīnijs, kurai līdzās uz rotējošas ripas novietots spēcīgs pastāvīgais magnēts, kas vielā rada mainīgu magnētisko lauku un inducē elektrisko strāvu. Lorenca spēks izkausētajā alumīnijā rada kustību. Vietā, kur šis spēks ar izkausēto vielu ir visspēcīgākais, tiek ievadīta kāda inerta gāze. Turpmākais darbības princips, pēc būtības, ir līdzvērtīgs rotējošam rotoram. [3]

Šķidru alumīniju aizstājot ar ūdeni, iespējams radīt līdzīgus bezkontakta degazatoru modeļeksperimentus, kas ļauj veiksmīgāk izpētīt to darbību. Šādu paņēmieni šķidru metālu degazācijas izpētei jau pašlaik izmanto metalurģijas industrijā. [4] Salīdzinājumā ar eksperimentiem, kuros tiek izmantots šķidrums alumīnijs, ūdens modeļeksperimentiem ir vairākas priekšrocības. Pirmkārt, alumīnija kušanas temperatūra ir 660°C, savukārt ūdens ir šķidrums arī pie normāliem apstākļiem, tādēļ eksperimentālo ierīču īpašību kritēriji ir mazāki, padarot tās ekonomiski izdevīgākas. Otrkārt, alumīnijs ļoti efektīvi absorbē redzamo gaismu, tādēļ ūdens izmantošana tā vietā ļauj efektīvāk novērot plūsmas īpašības un parametrus eksperimenta laikā.

¹ Degazācija – vielas atbrīvošana no nevēlamiem gāzu piemaisījumiem.

Būtiskākā atšķirība starp šķidru alumīniju un ūdeni ir tā, ka ūdenī nav iespējams inducēt plūsmas pielietojot elektromagnētisko indukciju. Šī trūkuma dēļ, jāizmanto mehāniskas plūsmu radīšanas metodes, bieži, ar dažādām robežvirsmām, kurām ir tuva līdzība ar tām, kas rodas maisot alumīniju ar elektromagnētisko indukciju. [5] [6]

Mērķis:

Pētīt divfāzu plūsmas ūdens modeļeksperimentos izmantojot dažādas robežvirsmas.

Darba uzdevumi:

1. Izveidot eksperimentālo iekārtu ūdens – burbuļu plūsmas izpētei;
2. Iegūt kvantitatīvus datus pie dažādiem iekārtas darbības režīmiem;
3. Izveidot analītisku aprakstu lai salīdzinātu modeļeksperimentu ar vienkāršotu degazatora modeli.

Autora ieguldījums.

Darba ietvaros autors izstrādāja vairākus eksperimentālās iekārtas variantus. Patstāvīgi veica kvantitatīvu datu ieguvī, apstrādi un izvērtēšanu. Nosakot ierīces parametrus un darbības režīmus salīdzināja to ar metālu hidrodinamikas iekārtām.

1. TEORĒTISKĀ DAĻA

1.1. Divfāzu plūsmas

Pastāv dažādas divfāzu plūsmas, pēc to agregātstāvokļu iedalījuma, kā arī pēc to mijiedarbību veida. Ja divfāzu plūsmas tiek iedalītas tikai pēc to agregātstāvokļa, nevis to mijiedarbību virsmu veida vai formas, un pieņemot ka viela tiek apskatīta pie normāliem apstākļiem, paliek 3 vielu veidi: ciets, šķidrums un gāzveida, ir iespējams novērot arī 4 vielas stāvokli, plazmu, bet šeit viņa netiek apsvērta, līdz ar to paliek:

1. Šķidru – gāzveida plūsmas
2. Šķidru – cietu plūsmas
3. Cietu – gāzveida plūsmas

Tālāk var arī apskatīt plūsmas arī pēc to mijiedarbību veida un katras fāzes izkārtojuma.

Pastāv trīs grupas divfāžu plūsmām:

1. Atdalītās plūsmas
2. Dispersās plūsmas
3. Sajauktas jeb Pārejas plūsmas

Visas šīs plūsmu klases var iedalīt sīkāk pēc tipiskiem režīmiem, kurus nosaka plūsmu ģeometrija un konfigurācija:

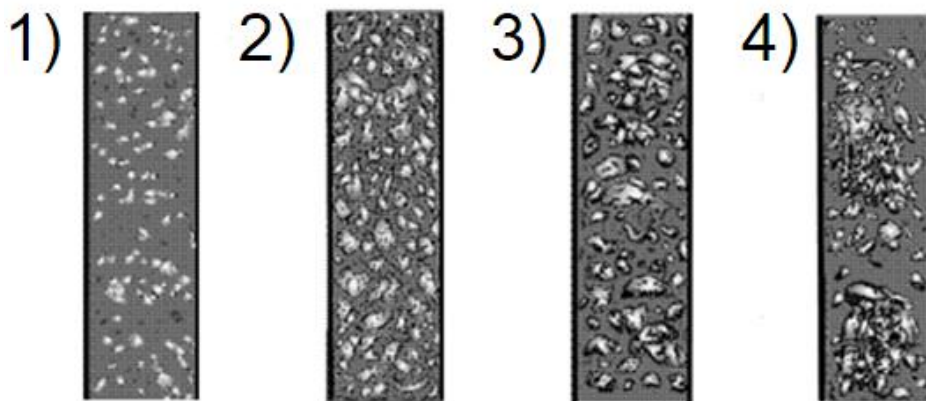
- Atdalītajās plūsmās ir divas nošķirtas plūsmu fāzes kurās neatrodas otras plūsmas telpas apgabali vai daļiņas (piemēram gāzes burbuļi šķidrumā, šķidrums pilieni gāzē, citas daļiņas plūstošā vielā.
- Dispersās plūsmas ir plūsmas kur nav novērojamas vairākas atsevišķas plūsmas, un to apgabali, bet vidē novērojami iepriekšminētie piemēri.
- Sajauktajās jeb pārejas plūsmās novērojama abu pirmo piemēru sajaukums. Viens piemērs šādām plūsmām ir kur ir skaidri redzama robeža starp gāzes un šķidrums vidēm, bet šķidrajā vidē ir novērojami gāzes burbulīši.

Šajā darbā vissīkāk tiks apskatītas Šķidru – gāzveida plūsmu, dispersās klases, burbuļu plūsmas tipiskais režīms. [7]

1.2 Ūdens – gāzes burbuļu plūsmas

Burbuļu plūsma var tikt definēta kā divfāzu plūsma kurā mazi burbuļu dispersija tiek atdalīta no apkārtējās šķidrās vides. Šai plūsmai raksturīgas ir burbuļu virsmas kas maina savu novietojumu laikā, kā rezultātā var novērot sarežģītas mijiedarbības starp burbuļiem, kā arī burbuļiem ar apkārt esošo vidi. Atkarībā no tā cik spēcīgas ir šīs mijiedarbības var iedalīt burbuļu plūsmu četros atsevišķos režīmos.

1. Ideāli atdalīta burbuļu plūsma;
 2. Mijiedarbojoša burbuļu plūsma;
 3. Maisīta turbulenta burbuļu plūsma;
 4. Grupēta burbuļu plūsma;
- (šo plūsmu piemēri parādīti Attēlā 1.1)

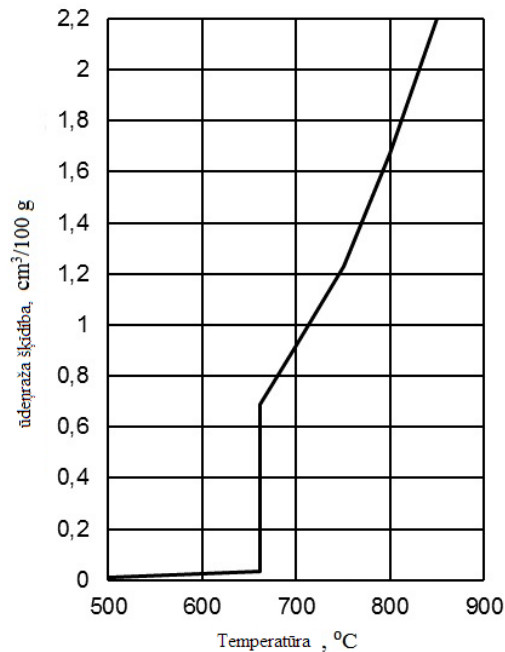


1.1. att. Ūdens – gāzes burbuļu režīmi vertikālā caurulē [8]

Ideāli atdalītā burbuļu plūsmā burbuļi katrs par sevi uzvedās kā atsevišķs burbulis, jo starp atsevišķiem burbuļiem nav novērojamas starpburbuļu mijiedarbības. Mijiedarbojošā burbuļu plūsmā burbuļu koncentrācija vai izmērs ir tik liels ka starp tiem parādās mijiedarbības, vai nu tiešas – caur sadursmēm vai arī caur mijiedarbību ar apkārtējo vidi. Gadījumā kad burbuļu koncentrācija paliek pietiekami liela, un līdz ar to sadursmes notiek ļoti bieži un sadursmē esošos burbuļu tilpums strauji pieaug, rodas cepurburbuļi un plūsma paliek par maisītu turbulentu burbuļu plūsmu. Šādā plūsmā novērojami gan cepurburbuļi, gan atsevišķi, mazāki burbulīši. Šādai plūsmai raksturīgie cepurburbuļi, to izmēra dēļ, ļoti strauji mijiedarbojas ar vidi, to maisa un padara turbulentu. Lielie atsevišķie burbuļi bieži saplūst lielos, cilindriskos burbuļos. [8]

1.3. Alumīnija degazācija un problēmas

Alumīnija kvalitāte ir tieši atkarīga izšķīdušu gāzu koncentrācijas, piemēram ūdeņradis, (skatīt att. 1.2 [9]) kā arī citi nemetāliski piejaukumi un nevēlami elementi (dzelzs, sārnu metāli, u.c.) Metalurģijas industrijas tādēļ ļoti plaši izmanto dažādas degazācijas metodes, lai efektīvāk attīrītu alumīniju. Industrijā strauji popularitāti iegūst metode kurā caur rotējošu asi alumīnijā tiek ievadīta gāze caur rotējošu asi, kuras galā ir rotors. Piemērs šādam degazatoram redzams attēlā 1.3.



1.2. att. Ūdeņraža šķīdība alumīnijā atkarībā no temperatūras [9]



1.3. att. Alumīnija degazators “ALP280 Mobile Degassing and Refining Machine” [10]

Šo metodi izmanto industrijā, jo tiem ir augsta efektivitāte piemaisījumu un izšķīdušu gāzu izvadīšanā no vielas, rotoram strauji maisot izkausēto vielu pie augstiem apgriezieniem var iegūt sīkus gāzes burbuļus kuriem ir ļoti augsts virsmas laukums [1] pret tilpumu [2]. [3]

$$S = 4\pi r^2 \quad [1]$$

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} \quad [2]$$

$$\frac{S}{V} = \frac{4\pi r^2 \cdot 3}{4\pi r^3} = \frac{3}{r} \quad [3]$$

Šiem burbuļiem ceļojot cauri vielai tie absorbē un izvada līdz vielas virsmai nevēlamos piemaisījumus. Svarīgs aspekts veiksmīgai degazācijai ir ne tikai mazs burbuļu izmērs, bet arī ilgs pavadītais laiks vielā, lai tiktu sasniegts ķīmiskais līdzsvars ar izšķīdušo ūdeņraža gāzi burbuļa iekšpusē un izkausētajā alumīnijā. Kopumā var izdalīt vairākus svarīgus nosacījumus lai veiksmīgi tiktu nodrošināta efektīva degazācija.

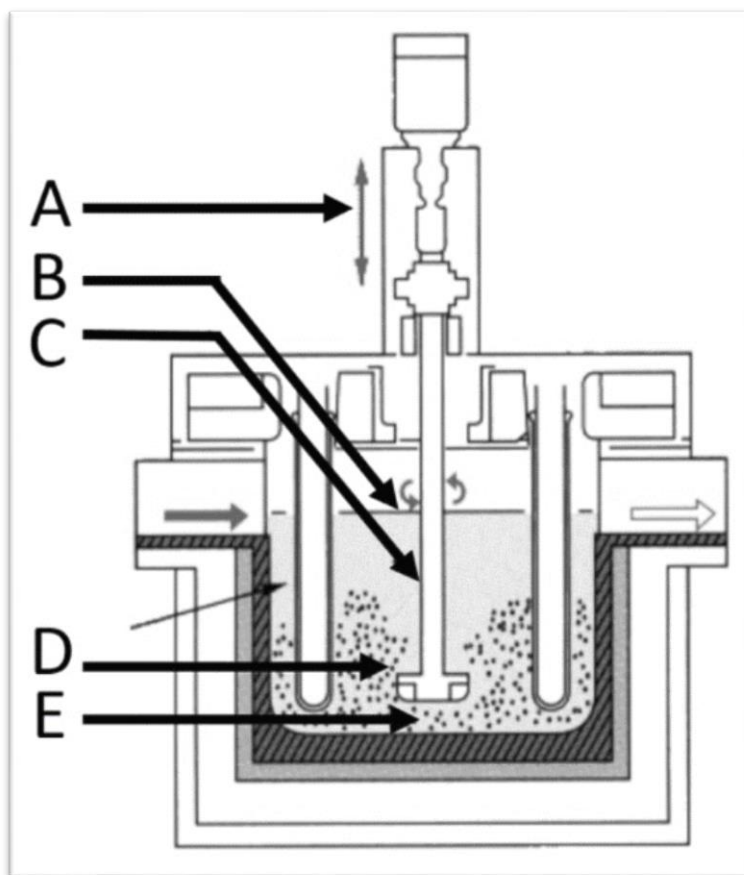
1. Liels darba virsmas laukums (daudz, mazi ievadītās gāzes burbuļi);
2. Vienmērīgs burbuļu sadalījums darba vidē (tiek apstrādāts pēc iespējas lielāks telpas apgabals);
3. Ilgs burbuļu uzturēšanās laiks vielā (nodrošina ūdeņraža koncentrācijas līdzsvaru alumīnijā un gāzes burbuļos);
4. Augsta vielas sajaukšanās darba vidē (tiek apstrādāts pēc iespējas lielāks telpas apgabals);
5. Turbulences nodrošināšana darba vidē (tiek apstrādāts pēc iespējas lielāks telpas apgabals);
6. Virsmas virpuļa samazināšana (netiek salauzta alumīnija oksīda virskārta). [2]

Lai izpildītu visus šos kritērijus ir nepieciešams darbināt grafiņa rotorus pie ļoti augstiem apgriezieniem. Šāds intensīvs darba režīms grauj grafiņa rotora strukturālo integritāti un rada bojājumus, tādējādi, pirmkārt, radot papildus izmaksas mainot iekārtas detaļas, otrkārt rada nevēlamus piemaisījumus alumīnijā. [11] Galvenie trūkumi šādai sistēmai ir norādīti attēlā 1.4.

- A) Sarežģīta motora uzbūve, sajūgs un gāzes ievades sistēmai;
- B) Virsmas svārstības var pārraut virsējo alumīnija oksīda kārtiņu, radot jaunus piemaisījumus;
- C) Grafiņa rotors ir regulāri jāmaina;

D) Grafīta rotora bojājumi piesārņo metālu;

E) Ir novērojami telpas apgabali alumīnijā kur netiek veikta alumīnija degazācija.



1.4. att. Alumīnija degazatora shēma izmantojot grafīta rotoru ar gāzes ievadi [3]

1.4. Burbuļu uzpeldes ātrums

Burbuļu uzpeldes ātrums ir svarīgs parametrs pētot divfāzu plūsmas degazācijā, jo lai sasniegtu līdzsvaru izšķīdušā ūdeņraža koncentrācijai šķidrā alumīnijā un ievadītajos gāzes burbuļos, šiem gāzes burbuļiem ir maksimāli ilgi jāuzturās alumīnijā. Uz gāzes burbuli viskozā vielā darbojas divi spēki:

1. Cēlējspēks, kas ir vienāds ar izspiestā šķidruma masu, šis lielums ir aptuveni konstants, tomēr burbulim peldot uz augšu, samazināsies hidrostatiskais spiediens, tāpēc burbuļa tilpums, un līdz ar to izspiestā šķidruma masa, var tikai pieaugt.
2. Berzes spēks, atkarībā no plūsmas Reynoldsa skaitļa (plūsma ir lamināra vai turbulenta) šis spēks pieaugs vai nu lineāri vai kvadrātiski ar ātrumu, bet pie abiem plūsmas gadījumiem šis lielums pieaugs, pieaugot burbuļa ātrumam.

Kad abi šie spēki ir sasnieguši līdzsvaru, burbulis virzīsies uz augšu ar vienmērīgu ātrumu, kad cēlējspēks ir lielāks nekā berze, piemēram burbuļa uzpeldes sākumā, burbulim paceļoties tam pieaugs ātrums, līdz ar to pieaugs arī berze uz burbuli.

Burbulim sākot kustību augšup ir iespējams novērot inerces īpašības sfēriskam burbulim. Kaut gan burbulis ir pildīts ar gāzi, līdz ar to tā inercei būtu jābūt niecīgai, jo gāzēm ir relatīvi maza masa salīdzinot ar šķidrumiem, tas nepaātrinās ļoti strauji. Iemesls šim meklējams tajā ka burbulim virzoties augšup, apkārtējai vielai, šķidrumam, ir jāplūst lejup un apkārt burbulim. Ja burbulim ir paātrinājums tad arī apkārt esošajai vielai ir jābūt paātrinājumam, lamināras plūsmas gadījumā ir iespējams ļoti precīzi aprakstīt šo plūsmu. Lamināras plūsmas gadījumā, apkārt sfēriskam burbulim, tā inerce ir vienāda ar pusi no izspiestā šķidruma masas, un tā kā šķidruma svars ir vienāds ar cēlējspēku, tad var atrast ka sākotnējais paātrinājums burbulim ir divkārtšots brīvās krišanas paātrinājums, tas ir izskaidrojams ar to ka burbuļa sākotnējais ātrums ir 0, un tā kā berzes spēks kas darbojās uz burbuli ir tieši atkarīgs no tā ātruma vidē, kustības sākumā berzes spēkus var neņemt vērā. Pēc ļoti neilga laika burbulis sasniegs uz to pielikto spēku līdzsvaru, un sasniegs savu gala ātrumu. Pēc tam vienīgās spēku izmaiņas uz burbuli varētu izraisīt tas ka hidrostatiskajam spiedienam samazinoties, pieaugs burbuļa tilpums, un tāpēc arī tā cēlējspēks, bet šo parādību parasti neņem vērā.

Matemātiski, Stoksa berzes spēku, lineāras plūsmas gadījumā, sfērai aprēķina pēc:

$$F = 6\pi \mu R v \quad [1]$$

Kur μ ir dinamiskā viskozitāte, R ir sfēras radiuss, un v ir ātrums. Šis izpildās laminārām plūsmām – kad viskozitātes spēki ir lielāki nekā inerciālie spēki šķidrumā, šo apraksta ar Reinoldsa skaitli:

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad [2]$$

Kur L ir raksturīgais garums, šajā gadījumā to var pieņemt kā sfēras diametru $2R$ un ρ ir šķidruma blīvums. Tiek uzskatīts ka Pilnīgi lamināra plūsma eksistē un ir novērojama kad Reinoldsa skaitlis ir mazāks kā 10, pie lielākām vērtībām plūsma kļūst turbulenta un berzes spēks ir:

$$F_b = \frac{1}{2} \rho v^2 \pi R^2 C_b \quad [3]$$

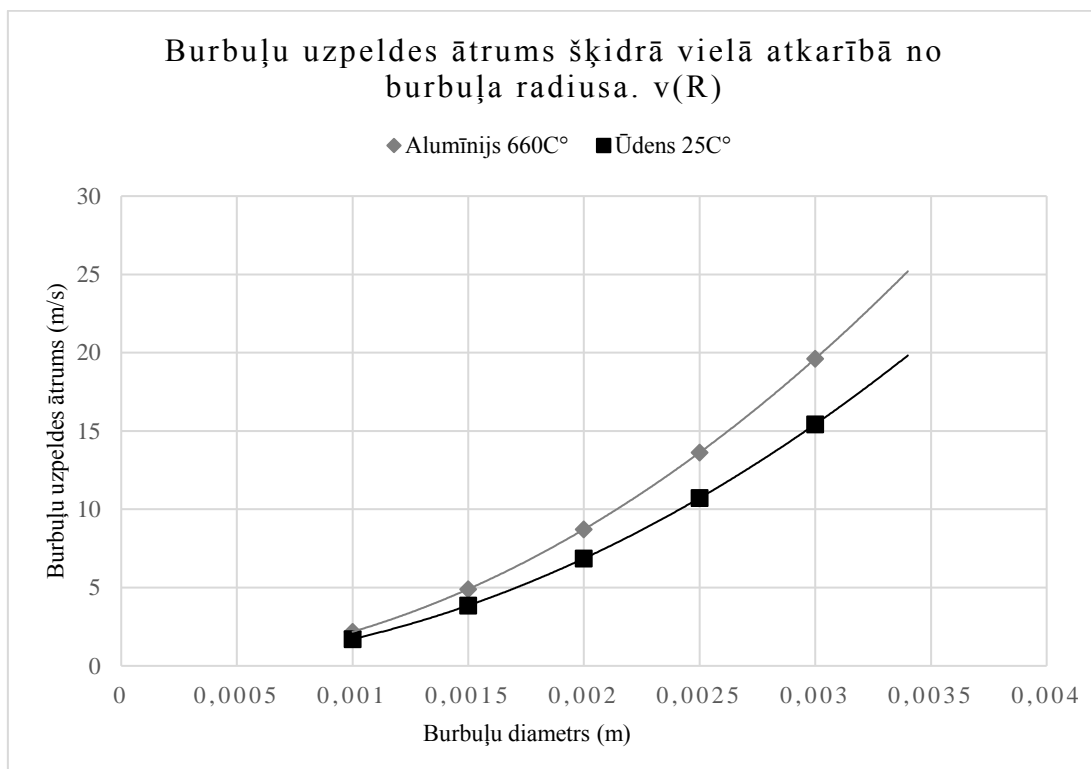
Šeit πR^2 ir sfēras laukums, un C_b ir berzes koeficients, sfērai tas ir aptuveni 0.5, bet šī vērtība ir atkarīga no Reinoldsa skaitļa, šo savienojot ar cēlējspēka vienādojumu:

$$F_c = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho g \quad [4]$$

Šī ir vienkāršota formula kur netiek ņemta vērā burbulī esošā gaisa masa, un g ir brīvās krišanas paātrinājums. Savienojot šos divus spēkus, un rēķinot pēc ātruma, iegūst ka:

$$6\pi \mu R v = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho g \quad [5]$$

$$v = \frac{2}{9} \frac{\rho g R^2}{\mu} \quad [6] \quad [12]$$



1.5 att. Burbuļu uzpeldes ātrums šķidrā Al, un ūdenī atkarībā no burbuļa diametra [6]

1.5. Teilora-Kueta plūsma

Teilora – Kueta plūsma ir plūsma kas ir novērojama starp diviem koncentriskiem cilindriem kas atšķirīgi rotē. Visbiežāk starp vienu rotējošu cilindru vidū, un vienu stacionāru cilindru ārpusē. Vienkāršākajā formā Teilora – Kueta plūsma ir plūsma kas rodas no bīdes spēkiem uz viskozu šķidrumu starp diviem cilindriem, gadījumā kas tiek apskatīts šajā darbā, rotējošs cilindrs sistēmas vidū, un tam koncentrisks cilindrs rotējot tam apkārt. Kā visās Kueta tipa plūsmās, šo plūsmu viecina bīdes spēki uz viskozu šķidrumu no kustībā esošas robežvirsmas. [13] [14]

1.6. Alumīnija un ūdens plūsmu līdzības

Ūdens modeļeksperimenti ir balstīti uz vairāku plūsmu kritēriju līdzības nodrošināšanu. Tabulā 1.1. ir norādīti vairāki spēki kas ir nozīmīgi plūsmām. Lai veiksmīgi atdarinātu izkausētu metālu plūsmu izmantojot ūdens modeļu, visām spēku attiecībām abās sistēmās jābūt vienādiem. Tas nodrošina ka ātrumu sadalījums un attiecības ir līdzīgi kā alumīnija procesos, tā arī ūdens eksperimentā visos telpas apgabalos. Tabulā 1.2. ir parādītas nozīmīgākās spēku attiecības šķidru metālu izliešanas procesos, kas definē bezdimensionālus skaitļus. [15]

1.1. tabula

Nozīmīgi spēki plūsmu pētīšanai [15]

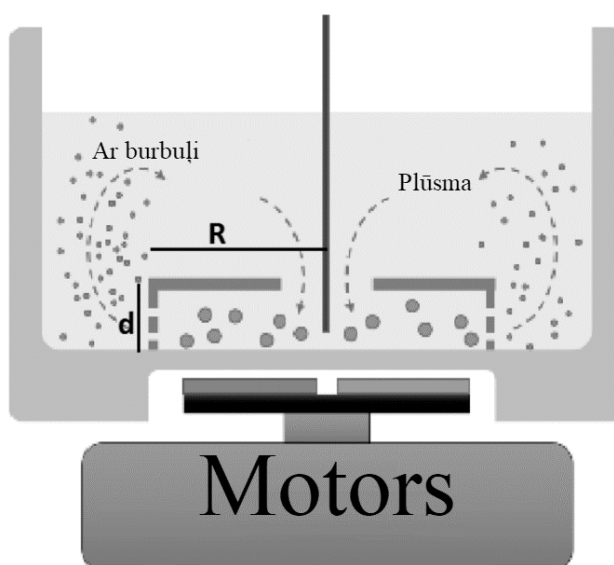
Inerces	$\rho L^2 v^2$	L = raksturīgais izmērs (m) v = ātrums (m/s) ρ = blīvums (kg/m ³) μ = viskozitāte (kg/m*s) g = brīvās krišanas paātrinājums = 9.81 m/s ² σ = virsmas spraigums (N/m) β = termālās izplešanās koef. (m/m*C°) ΔT = temperatūru starpība (C°) ρ = daļiņa, cieta vai gāzveida
Smaguma spēks	$\rho g L^3$	
Cēlējspēks	$(\rho - \rho_p) g L^3$	
Viskozitātes spēks	$\mu L v$	
Termiskais cēlējspēks	$\rho g L^3 \beta \Delta T$	
Virsmas spraigums	σL	

1.2.tabula

Nozīmīgi bezdimensionāli skaitļi plūsmu izpētei [15]

Spēku attiecība	Definīcija	Nosaukums	Parādība
$\frac{\text{Inerces}}{\text{Viskozitātes}}$	$\frac{vL\rho}{\mu}$	Reinoldsa skaitlis	Šķidruma impulss
$\frac{\text{Inerces}}{\text{Smaguma spēks}}$	$\frac{v^2}{gL}$	Frūda skaitlis	Gravitācijas mijiedarbības virzīta plūsma; Virsmas viļņi
$\frac{\text{Inerces}}{\text{Termiskai cēlējspēks}}$	$\frac{v^2}{gL\beta\Delta T}$	Pārveidots Frūda skaitlis	Dabīgā konvekcija
$\frac{\text{Inerces}}{\text{Virsmas spraiguma}}$	$\frac{\rho L v^2}{\sigma}$	Vēbera skaitlis	Burbuļu izveidošanās; Šķidrās strūklas izsmidzināšanās

1.7. Bezkontakta degazatora modelis



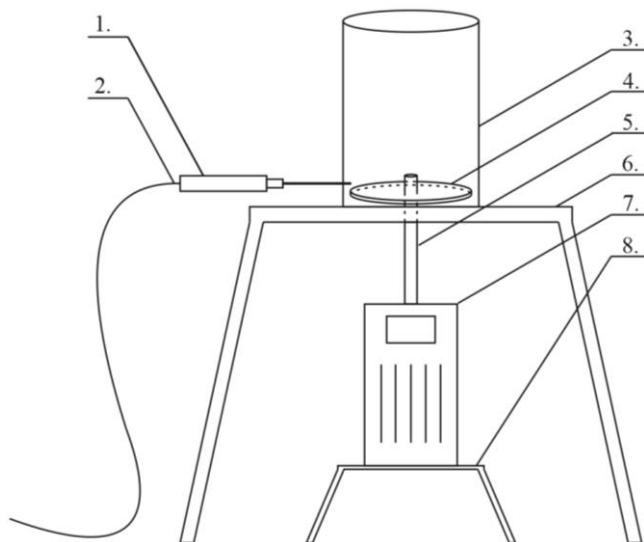
1.6 att. Bezkontakta degazatora modeļa shēma [3]

Attēlā 1.6. apskatītjā bezkontakta degazatora modeļa shēmā ir paredzēts izmantot elektromagnētiski maisīta šķidra alumīnija plūsma burbuļu šķelšanai un alumīnija degazācijai. Sistēma ir izveidota tā lai būtu iespējams realizēt bezkontakta maisīšanas metodi, kas ir nepieciešama lai radītu plūsmu šķidrā alumīnijā, attēlā 1.6. ir atēlota vienkāršota eksperimenta shēma. Šķidrā metāla tvertnei ir īpašas struktūra. Struktūra ir izveidota lai metāls kurā ir lieli argona gāzes burbuļi tiek virzīti caur maziem caurumiem iekšējās struktūras sienās. Šajā brīdī burbuļi tiek pakļauti augstiem bīdes spēkiem un argona burbuļi tiek mehāniski sašķelti mazākos. Vairāki šādi burbuļi ir izveidoti pa perimetru iekšējam kambarim. Plūsma tiek inducēta bez kontakta caur rotējošu patstāvīgu magnētu izkārtojumu. Atkarībā no magnēta rotoru izmēra un vieda dažāda Lorenca spēki un plūsmas var tikt sasniegtas šajā kambarī, bet lielākoties plūsma novērojama šķidrājam metālam. Šī plūsma ir turbulenta jo Lorenca spēks ir lielāks tuvāk tvertnes pamatnei – tuvāk magnētiem. Argons tiek ievadīts cauri tievām trubām iekšējā kambarī tuvu simetrijas asij. Kad gāze ir ievadīta telpas apgabalā ar nepieciešamo plūsmas ātrumu un turbulenci, notiek degazācijas process un mazi argona burbuļi izšķīdina alumīnija esošo ūdeņradi un nogādā to līdz šķidrā metāla virspusei, ārā no sistēmas. Galvenā priekšrocība šādai sistēmai ir ka plūsma tiek inducēta bez nevienas kustīgas detaļas iekšpus uzkarstētajam alumīnijam. [3]

2. EKSPERIMENTĀLĀ DAĻA

2.1. Plānotie eksperimenti

Burbuļu šķelšanās parādības novērošanai bija nepieciešams izveidot modeļeksperimentus kuros tiek izmantots ūdens. Pirmā izveidotā eksperimenta shēma redzama attēlā 2.1.



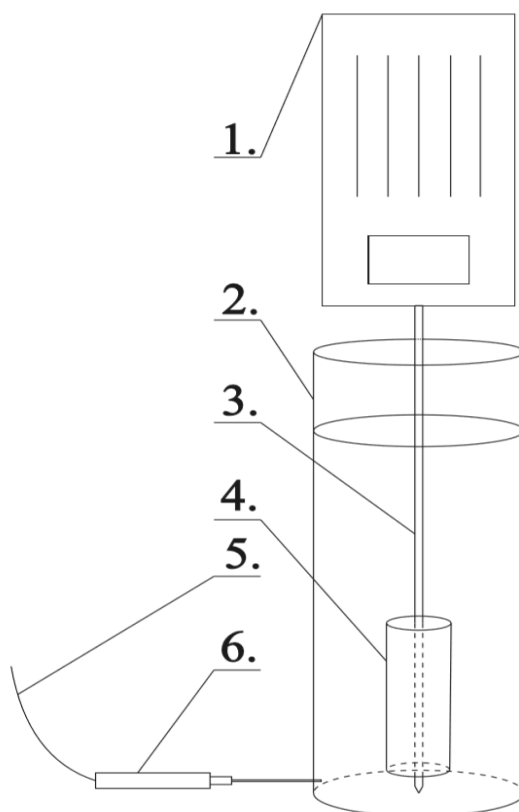
2.1. att. Pirmais izveidotais eksperiments. 1.) Gaisa ievades šļirce; 2.) gaisa ievades sistēma; 3.) ārējais cilindrs; 4.) rotējošs disks tuvu pie cilindra pamatnes; 5.) rotācijas ass; 6.) statīvs cilindram; 7.) maiņfrekvenču motors; 8.) statīvs maiņfrekvenču motoram

Pirmajā eksperimentā (Attēls 2.1.) ūdens plūsmas radīšanai tika izmantots rotējošs disks. (4.) Disks tika novietots tuvu stacionāra cilindra (3.) pamatam, kura iekšējais diametrs bija mazliet lielāks nekā ievietotais disks. Cilindrs tika novietots uz statīva (6.) Tuvu stacionārā cilindra pamatnei tika ievietota gaisa ievades šļirce ar mazu iekšējo diametru, (1.) lai ievadītie burbuļi būtu pēc iespējas mazāki. [16] Gaisa padeve tika nodrošināta caur Latvijas Universitātes Zinātņu Mājas gaisa padeves sistēmu. (2.) Diska rotāciju nodrošināja maiņfrekvences motors (7.), kurš tika savienots ar disku caur, diskam un cilindram koncentrisku rotācijas asi (5.) Maiņfrekvenču motors tika novietots uz atsevišķa statīva (8.)

Šāda eksperimenta uzbūve tika izmantota, jo tā ļoti tuvu pēc darbības līdzinājās attēlā 2.1.. attēlotajam bezkontakta degazatoram. Šis eksperiments pierādīja sevi kā neveiksmīgs degazatora modelis. Burbuļi īsi pēc to ievades nonāca cilindra centrā. [17] Pēc vizuāliem novērojumiem eksperimenta laikā tika konstatēts ka nav novērojama burbuļu šķelšanās. Mēģinot ierosināt burbuļu šķelšanos tika palielināts maiņfrekvenču motora darbības ātrums līdz iekārtas tehniskajām robežām, bet burbuļu šķelšanos neizdevās novērot. Pie lieliem darbības ātrumiem tika novērots arī ļoti dziļš virsmas virpulis, viens variants kā to novērst bija izveidojot

noslēgtu sistēmu, bet tā kā sistēmā bija jāievada gaisa tilpums, noslēgtu sistēmu nebija iespējams izveidot. Lai novērstu virsmas virpuli, uz cilindra augšas tika uzlikts vāks, ar urbumu tā centrā lai ievadītais gaiss spētu izplūst, bet tālāk no cilindra virsmas pamata centra, ūdens līmeņa paaugstināšanās tika ierobežota ar vāka virsmu.

Pirmajai eksperimentālajai ierīcei tika konstatēti arī tehnikas problēmas. Šajā eksperimentā motora rotācijas ass tika ievadīta caur trauka pamatni, lai novērstu mijiedarbības starp asi un ūdeni, kā rezultātā bija jāizveido hermētisks slēgums starp rotora asi un cilindru. Pie maza motora darba ātruma ūdens zudumi caur rotora ass un cilindra savienojuma vietu bija ļoti mazi, vērā neņemami, eksperimenta veikšanu neietekmēja. Palielinot darba ātrumu motoram, ūdens zudumi iepriekšminētajā savienojuma vietā strauji palielinājās, kā arī savienojuma vieta tika paliekoši deformēta, līdz brīdim ka eksperimentu turpināt nebija iespējams turpināt. Otra problēma ar šo eksperimentu bija tajā ka motora rotācijas ass uz kuras bija novietots disks bija fiksēta tikai pie pamatnes. Atkal, palielinot ātrumu, rotācijas ass tika acīmredzami deformēta. Deformācijas rezultātā disks kļuva nestabils un plūsma vairs neatbilda eksperimenta prasībām. (attēlot bezkontakta degazatoru – mijiedarbības ar ūdeni vairs netika ierosinātas tikai caur bīdes spēkiem.)



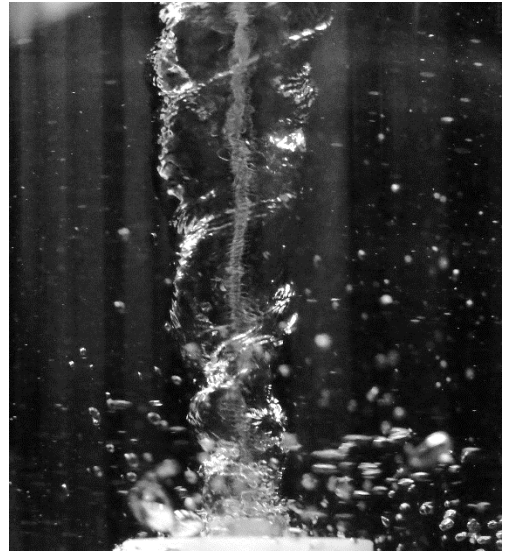
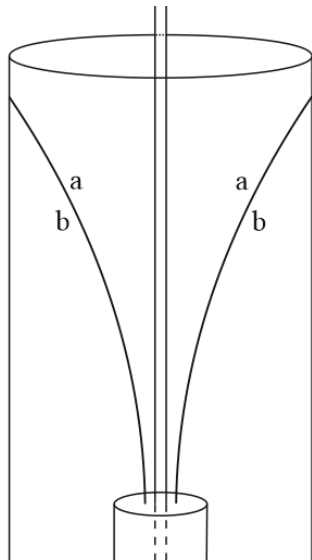
2.2. att. Otrā eksperimenta shēma. 1.) Maiņfrekvenču motors; 2.) ārējais cilindrs; 3.) vītņstienis; 4.) iekšējais cilindrs; 5.) gaisa padeves kanāls; 6.) gaisa ievades šļirce

Otrais izveidotais eksperiments redzams attēlā 2.2. Otrais eksperiments sastāvēja no maiņfrekvenču motora (1.), kurš bija novietots virs augsta stacionāra cilindra. (2.) Motors tika savienots ar iekšējo rotējošo cilindru (4.), izmantojot garu vītņstieni (3.). Lai nodrošinātu gaisa padevi, tika izmantota Latvijas Universitātes Zinātņu mājas gaisa padeves sistēma (5.). Lai ievadīto burbuļu radius būtu pēc iespējas mazāks tika izvēlēta šļirce gaisa ievadei ar ļoti mazu adatas iekšējo diametru (6.). Šāda eksperimenta shēma atbilst Teilora – Kueta plūsmas nosacījumiem. [13] [14]

Šāda modeļeksperimenta shēma tika izvēlēta, jo tā tuvu attēlo attēlā 1.6. redzamo bezkontakta degazatora shēmu. Atšķirībā no iepriekšējā eksperimenta, jau pie relatīvi zemies motora darba ātrumiem, bija novērojama burbuļu šķelšanās. Pēc burbuļu kustības bija iespējams novērot augstu turbulences pakāpi. Salīdzinot burbuļu pacelšanās ātrumu eksperimenta darbības laikā ar burbuļu pacelšanās ātrumu kad iekšējais cilindrs netika griezts, bija novērojams ka tie pacēlās daudz lēnāk eksperimenta darbības laikā. Šo parādību var izskaidrot ar burbuļu šķelšanu, un no tā izrietošu burbuļu raksturīgā izmēra samazināšanos, kā arī ar plūsmas turbulentajām īpašībām cilindra griešanās rezultātā. [2] [12] No šī jau bija iespējams secināt ka vismaz 3 no sešiem efektīvas degazācijas priekšnosacījumiem [2] tiek plinībā vai vismaz daļēji izpildīti. Tālākiem šo parametru novērtējumiem bija nepieciešami kvalitatīvas novērtējuma metodes, bet pēc šiem kritērijiem varēja secināt ka burbuļu šķelšanās parādība ir novērota.

Vēl viena priekšrocība salīdzinot pirmo eksperimentu ar otro, ir tas ka sajā gadījumā darba virsmas (pirmajā – rotējošs disks; otrajā – rotējošs cilindrs) rotācijas ass tiek fiksēta ne tikai pie paša motora, bet arī pie ārējā cilindra pamatnes. Fiksācija apakšā tika nodrošināta ievietojot vītņstieņa apakšējo galu seklā urbumā eksperimenta tvertnes pamatā. Izmantojot šo metodi cilindrs bija stabils arī pie ausgtām darba ātruma vērtībām.

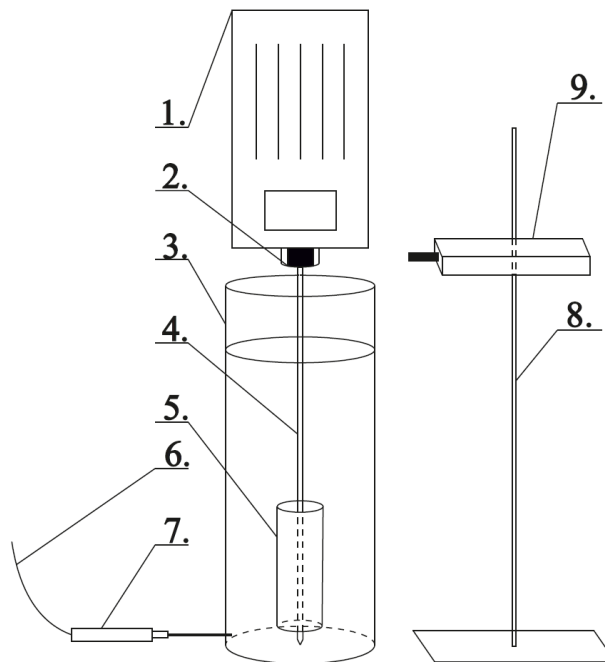
Lai novērstu virsmas virpuļa radītos traucējumus eksperimenta gaitā, tika izvēlēts augsts ārējais cilindrs un salīdzinoši zems iekšējais cilindrs. ($h_a = 500\text{mm}$, $h_i = 130\text{ mm}$) Pie visiem darbības ātrumiem bija novērojama virsmas virpuļa izveidošanās, bet ātrumu arī palielinot līdz lielākajam darbā apskatītajam ātrumam virsmas virpulis tikai sasniedza apakšējā cilindra virsējo pamatu. (skatīt attēlu 2.3., attēlu 2.4.). Eksperimenta gaitā tika pētīta burbuļu šķelšanās starp ārējo un iekšējo cilindru tikai tuvu tvertnes pamatnei, tāpēc šī eksperimenta ietvaros virsmas virpuļa efekti uz burbuļu plūsmu un to šķelšanu var tikt uzskatīti kā nenozīmīgi. Apskatot eksperimentu kopumā, var secināt ka ir nodrošināti visi nosacījumi burbuļu šķelšanās parādībai vielā. [2] Izvērtējot redzamo informāciju, un viecot attiecīgos secinājumus, tika lemts par labu tālākai darbībai ar šo modeļeksperimenta variantu.



2.3 att. Otrā modeļeksperimenta daļēja shēma, ūdens virpuļa novērojums pie augstiem darba ātrumiem. virsma ab) robeža starp abām plūsmas vidēm; a – gaiss, b – ūdens

2.4 att. Fotogrāfija no otrā modeļeksperimenta darbības laikā, redzams virsmas virpulis pie augstiem darba ātrumiem

2.2. Modeļa apraksts



2.5. att. Darbā izmantotā eksperimenta shēma. 1.) Maiņfrekvenču motors; 2.) rotācijas ass; 3.) ārējais cilindrs; 4.) vītņstienis; 5.) iekšējais cilindrs; 6.) gaisa padeves kanāls; 7) gaisa ievades šļirce; 8.) statīvs; 9) bezkontakta tahometrs²

² Bezkontakta tahometrs – Ierīce rotācijas frekvences mērīšanai, bez mehāniska kontakta ar iekārtu.

Darba ietvaros tika izstrādāti vairāki ūdens modeļeksperimenti, kā veiksmīgākais tika atzīts modelis kas redzams attēlā 2.5. Plūsma tika pētīta vertikālā organiskā stikla cilindrā (3.), kurā ir ievietots koncentrisks rotējošs polikarbonāta cilindrs (5.), motoru grieza maiņfrekvenču motors. (1.) Šāds motors tika izmantots lai varētu pētīt plūsmas īpašību izmaiņas pie dažādiem darba ātrumiem. Iekšējais cilindrs tika griezts savienojot to ar motoru izmantojot garu vītņstieni. (4.) Lai cilindrā būtu iespējama divfāzu plūsma (ūdens – gaisa plūsma) tuvu pie ārējā cilindra pamatnes tikai ievadīta gaisa plūsma (6.) savienojot to ar šļirci (7.) kurai ir ļoti šaura ievades adata galā, lai panāktu pēc iespējas mazākus gaisa burbuļus vidē jau pirms šķelšanas. Lai precīzi noteiktu cilindra rotācijas ātrumu, tika izmantots bezkontakta tahometrs UNI-T UT372 (9.), tahometra stabilai fiksācijai tikai izmantots statīvs (8.). Lai palielinātu tahometra precizitāti, uz rotācijas ass tikai uzklāta augsti kontrastējošs pārklājums (2.). Šāda eksperimenta uzbūve atbilst Teilora-Kueta plūsmai. [13] [14]

2.3. Modeļa parametri

2.1. tabula

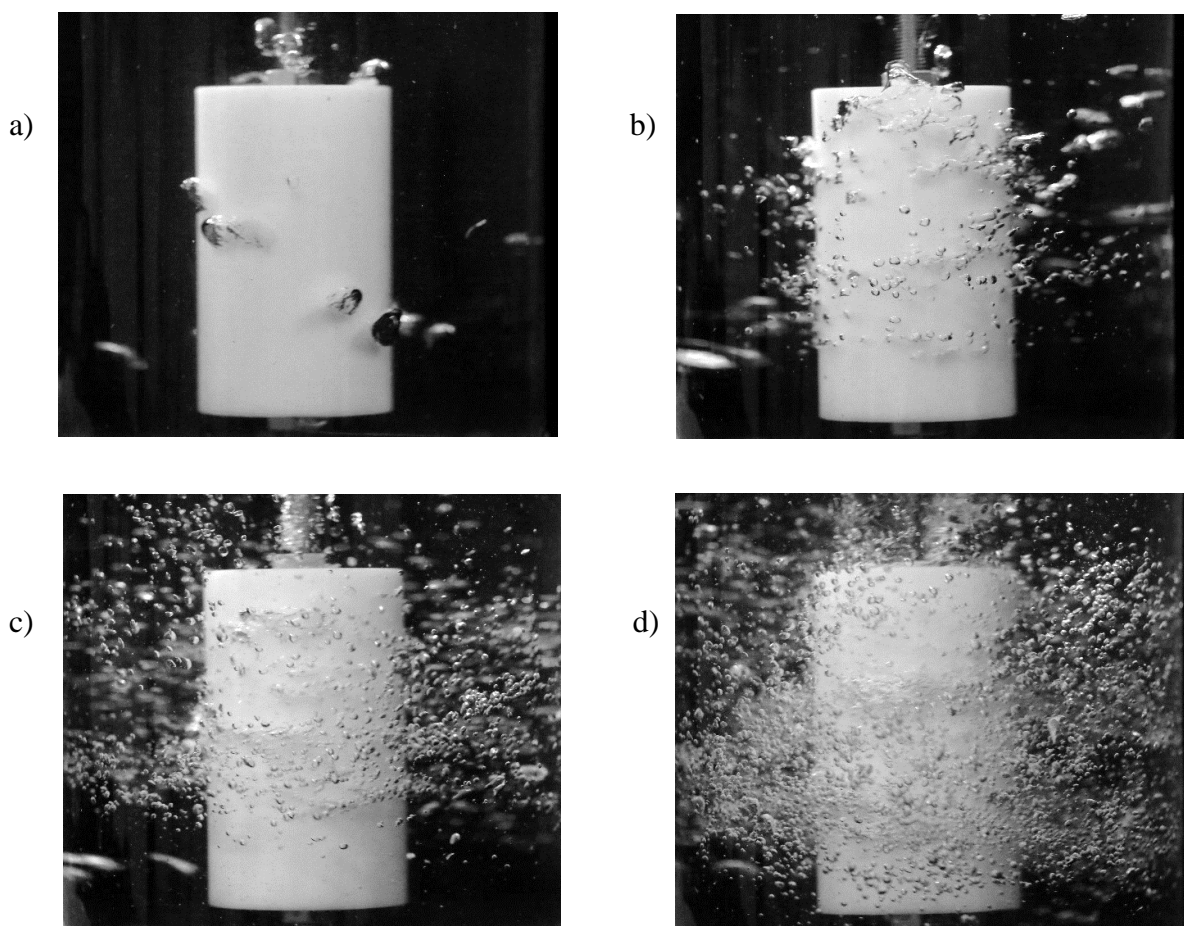
Apkopoti svarīgākie lielumi no ūdens modeļeksperimenta

Modeļa detaļa	Lielums	Vērtība	Apzīmējums un apraksts
Ārējais cilindrs	Ārējais diametrs	200 (mm)	d_a
	Iekšējais diametrs	190 (mm)	d_i
	Augstums	500 (mm)	h
Iekšējais cilindrs	Augstums	130 (mm)	h
	Diametrs	60 (mm)	d
Vītņstienis	Diametrs	10 (mm)	d
	Garums	600 (mm)	h
Gaisa ievades sistēma	Gaisa plūsmas ātrums	0,536 (l/min)	Q
Šļirce	Adata iekšējais diametrs	0,514 (mm)	d_i
Maiņfrekvences motors	Darbības ātrums	2 (Hz) 16 (Hz) 25 (Hz) 32 (Hz)	ν – apgriezīgu frekvence
Tahometrs	Darba diapazons	10-99999 (apgr./min)	Min. un max. darba ātrums

Lai būtu iespējams veikt kvalitatīvus secinājumus, tika noteikti dažādi modeļa parametri un lielumi, šie lielumi ir apkopoti tabulā 2.1.

2.4. Eksperimenta gaita

Lai veiksmīgi pētītu ūdens – burbuļu plūsmas un burbuļu šķelšanos, mērījumi tika veikti pie dažādiem motora darbības ātrumiem. Iekšējā cilindra ātrums tika noteikts izmantojot bezkontakta tahometru. Attēlā 2.6. redzama eksperimenta darbība pie 3 dažādiem darbības ātrumiem, (b, c, d) kā arī redzama burbuļu plūsma kad netika novērota burbuļu šķelšanās – burbuļi visu darbības laiku nebija tādā pašā izmērā kā atraujoties no šļirces (a).



2.6 att. Eksperimenta darbība,; burbuļu šķelšanās pie 3 dažādiem ātrumiem (b – 16 Hz; c – 25 Hz; d – 32 Hz) ierīce pie ļoti maza darba ātruma (a – 2 Hz), netiek novērota burbuļu šķelšanās
Šādi darba ātrumi tika izvēlēti izvērtējot:

- 1.) robežu kur ir iespējams novērot burbuļu šķelšanos,
- 2.) žurnālu publikāciju izvēlētos un izvirzītos darbības ātrumus, [2] [5]

3.) ierīces tehniskos ierobežjumus. (palielinot ierīces darbību virs 32 apgriezieniem sekundē, ierīce kļūst nesatbila un iekšējais cilindrs zaudē savu stabilitāti.

Lai iegūtu precīzus iekārtas darbības ātrumu vērtības tika izmantots bezkontakta tahometrs. Motora rotācijas ātrums ar bezkontakta tahometru tika noteikts pie katra ierīces darbības ātruma. Kvantitatīvu datu ieguvei tika izvēlēts uzņemt fotogrāfiju sērijas. Fotogrāfiju uzņemšanai tika izmantots fotoaparāts FujiFilm X-T1. Fotogrāfiju sērija tika veikta pie katra darbības ātruma. Izvēloties fotoaparāta iestatījumus tika izvērtēti vairāki kritēriji:

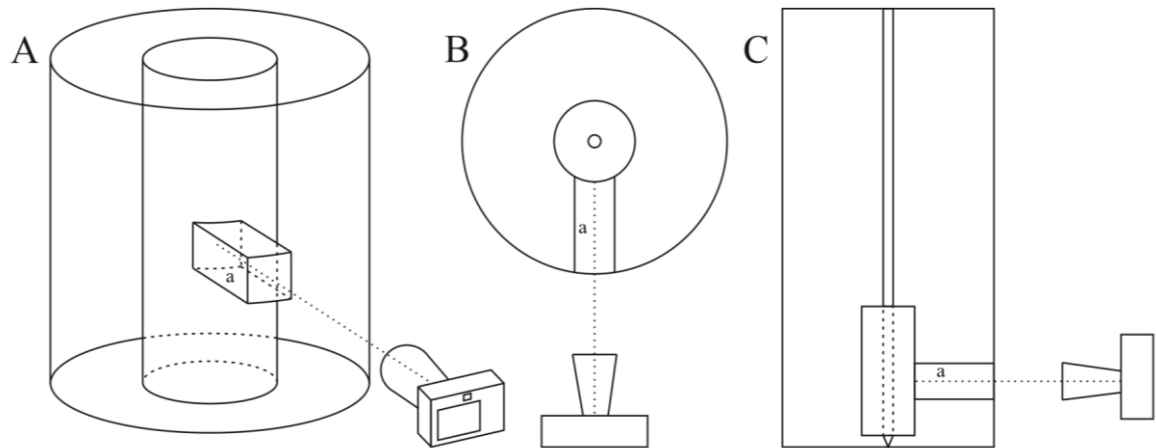
- 1.) attēla izšķirtspēja;
- 2.) ekspozīcijas laiks;
- 3.) apgaismojums;
- 4.) uzņemto kadru skaits sekundē.

Augsta attēla izšķirtspēja ir svarīga lai pēc iespējas sīkākas un precīzākas detaļas būtu iespējams novērot attēlos. Ekspozīcijas laiks šajā gadījumā ir jāizvēlas pēc iespējas zemāks. Zems ekspozīcijas laiks nozīmē ka laikā kamēr kameras gaismas sensors ir atsegts, burbulis veiks pēc iespējas īsāku ceļu, līdz ar to attēlā redzamā burbuļa virsma būs ar precīzu izšķiramo līniju. Izvēloties zemu ekspozīcijas laiku, tika ņemts vērā arī tas ka tas var ietekmēt attēla gaišumu un kontrastu, tāpēc tika izmantots spēcīgs apgaismojums. Izvēlētais ekspozīcijas laiks bija 1/4000 sekundes. Palielinot attēla izšķirtspēju, samazinājās uzņemto kadru skaits sekundē, šī ir ierīces tehnisks ierobežojums (atmiņas ieraksta ātrums). [18]

Lai iegūtu kvantitatīvus datus no eksperimenta fotogrāfijām, tika izmantota brīvpiekluves programma ImageJ. No katras eksperimenta sērijas tika izvēlētas raksturīgākās bildes. Šajās bildēs noteica burbuļu raksturīgos izmērus. Fotogrāfiju analīzes laikā bija redzams ka burbuļu forma nebija perfekta sfēra. Fotogrāfijās burbuļi bija redzami kā elipsoīdi³. Šo parādību var skaidrot ar: 1.) burbuļi plūstot cauri ūdenim tika pakļauti augstiem bīdes spēkiem; 2) ārējā eksperimenta tvertne ir cilindrs, līdz ar to iegūstot attēlus, burbuļu attēli tika kropļoti. Burbuļu izmēriem samazinoties, tie tuvāk attēloja sfēras. Šo var izskaidrot ar to ka burbuļa izmēriem sarūkot palielinās virsmas spraiguma spēks. Lai novērstu attēla kropļošanu, burbuļu raksturlielumi tika mērīti pēc iespējas tuvāk fotoaparātam – tur kur cilindra virsma bija perpendikulāra pret kameru, un līdz 1.5cm no šī punkta horizontāli un vertikāli. Kameras novietojums pret eksperimentu redzams attēlā 2.7., redzams ka dati tika ievākti telpas apgabalā a. Tā formu tuvinājumā var uzskatīt par paralēlskaldni. Līdz ar to telpas apgabals kur tiek pētīti

³ Elipsoīds - Liekta virsma, kuru šķeļot ar plaknēm, iegūst elipses. [21]

burbuļi ir šī paralēlskaldņa tilpums ($x \cdot y \cdot z = V$; $30 \cdot 30 \cdot 65 = 58500 \text{ mm}^3$) paralēlskaldņa trešās malas izmēru pieņem kā attālumu no ārējā cilindra līdz iekšējam cilindram – 65 mm.



2.7. att. Kameras novietojums pret eksperimentālo iekārtu trīs projekcijās A) dimetriska projekcija; B) virsskats; C) sānskats. a) Telpas apgabals kurā tika pētīti burbuļi

3. REZULTĀTI

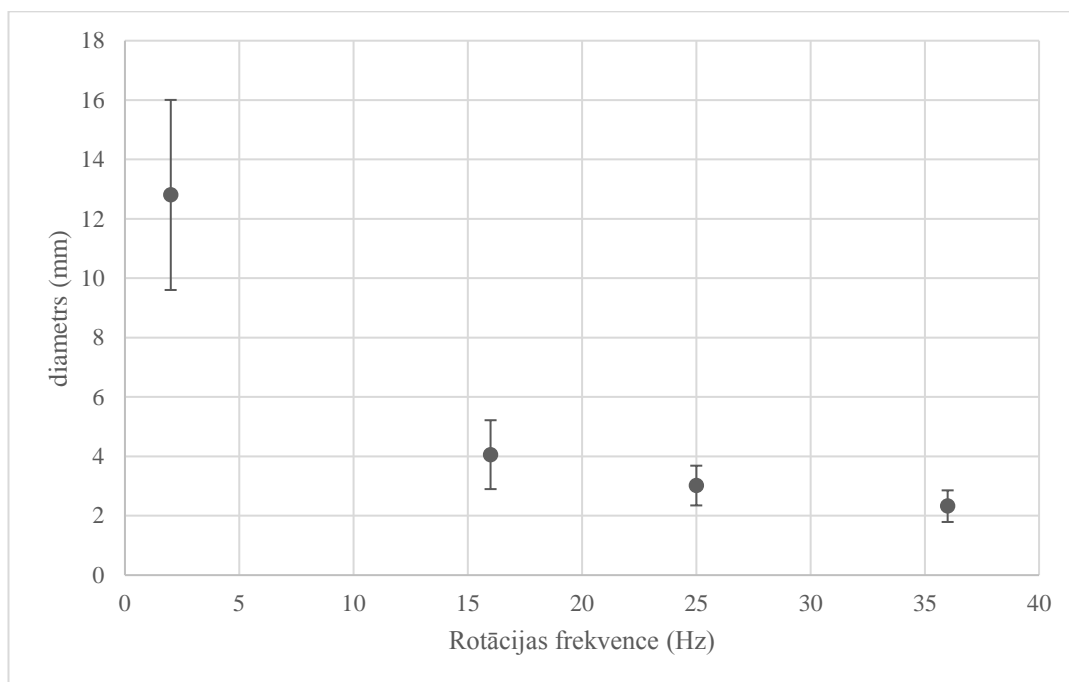
3.1. Burbuļu izmērs

Plūsma eksperimenta gaitā tika mērīta pie četriem dažādiem iekšējā cilindra rotācijas ātrumiem (2, 16, 25, 36 Hz). Pie 2 Hz netika novērota burbuļu šķelšanās. Pie trim augstākajiem rotācijas ātrumiem bija novērojama burbuļu šķelšanās. Burbuļu izmēri pie katra rotācijas ātruma ir apkopoti tabulā 3.1 un attēlā 3.1. kā burbuļu raksturīgais izmērs tika izvēlēts diametrs.

3.1 tabula.

Burbuļu vidējais diametrs pie dažādiem iekšējā rotora ātrumiem

N.p.k	Hz	$d_{\text{vid}}(\text{mm})$	Standartnovirze
1.	2	12.80	3.20
2.	16	4.05	1.16
3.	25	3.01	0.66
4.	36	2.32	0.53



3.1 att. **Burbuļu raksturīgais diametrs pēc iekšējā cilindra rotācijas ātruma (mm/Hz)**

Redzams ka palielinot iekšējā cilindra rotācijas ātrumu, strauji samazinās burbuļu raksturīgais diametrs. Burbuļu izmērs tika noteikts arī kad netika novērota burbuļu šķelšanās.

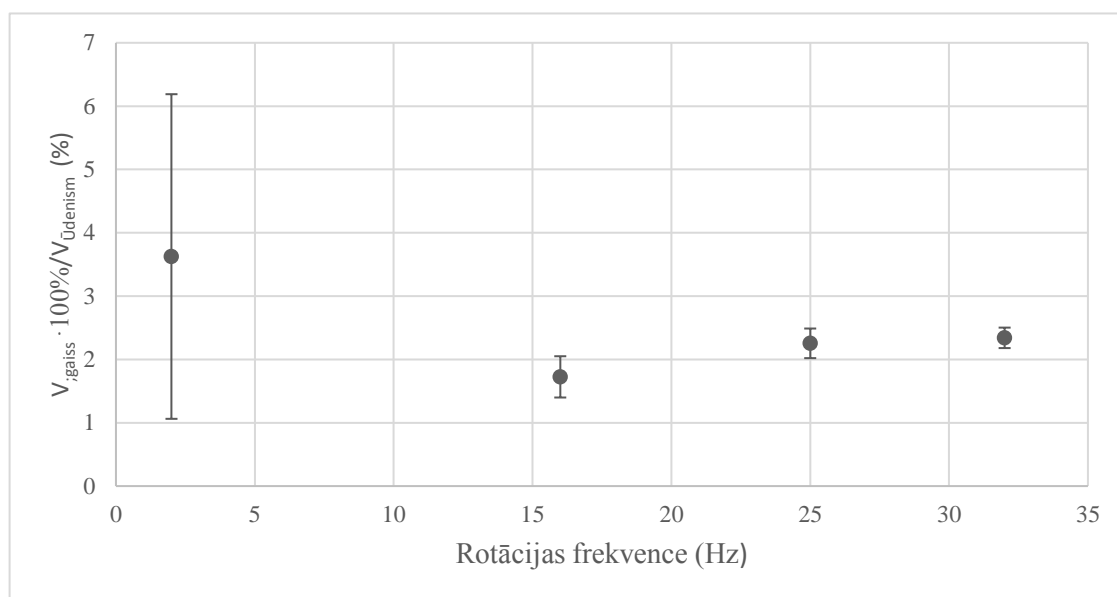
3.2 Gaisa un ūdens attiecība

Eksperimentu sēriju laikā tika ievadīts gaiss ar konstantu plūsmas ātrumu ($Q = 0,514$ l/min). Attiecība gaiss/ūdens plūsmā pieaug, bet ievadītās gaisa plūsmas ātrums nemainās, tad ir iespējams secināt ka burbuļi pavada ilgāku laiku šķidrumā, un ir palielinājies burbuļu uzpeldes laiks līdz šķidruma virsmai. Rezultāti ir apkopoti tabulā 6., un attēloti attēlā 3.2.

3.2. tabula

Gaisa procentuālais daudzums divfāzu plūsmā pie dažādiem rotora ātrumiem

N.p.k.	Rotācijas frekvence (Hz)	Gaisa procentuālais daudzums (%)	Standartnovirze
1.	2	3.62	2.56
2.	16	1.72	0.32
3.	25	2.25	0.23
4.	32	2.34	0.16



3.2 att. Ūdens tilpuma attiecība pret gaisu divfāzu plūsmā pēc iekšējā cilindra rotācijas ātruma (%/Hz)

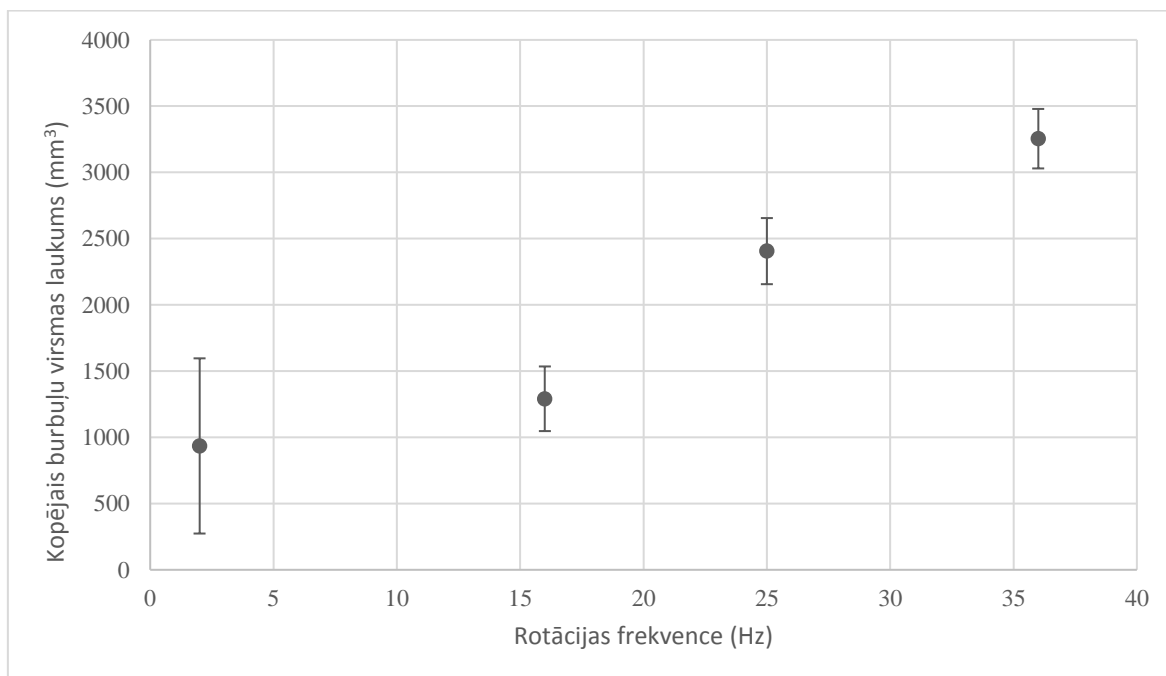
3.3 Burbuļu virsmas laukums

Augsts burbuļu virsmas laukums ir svarīgs degazācijai. Caur gaisa – ūdens virsmu notiek degazācijas process. Palielinot kopējo burbuļu virsmas laukumu tiek paātrināta alumīnijā izšķīdušā ūdeņraža izšķīdināšana ievadītajā gāzē. Tā kā ievadītā gaisa plūsmas ātrums ($Q = 0,514$ l/min) ir nemainīgs, virsmas laukuma palielināšanās var tikt izskaidrota ar: 1) gaisa burbuļu tilpuma attiecības pret ūdens paaugstināšanos; 2) burbuļu šķelšanos. Iegūtie rezultāti apkopoti tabulā 3.3. un attēloti attēlā 3.3. Burbuļu kopējais virsmas laukums.

3.3 tabula

Gaisa burbuļu kopējais tilpums pie dažādām iekšējā rotora rotācijas frekvencēm

N.p.k	Rotācijas frekvence (Hz)	Burbuļu kopējais virsmas laukums (mm^2)	Standartnovirze
1	2	935.07	661.19
2	16	1291.02	243.98
3	25	2405.53	249.44
4	36	3254.37	224.57



3.3 att. Kopējais burbuļu virsmas laukums plūsmā pēc ātruma (mm^2/Hz)

3.4. Bezdimensionālie skaitļi

Svarīgi ir apskatīt bezdimensionālo skaitļu līdzību šķīdram alumīnijam un ūdenim. Skatīt tabulu 3.4. Dati ņemti no darbā izstrādātā eksperimenta parametriem (ūdens modelim) un no ALP280MobileAuto Degassing & Refining Unit (Al) [10], no A. J. Harta prezentācijas par metāla izliešanu [19] un [20].

3.4 tabula

Eksperimentu raksturīgo lielumu un bezdimensionālu skaitļu apkopojums

Vide	Blīvums (kg/m ³)	Dinamiskā viskozitāte (pa*s)	Virsmas spraugums (N/m)	Raksturīgais izmērs (m)	Ātrums (m/s)
Šķidrums Al	2360	0,003	0,90	0,60	6.28
Šķidrums H ₂ O	1000	0,001	0,07	0,19	4.7
Bezdimensionālu skaitļu nosaukums		Formula	Šķidrums Al	Šķidrums H ₂ O	
Reinoldsa skaitlis		$\frac{vL\rho}{\mu}$	29,66*10 ⁶	8,95*10 ⁶	
Vēbera skaitlis		$\frac{\rho Lv^2}{\sigma}$	6,21*10 ⁴	6,03*10 ⁴	

Salīdzinot Reinoldsa skaitļus abām apskatītajām sistēmām var redzēt ka tie atšķirās vairākas reizes, bet iekļaujoties kārtas robežās. Šī atšķirība nav tik būtiska, jo Reinoldsa skaitlis apraksta plūsmas lamināro vai turbulento dabu, augstiem Reinoldsa skaitļiem (> 2000) var pieņemt ka plūsma būs turbulenta. Salīdzinot Vēbera skaitļus, ir redzams ka tie ir ļoti līdzīgi. (3% atšķirība) Vēbera skaitlis nosaka inerces spēku pret virsmas spraiguma spēka attiecību. [15] Tātad ir iespējams secināt ka burbuļu raksturīgie izmēri būs ļoti līdzīgi eksperimentos ar šķidru alumīniju.

4. SECINĀJUMI UN TĀLĀKĀS IESPĒJAS

Galvenais darba mērķis bija izstrādāt ūdens modeļeksperimentu, kurā ir iespējams pētīt ūdens – gaisa divfāzu plūsmas. Šis mērķis ir izpildīts.

Ir veiksmīgi iegūti arī kvantitatīvi dati no darbā izveidotās eksperimentālās iekārtas. Tika parādīts ka izmantojot kustībā esošas robežvirsmas ir iespējams ierosināt burbuļu šķelšanos, to novērot pie dažādiem iekārtas darbības režīmiem, un no iekārtas ir iespējams iegūt kvantitatīvus datus. Ir apzināti arī eksperimentālās iekārtas tehniskās nepilnības.

Galvenie secinājumi par darba ietvaros radīto modeļeksperimentu ir sekojoši:

- Ūdens modeļeksperimentu pielietošana divfāzu plūsmu izpētei ir salīdzinoši sarežģīta, jo šādā iekārtā ir ļoti komplicēti iegūt atgriezenisko saiti datu ieguvei.
- Eksperimentā efektīvākais atrastais veids kā iegūt datus par ūdens – gaisa plūsmu ir izmantojot eksperimentu sērijā uzņemtu fotogrāfiju analītisku apstrādi.
- Ir iegūti burbuļu raksturīgie izmēri pie dažādiem eksperimentālās iekārtas darbības ātrumiem.
- Ūdens modeļeksperimenti ir efektīvs veids kā pētīt, analizēt un pilnveidot bezkontakta alumīnija degazatorus.
- Palielinot rotora rotācijas ātrumu nav novērojama straujš pieaugums gaisa tilpuma attiecībā darba vidē, bet ir novērojams ļoti straujš pieaugums burbuļu kopējā virsmas laukumā.
- Līdzīgie Vēbera skaitļa novērtējumi ļauj secināt ka burbuļu mijiedarbības un raksturīgie izmēri būs līdzīgi šķīdta alumīnija hidrodinamiskos procesos.

Autors uzskata, ka iegūtā informācija un pieredze par ūdens modeļeksperimentiem spēs sekmēt tālāku eksperimentālu darbību bezkontakta degazatoru izpētei un citos metālu hidrodinamiskos procesos. Lai turpinātu pētīt ūdens modeļeksperimentus ir iespējams izmantot ultraskaņas plūsmas mērītājus. Izmantojot ultraskaņas plūsmas mērītājus būtu iespējams noteikt ne tikai iekārtas darbības ātrumu, bet arī ātruma sadalījumu vielā. Tālākos eksperimentos ir iespējams pilnveidot modeļeksperimentus ar rotējošu disku, kombinācijā ar papildus rotējošām struktūrām uz diska burbuļu šķelšanai.

Pateicības

Vēlos izteikt lielu pateicību darba vadītājam Imantam Kaldrem par atsaucību, pozitīvo un motivējošo attieksmi. Vēlos arī pateikties par to, ka atnākot jau bakalaura termiņam klauvējot pie durvīm, viņš uzņēmās bakalaura darba vadīšanu un bija gatavs veltīt tam savu laiku arī vēlās nakts stundās.

Vēlos pateikties arī Latvijas Universitātes Fizikas Institutam par iespēju izstrādāt darbu.

Vēlos izteikt pateicību Rīgas 41. Vidusskolai par pretīmnākšanu stundu grafika izkārtošanā, lai darbs mācot jaunos prātus, nebūtu šķērslis apmeklēt visas lekcijas, šajos piecos semestros. It īpaši mēnešos kur biju spiests būt ļoti kaprīzs pret stundu grafiku.

Paldies latviešu studentu korporācijai Lettonia, par atbalstu un motivāciju bakalaura darba izstrādes laikā.

Milzīgs paldies manai sievai Annai par milzīgu atbalstu laikā kad visa enerģija tika veltīta studijām un darbam, nekad neatteica palīdzību kā pārbaudot rakstu darbu kvalitāti, tā ikdienišķās lietās un morāli atbalstīja.

Izmantotā literatūra un avoti.

- [1] Premier Die Casting Company, «<https://diecasting.com/>,» Premier Die Casting Company, [Tiešsaiste]. Available: <https://diecasting.com/resource-center/determining-manufacturing-requirements.php>. [Piekļūts 31 05 2019].
- [2] Camacho-Martínez J, R. Zenit-Camachod, A. Juárez-Hernández, un G. Trápaga-Martíneza, «Physical Modelling of an Aluminium Degassing Operation with Rotating Impellers - A Comparative Hydrodynamic Analysis,» *Materials and Manufacturing Processes*, sēj. 25, nr. 7, pp. 581-591, 2010.
- [3] I. Kaldre, A. Bojarevics, T. Beinerts, R. Baranovskis, R. Nikoluskins, M. Milgrāvis un M. Kalvāns, «Contactless electromagnetic method for aluminium degassing,» *Materials Science and Engineering*, 424, (2018) 012057.
- [4] Big River Steel, «www.youtube.com,» Big River Steel, 2 Maijs 2017. [Tiešsaiste]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=M6Mus59DsBU&t=6s>. [Piekļūts 27 Maijs 2019].
- [5] A. Bojarevics, T. Beinerts, Y. Gelfgat un I. Kaldre, «Permanent magnet centrifugal pump for liquid aluminium stirring», *International Journal of Cast metal research* sēj. 29, nr. 3, 154-157 2016.
- [6] A. Bojarevičs, R. Baranovskis, I. Kaldre, M. Milgrāvis un T. Beinerts, «Two cylinder permanent magnet stirrer for liquid metals,» *Materials Science and Engineering*, p. 228, 2017.
- [7] Ishii M., Hibiki T., *Thermo-Fluid Dynamics of Two-Phase Flow*, Second Edition, New York: Springer, 2010.
- [8] Akimi S., Isao K., «Bubble Flow,» DOI: 10.1615/AtoZ.b.bubble_flow 2010.
- [9] V. S. Balyaev, N. V. Baranov, Y. I. Gubanov, P. B. Kulikov, M. E. Lisiv, A. A. Bezrukikh, V. V. Leonov, I. V. Kirko un P. N. Kopsteva, «Saturation dynamics of aluminum alloys with hydrogen,» sēj. 12, 2017.
- [10] «http://alupure.com/en_product_show-189.html,» 2019. [Tiešsaiste] [Piekļūts 27 Maijs 2019].
- [11] M. Shawkat, C. Ching un M. Shoukri, «Bubble and liquid turbulence characteristics of bubbly flow in a large diameter vertical pipe,» *International Journal of Multiphase Flow*, sēj. 34, 2008.

- [12] T. Khan, «<https://physics.stackexchange.com/q/275614>,» 21 08 2016. [Tiešsaiste]. Available: <https://physics.stackexchange.com/q/275614>. [Piekļūts 27 05 2019].
- [13] F. M. White, Fluid Mechanics, 4th edition, New York: McGrawHill, 1999.
- [14] S. Muller, R. Larson un E. Shaqfeh, «A purely elastic transition in Taylor-Couette flow,» *Rheologica Acta*, sēj. 28, nr. 6, pp. 499-503, 1989.
- [15] B. G. Thomas, «FUNDAMENTALS OF CONTINUOUS CASTING: MODELING,» %1 *Making, Shaping, and Treating of Steel*, Illinois, AISE Steel Found, 2000.
- [16] R. S. Amano, A. A. T. Alkhalidi, «FACTOR AFFECTING BUBBLE CREATION AND BUBBLE SIZE,» 2011.
- [17] P. Davidson, An Introduction to Magnetohydrodynamics, Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [18] SLR photography guide, «<https://www.slrphotographyguide.com/shutter-speed/>,» SLR photography guide, [Tiešsaiste]. Available: <https://www.slrphotographyguide.com/shutter-speed/>. [Piekļūts 1 Jūnijs 2019].
- [19] A. J. Hart, «Casting (MIT 2.008x Lecture Slides),» Massachusetts, 2016.
- [20] M. A. Barron. D. Y. Miranda, L. A. Maldonado, «Nitrogen Injection in Molten Aluminum in a,» sēj. 6, nr. 685-695, 2018.
- [21] Tēzauris, «<https://tezaurs.lv/#/sv/elipso%C4%ABds>,» [Tiešsaiste]. Available: <https://tezaurs.lv/#/sv/elipso%C4%ABds>. [Piekļūts 2 06 2019].

Bakalaura darbs „Divfāzu plūsmas modeļeksperimenti metlaurģijas procesu hidrodinamikas izpētei” izstrādāts Latvijas Universitātes Fizikas, matemātikas un optometrijas fakultātē.

Ar savu parakstu apliecinu, ka pētījums veikts patstāvīgi, izmantoti tikai tajā norādītie informācijas avoti un iesniegtā darba elektroniskā kopija atbilst izdrukai.

Autors: _____ /Arvīds Viesturs Vimba/

Rekomendēju/nerekomendēju darbu aizstāvēšanai

Vadītājs: Dr. Phys. Imants Kaldre _____ 03.06.2019.

Recenzents: Mag. Phys. Valters Dzelme

Darbs iesniegts Fizikas nodaļā 03.06.2019.

Dekāna pilnvarotā persona: _____

Darbs aizstāvēts bakalaura gala pārbaudījuma komisijas sēdē

____.____.2019. prot. Nr. _____, vērtējums _____

Komisijas sekretārs: _____