

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS
ŠILUMOS IR ATOMO ENERGETIKOS KATEDRA**

Edgaras Šmigelskis

**Vandens įpurškimo pritaikymas atominių stočių apsaugos sistemose ir pernašos
procesų modeliavimas**

Magistro baigiamasis darbas

**Kaunas
2017**

ŠILUMOS IR ATOMO ENERGETIKOS KATEDRA

Magistro baigiamasis darbas

**VANDENS ĮPURŠKIMO PRITAIKYMAS ATOMINIŲ STOČIŲ APSAUGOS
SISTEMOSE IR PERNAŠOS PROCESŲ MODELIAVIMAS**

Darbo autorius E. Šmigelskis (MDM– 5/2 gr.)

Vadovas Prof. habil. dr. G. Miliauskas

Recenzentas Prof. habil. dr. S. Šinkūnas

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS**

Tvirtinu: _____
Šilumos ir atomo energetikos (parašas, data)
katedros vedėjas **Doc. E. Puida**
_____ (vardas, pavardė)

**MAGISTRANTŪROS UNIVERSITETINIŲ STUDIJŲ BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS
Studijų programa BRANDUOLINĖ ENERGETIKA**

Magistrantūros studijų, kurias baigus įgyjamas magistro kvalifikacinis laipsnis, baigiamasis darbas yra mokslinio tiriamojo arba taikomojo pobūdžio darbas (projektas). Jam atlikti ir apginti skiriama 30 kreditų. Šiuo darbu studentas parodo, kad yra pagilinęs ir papildęs pagrindinėse studijose įgytas žinias, turi pakankamai gebėjimų formuluoti ir spręsti aktualią problemą, turėdamas ribotą ir (arba) prieštaringą informaciją, geba savarankiškai atlikti mokslinius ar taikomuosius tyrimus ir tinkamai interpretuoti duomenis. Taip pat jis parodo, kad yra kūrybingas, geba taikyti fundamentines mokslo žinias, išmano socialinės bei komercinės aplinkos, teisės aktų ir finansines galimybes, turi informacijos šaltinių paieškos ir kvalifikuotos jų analizės, skaičiuojamųjų metodų ir specializuotos programinės įrangos bei bendrosios paskirties informacinių technologijų naudojimo, taisyklingos kalbos vartosenos įgūdžių, geba tinkamai formuluoti išvadas.

1. Darbo tema Vandens įpurškimo pritaikymas atominių stočių apsaugos sistemose ir pernašos procesų modeliavimas

Patvirtinta 2016 m. gruodžio d. dekanų įsakymu Nr. gruodžio 8 d. Nr. V 25-11-20

2. Darbo tikslas: Atlikti išpurkšto vandens pernašos procesų tyrimą ir nustatyti skaičiavimų optimizavimo galimybes.

3. Darbo struktūra:

3.1 Literatūros tyrimas

3.2 Lašelių ŠMM pernašos procesų modeliavimas

3.3 Rezultatai

3.4 Išvados

3.5 Literatūros sąrašas

4. Reikalavimai ir sąlygos: rengiant baigiamąjį darbą prisilaikyti magistrinio baigiamojo darbo metodinių nurodymų. Įsisavinti skysčio lašelių šilumos ir masės mainų modeliavimo balansiniu metodu principus. Skaitiniams vandens lašelio faziniams tyrimams pritaikyti ŠAE katedroje vystomą skaitinio tyrimo programą „LAŠAS“.

Užbaigto darbo pateikimo terminas: 2016 m. gruodžio mėn. 20 d.

6. Ši užduotis yra neatskiriama baigiamojo darbo dalis.

Išduota studentui

Užduotį gavau Edgaras Šmigelskis 2015.02.02
(studento vardas, pavardė) (parašas) (data)

Vadovas Prof. habil. dr. Gintautas Miliauskas 2015.02.02
(pareigos, vardas, pavardė) (parašas) (data)

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
MECHANIKOS INŽINERIJOS IR DIZAINO FAKULTETAS
ŠILUMOS IR ATOMO ENERGETIKOS KATEDRA**

Magistro baigiamasis darbas

**VANDENS IŠPURŠKIMO PANAUDOJIMAS ATOMINIŲ STOČIŲ APSAUGOS
SISTEMOSE IR PERNAŠOS PROCESŲ MODELIAVIMAS**

Edgaras Šmigelskis

Atominių stočių apsauginis kiautas yra paskutinis saugos barjeras, ribojantis radioaktyviųjų medžiagų nutekėjimą į aplinką potencialios avarijos atveju. Šilumnešio praradimo atveju į apsauginio kiauto atmosferą gali būti išmetama didelis vandens garo kiekis, kuris sudaro prielaidas staiga išaugti apsauginio kiauto slėgiui bei temperatūrai. Apsauginio kiauto tvarumas yra baigtinis, tad jei vidinės atmosferos parametrai perkopia projektinius, gali būti prarastas apsauginio kiauto sandarumas. Vandens išpurškimo sistemos panaudojimas kiauto parametrams reguliuoti ir kontroliuoti yra įprasta atominių stočių strategija.

Vandens išpurškimas apsauginio kiauto atmosferoje iššaukia sudėtingus, tarpusavyje glaudžiai susijusius terminius ir hidrodinaminius procesus. Šių procesų detali kompleksinė analizė labai sudėtinga ir daug laiko reikalaujanti, dėl vykstančių pereinamųjų šilumokaitos ir fazinių virsmų dvifazėje vandens lašelių ir drėgnų dujų apsauginio kiauto sistemoje. Būtina ir yra patogu šiuos sudėtingus procesus ištirti pradžioje atskirai, pažinti jų dėsningumus, o po to atsižvelgti į jų tarpusavio sąveiką nuosekliai sudėtingumo prasme plečiant kraštines šių procesų vyksmo sąlygas. Šiame darbe siekiama pažinti vykstančius šilumos ir masės pernašos procesus tarp išpurkšto skysčio lašelių ir apsauginio kiauto atmosferos dujų drėgno mišinio. Daroma prielaida, jog į dujas įpurškiamas palyginti nedidelis vandens srautas, todėl lašelių šilumokaitos ir fazinių virsmų įtaka dujų mišinio parametrams paneigta. Tai leidžia išgryninti dujų parametrų įtaką lašelių šilumokaitai ir faziniams virsmams ir išryškinti pagrindinius juos apibūrinančius faktorius. Tyrimo rezultatais išryškinta dujų temperatūros ir drėgnumo bei lašelių šildymo būdo svarba lašelių paviršiuje vykstantiems faziniams virsmams.

Apsauginis kiautas, vandens išpurškimas, lašeliai, kondensacija, garavimas

**KAUNAS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING AND DESIGN
DEPARTMENT OF THERMAL AND NUCLEAR ENERGY**

Master final work

**USAGE OF WATER SPRAY FOR NUCLEAR POWER PLANT SAFETY SYSTEMS AND
MODELLING OF TRANSFER PROCESSES**

Edgaras Smigelskis

Containment of nuclear power plants is the last safety barrier, limiting the outflow of radioactive substances into the environment in case of potential accident. During the Loss of coolant accident (LOCA) pressure and temperature of the containment atmosphere rapidly rise due to a large quantity of water vapor being dumped. If the parameters exceed design basis, the integrity of containment can be lost. The usage of the water sprays to monitor and control containment atmosphere parameters is a common strategy of the nuclear power stations.

A water atomization in the containment causes multiple, closely-related thermal and hydrodynamic processes. A detailed analysis of these complex processes is very complex and requires a lot of time, because of the ongoing transitional phase transitions between a water droplet and a containment gas mixture. It is necessary and convenient to examine these complex processes individually. After getting a clear understanding of their patterns, it is possible to take into account the complexity of their interactions in a consistent sense of expanding the boundary conditions. This work is aimed at understanding the underlying processes of heat and mass transfer between a liquid droplet and a humid gas mixture of containment atmosphere. It is assumed that the injected water flow in the containment gas mixture is relatively small. Therefore, the influence of the droplet to the parameters of a humid gas mixture is neglected and assumed that they are constant. This allows to bring to the light the key factors which define the influence of humid gas mixture parameters to a droplet heat and mass transfer processes. The results of the study highlight the importance of the gas temperature, humidity and heating manner to the transitional phase transition on the droplet surface.

Containment, water spray, droplet, condensation, evaporation.

TURINYS

ĮVADAS	12
1 LITERATŪROS TYRIMAS	14
1.1 Vandens įpurškimo sistemos atominių stočių apsauginiame kiaute	14
1.1.1 Vandens įpurškimo sistemos aprašymas	16
1.1.1.1 Vandens įpurškimo sistema atominėje stotyje su PWR reaktoriumi	16
1.1.1.2 Vandens įpurškimo sistema atominėje stotyse su VVER reaktoriumi.....	18
1.2 Reiškiniai užimantys vietą apsauginiame kiaute po vandens išpurškimo	20
1.2.1 Atomizacijos zona – lašelių susidūrimai	21
1.2.2 Išpurkšto skysčio termodinaminis poveikis apsauginiame kiaute.....	23
1.2.3 Išpurkšto skysčio dinaminis poveikis apsauginiame kiaute	24
1.2.3.1 Dujų maišymosi suintensyvėjimas	24
1.2.3.2 Skilimo produktų šalinimas iš apsauginio kiauto.....	25
2 LAŠELIŲ ŠMM PERNAŠOS PROCESŲ MODELIAVIMAS	28
2.1 Metodinė dalis.....	28
2.2 Matematinis modeliavimas	29
2.2.1 Garo srauto modelis.....	29
2.2.1 Šilumos srautų lašelio paviršiuje balansas	34
2.2.2 Lašelio šildymo modelis.....	35
2.2.3 Šilumokaitos lašelyje modelis	39
2.3 Skaitinio tyrimo iteracinė schema.....	40
3 REZULTATAI	43
3.1 Tyrimo uždaviniai ir ribinės sąlygos.....	43
3.2 Skaitinio tyrimo optimizavimo galimybės.....	43
3.3 Lašelio slydimo greičio įtaka vandens lašelių šilumos ir masės mainams	51
3.4 Dujų mišinio temperatūros įtaka vandens lašelių šilumos ir masės mainams	58
4 IŠVADOS	66
5 LITERATŪROS SĄRAŠAS	67
6 PRIEDAI	77

PAVEIKSLĖLIŲ SARAŠAS

1.1 pav. Suslėgto vandens reaktoriaus (PWR) apsauginio kiauto vandens įpurškimo sistema [34]. GG – garo generatorius.....	14
1.2 pav. Prancūzų PWR reaktoriaus purkštukų žiedai ir jų padengiamų zonų vaizdai iš šono ir viršaus [53].	16
1.3 pav. Purkštukas SPRACO 1713A (Lechler 373.084.17.BN) [53].	17
1.4 pav. Eksperimentinis lašelio dydžio pasiskirstymas [53].	18
1.5 pav. Suslėgto vandens reaktoriaus VVER vandens išpurškimo sistemos dispergatorius.	19
1.6 pav. Principinė purkštukų atliekamų funkcijų apsauginiame kiaute schema [38].	20
1.7 pav. Pagrindinės lašelio kelio zonos [38].	21
1.8 pav. Dviejų lašelių susiliejinimo proceso principinė schema [77].	22
1.9 pav. Dviejų lašelių susidarymo schema, dalinai susiliejant dvejiems lašeliams [77].	22
1.10 pav. Lašelių pasidalinimo į daugiau nei du lašelius schema [77].	23
1.11 pav. Vandens radiolizės reakcijos [84].	24
2.1 pav. Lašelio šilumokaitos ir fazinių virsmų geometrinė interpretacija.	28
2.2 pav. Bendroji dalinio slėgio difuziniame sluoksnyje kitimo schema, garavimo ir kondensacijos režimų atvejais.	30
2.3 pav. Vandens garo dalinio slėgio kitimo difuziniame sluoksnyje schema, garavimo ir kondensacijos režimų atvejais.	31
2.4 pav. Bendroji garo srauto lašelio paviršiuje schema.	32
2.5 pav. T_R temperatūros kitimo diagrama, aprašant ją $T_R(\tau)$ funkcija. a – atomizacija; τ_f – lašelio gyvavimo laikas, [s].	33
2.6 pav. Pusiausviro garavimo šilumos srautų schema.	34
2.7 pav. Į lašelį krintančios spinduliuotės srauto sklidimo lašelyje schema.	35
2.8 pav. Konvekcinio šilumos srauto schema.	36
2.9 pav. „1/3“ taisyklės interpretacijos lašelio geometrijoje schema.	38
2.10 pav. Lokalinio suminio šilumos srauto apskaičiavimo interpretacijos lašelyje schema.	39
2.11 pav. Interpretuojamos bematės laiko skalės schema.	41
2.12 pav. Lašelio koordinatės η interpretacijos schema.	42
3.1 pav. Lašelių skersmens pasiskirstymo funkcijų palyginimas 20cm nuo purkštuko [53].	43
3.2 pav. Vandens lašelių paviršiaus temperatūros kitimas iki pusiausviro garavimo temperatūros realaus laiko mastelyje. $2R_0 \cdot 10^6$, m: (1)30, (2)50, (3)100, (4)150, (5)200; T_0 , K: (a) 278, (b) 343.	44
3.3 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros T_R kitimas iki pusiausviro garavimo temperatūros T_e , išreikštas Furje kriterijaus laiko mastelyje. $2R_0 \cdot 10^6$, m: (1)30, (2)50, (3)100, (4)150, (5)200; T_0 , K: (a) 278, (b) 343.	45
3.4 pav. Energetinių parametrų $P_q(Fo)$ funkcijų grafikai šalto ir karšto vandens išpurškimo atvejais. $2R_0 \cdot 10^6$, m: (1)30, (2)50, (3)100, (4)150, (5)200; T_0 , K: (a, c, e) 278, (b, d, f) 343.	46
3.5 pav. Normuoti šilumos srautai lašelių paviršiuje, išreikšti Furje kriterijaus laiko mastelyje. T_0 , K: (a, c) 278, (b, d) 343.	47
3.6 pav. Garo srauto tankio kitimas ant šalto (a) ir karšto (b) vandens lašelių paviršiaus, išreikštas Furje kriterijaus laiko mastelyje. $2R_0 \cdot 10^6$, m: (1)30, (2)50, (3)100, (4)150, (5)200; T_0 , K: (a) 278, (b) 343.	48
3.7 pav. Vandens lašelių fazinių virsmų normuoti parametrai, išreikšti Furje kriterijaus laiko masteliu. T_0 , K: (1) 278, (2) 343.	49
3.8 pav. Šalto ir karšto vandens lašelių normuotos masės $\bar{M}(Fo)$ funkcija. $2R_0 \cdot 10^6$, m: (1)30, (2)50, (3)100, (4)150, (5)200; T_0 , K: (a) 278, (b) 343.	50
3.9 pav. Energinų srautų indėlio lašelio energiniame balanse dinamika. Re_0 : (1) 10, (2) 20, (3) 50, (4) 100; $T_0=278K$; $2R_0=100\mu m$; $T_d=373K$	51
3.10 pav. Lašelio slydimo greičio įtaka vandens lašelio masės ir dispersiškumo kitimui fazinių virsmų metu. Re_0 : (1) 10, (2) 20, (3) 50, (4) 100; $T_0=278K$; $2R_0=100\mu m$; $T_d=373K$	52

3.11 pav. Lašelio slydimo greičio įtaka lašelio fazinių virsmų šilumos srautui ir garo srauto tankiui kondensaciniame ir garavimo fazinių virsmų režimuose. Re_0 : (1) 10, (2) 20, (3) 50, (4) 100; $T_0=278K$; $2R_0=100\mu m$; $T_d=373K$.	53
3.12 pav. Lašelio slydimo greičio įtaka išoriniai (a) ir vidinei (b) konvekcijai. Re_0 : (1) 10, (2) 20, (3) 50, (4) 100; $T_0=278K$; $2R_0=100\mu m$; $T_d=373K$.	53
3.13 pav. Vandens lašelių slydimo greičio slopimas dujų mišinyje. Re_0 : (1) 10, (2) 20, (3) 50, (4) 100; $T_0=278K$; $2R_0=100\mu m$; $T_d=373K$.	54
3.14 pav. Lašelio slydimo greičio įtaka Nuselto kriterijui. Re_0 : (1) 10, (2) 20, (3) 50, (4) 100; $T_0=278K$; $2R_0=100\mu m$; $T_d=373K$.	54
3.15 pav. Lašelio paviršiaus slydimo greičio intensyvumo įtaka lašelio paviršiaus temperatūrai. Re_0 : (1) 10, (2) 20, (3) 50, (4) 100; $T_0=278K$; $2R_0=100\mu m$; $T_d=373K$.	55
3.16 pav. Lašelio slydimo greičio įtaka efektyviojo laidumo parametru. Re_0 : (1) 10, (2) 20, (3) 50, (4) 100; $T_0=278K$; $2R_0=100\mu m$; $T_d=373K$.	56
3.17 pav. Lašelio slydimo greičio įtaka Stefano hidrodinaminio srauto pataisos funkcijai. Re_0 : (1) 10, (2) 20, (3) 50, (4) 100; $T_0=278K$; $2R_0=100\mu m$; $T_d=373K$.	57
3.18 pav. Dujų mišinio temperatūros įtaka fazinių virsmų šilumos srauto ir išorinės konvekcijos šilumos srauto santykiui. $R_0=50\mu m$; $T_0=278K$; $Re_0=50$; T_d, K : (1) 373, (2) 473, (3) 573, (4) 673.	58
3.19 pav. Dujų mišinio temperatūros įtaka vidinei lašelio konvekcijai. $R_0=50\mu m$; $T_0=278K$; $Re_0=50$; T_d, K : (1) 373, (2) 473, (3) 573, (4) 673.	59
3.20 pav. Dujų mišinio temperatūros įtaka fazinių virsmų (a) ir išorinės konvekcijos (b) šilumos srautams. $R_0=50\mu m$; $T_0=278K$; $Re_0=50$; T_d, K : (1) 373, (2) 473, (3) 573, (4) 673.	60
3.21 pav. Dujų mišinio temperatūros įtaka lašelio terminėi būsenai. $R_0=50\mu m$; $T_0=278K$; $Re_0=50$; T_d, K : (1) 373, (2) 473, (3) 573, (4) 673.	60
3.22 pav. Dujų mišinio temperatūros įtaka garo srautui (a) ir jo tankiui (b) lašelio paviršiuje. $R_0=50\mu m$; $T_0=278K$; $Re_0=50$; T_d, K : (1) 373, (2) 473, (3) 573, (4) 673.	61
3.23 pav. Dujų mišinio temperatūros įtaka lašelio masei. $R_0=50\mu m$; $T_0=278K$; $Re_0=50$; T_d, K : (1) 373, (2) 473, (3) 573, (4) 673.	62
3.24 pav. Dujų mišinio temperatūros įtaka išorinei konvekcijai. $R_0=50\mu m$; $T_0=278K$; $Re_0=50$; T_d, K : (1) 373, (2) 473, (3) 573, (4) 673.	63
3.25 pav. Lašelio terminės būsenos kitimas pusiausviro garavimo režime. $R_0=50\mu m$; $T_0=278K$; $Re_0=50$; $T_d=673K$.	64
3.26 pav. Dujų mišinio temperatūros įtaka efektyviojo laidžio parametru. $R_0=50\mu m$; $T_0=278K$; $Re_0=50$; T_d, K : (1) 373, (2) 473, (3) 573, (4) 673.	64
3.27 pav. Dujų mišinio temperatūros įtaka Stefano hidrodinaminio srauto pataisos funkcijai. $R_0=50\mu m$; $T_0=278K$; $Re_0=50$; T_d, K : (1) 373, (2) 473, (3) 573, (4) 673.	65

LENTELIŲ SARAŠAS

1.1 lentelė. Prancūzų 900MW PWR purkštukų žiedų charakteristika [53].	16
1.2 lentelė. Pagrindiniai radioaktyvieji skilimo produktai [101].	26
3.1 lentelė. Lašelio masės ir spindulio vertės, kondensacinio fazinių virsmų režimo pabaigoje prie skirtingo lašelio slydimo greičio intensyvumo.	52
3.2 lentelė. Išorinės ir vidinės konvekcijos bei šilumos laidumo parametro pradinio momento vertės.	55
3.3 lentelė. Išorinės konvekcijos šilumos srauto vertės pradžios momentu prie skirtingos dujų mišinio temperatūros.	59
3.4 lentelė. Dujų mišinio temperatūros įtaka pradžios momento vidinei lašelio konvekcijai.	59
3.5 lentelė. Kondensacinio fazinių virsmų režimo trukmė, bendra fazinių virsmų metu išsiskyrusi šiluma ir bendras pritekėjęs garo srautas prie skirtingos dujų mišinio temperatūros.	61

SANTRUMPOS IR ŽYMĖJIMAI

Santrumpos:

- AE - atominė elektrinė;
APR – pažangusis suslėgto vandens reaktorius;
BWR – verdančio vandens reaktorius;
CALIST – IRNS apsauginio kiauto eksperimentinis įrenginys;
CARAIDAS – IRNS apsauginio kiauto eksperimentinis įrenginys;
CEA – Prancūzijos Atominės energijos komisariatas
CFD – skaičiuojamoji fluidų dinamika;
CFX – skaičiuojamosios fluidų dinamikos kodų paketas;
CPR – kiniečių dizaino suslėgto vandens reaktorius;
CSE – Indijos eksperimentinis reaktorius;
CVTR – suslėgto sunkio vandens eksperimentinis reaktorius;
GG – garo generatorius;
IRNS – Radiacinės apsaugos ir branduolinės saugos institutas;
LOCA – šilumnešio praradimo avarija;
MISTRA – Prancūzijos CEA eksperimentinis standas;
NUPEC – branduolinės energetikos centras;
P – lašelio šilumos ir masės mainų parametras;
 P_f – lašelių fazinių virsmų parametras;
 P_T – lašelio terminės būsenos parametras;
 P_q – lašelio energinės būsenos parametras;
PWR – suslėgto vandens reaktorius;
 \bar{P} – pradinės lašelio būsenos parametro atžvilgiu normuotas parametras;
RWST – kuro perkrovimo vandens rezervuaras;
TOSQAN – Prancūzų apsauginio kiauto eksperimentinis įrenginys;
ŠMM – šilumos ir masės mainai;
VVER – vandens-vandens energetinis reaktorius.

Žymėjimai:

- a – temperatūros laidumo koeficientas, [m^2/s];
 B_T – Spoldingo šilumos pernešimo parametras;
 c_p – savitoji šiluma, [$J/(K \cdot kg)$];
 D – difuzijos koeficientas, [m^2/s];
 f_{BT} – pataisos dėl Stefano hidrodinaminio srauto funkcija

Fo – Furje kriterijus;
 g – garo srautas, $[kg/s]$;
 I_ω – spektrinis spinduliuotės intensyvumas, $[W/(m \cdot ster)]$;
 $I_{\omega 0}$ – absoliučiai juodo kūno spektrinis spinduliuotės intensyvumas, $[W/(m \cdot ster)]$;
 k_c^- – efektyvusis šilumos laidžio parametras;
 L – garavimo šiluma, $[J/kg]$;
 m – garo srauto tankis, $[kg/(m^2 \cdot s)]$;
 n – nario indeksas begalinėje sumoje;
 Nu – Nuselto kriterijus;
 p – slėgis, $[Pa]$;
 q – šilumos srauto tankis, $[W/(m^2 \cdot s)]$;
 Pr – Prandtlio kriterijus;
 R – lašelio spindulys, $[m]$;
 Re – Reinoldso kriterijus;
 R_μ – dujų pastovioji, $[J/(kmol \cdot K)]$;
 r – radialinė koordinatė, $[m]$;
 T – temperatūra, $[K]$;
 w – judėjimo, tekėjimo greitis, $[m/s]$;
 α, β, γ – spinduliavimo šilumokaitai sferoje būdingi kampai, $[rad]$;
 δ – lašelį supančio sluoksnio storis, $[m]$;
 $\eta = r/R$ – bematė radialinė koordinatė;
 λ – šilumos laidžio koeficientas, $[W/(K \cdot m)]$;
 ϑ – kinematinės klampos koeficientas, $[m^2/s]$;
 μ – molekulinė masė, $[kg/kmol]$;
 ρ – tankis, $[kg/m^3]$;
 τ – laikas, $[s]$.

Indeksai viršuje:

+ – išorinė lašelio paviršiaus pusė;
 - – vidinė lašelio paviršiaus pusė.

Indeksai apačioje:

c – konvekcija;
 C – lašelio centras;
 d – dujos;
 dif – difuzinio srauto dedamoji;
 e – pusiausvira garavimas;

f – faziniai virsmai;
 g – garas;
 gar – garavimas;
 gd – garo ir dujų mišinys;
 $hidr$ – hidrodinaminio Stefano srauto dedamoji;
 i – laiko indeksas skaitinėje schemoje;
 it – iteracijos indeksas skaitinėje schemoje;
 j – radialinės koordinatės indeksas skaitinėje schemoje;
 I – kontrolinio laiko indeksas skaitinėje schemoje;
 J – lašelio paviršiaus radialinės koordinatės indeksas skaitinėje schemoje;
 $kiet$ – kietos būsenos;
 KN – Knudseno sluoksnio riboje;
 kon – kondensacija;
 l – skystis;
 m – masės vidutinis;
 max – maksimali vertė;
 min – minimali vertė;
 R – lašelio paviršiaus;
 r – spinduliavimas;
 rt – rasos taško būseną;
 sot – soties būseną;
 ω – spektrinis;
 Σ – suminis;
 0 – pradinė būseną;
 ∞ - toli nuo lašelio.

IVADAS

Nėra paslaptis, jog vanduo yra labiausiai paplitęs cheminis junginys visatoje. Tai nėra keista, žinant jog vanduo (H_2O) susideda iš dviejų cheminių elementų – vandenilio (H) ir deguonies (O), kurie pagal paplitimą visatoje, atitinkamai yra pirmoje ir trečioje vietoje. Šis cheminis junginys dengia apie 70,9% [1] mūsų planetos paviršiaus. Apie 98% [2] Žemėje esančio vandens yra skystoje agregatinėje būsenoje, likusi dalis yra kitose dvejose agregatinėse būsenose – kietoje ir dujinėje. Dėl savo fizikinių savybių, vanduo gali keisti agregatinę būseną natūraliomis sąlygomis, todėl atlieka labai svarbią rolę Žemės hidrologiniame cikle [3].

Vanduo, taip pat labai glaudžiai yra susietas su energetika. Jei nori išgauti daugiau vandens, reikia daugiau energijos. Jei nori pagaminti daugiau energijos, tikėtina, kad reikės didesnio kiekio vandens jos gamybos procese. Vanduo yra plačiai naudojamas visose energijos gamybos fazėse. Pasauliniu mastu, energetikos sektorius yra atsakingas už 10% vandens panaudojimo, tiek stočių eksploatacijos, tiek iškastinio bei biokuro gamybos procesuose. Jau keletą dešimtmečių vandens suvartojimas auga ir yra manoma, kad artimoje ateityje toliau ženkliai augs. Ypatingas augimas numatomas vandens *sunaudojime*, kai panaudotas vanduo, nėra gražinamas į pirminį jo šaltinį. Kylanti biokuro paklausa, ženkliai kelia vandens panaudojimo kiekį, o tuo tarpu intensyvesnis atominių stočių diegimas, vienu metu kelia vandens panaudojimo ir *sunaudojimo* kiekius [4].

Atominėse stotyse masyvus šilumnešio kiekis yra reikalingas milžiniškos terminės energijos pašalinimui iš aktyviosios zonos, kuri išsiskiria sunkiųjų branduolių skilimo metu. Šiuo metu, pasauliniu mastu, dominuojantis šilumnešis yra gamtinis vanduo. Šis fluidas cirkuliuojamas atominės stoties pirminiame kontūre, kurio paskirtis aušinti reaktorių. Šiuolaikinių reaktorių pirmajame kontūre, vandens slėgis siekia 6-20 MPa [5,6], temperatūra 276-320 °C [6], priklausomai nuo reaktoriaus tipo (PWR – suslėgto vandens reaktorius ar BWR – verdančio vandens reaktorius). Tiek verdančio vandens reaktorius, tiek suslėgto vandens reaktorius yra patalpinti po apsauginiu kiautu, kuris yra paskutinis saugos barjeras atominėse stotyse [7]. Jo paskirtis yra sulaikyti radioaktyviasias medžiagas bei ekranuoti radiaciją tiek eksploatacijos metu, tiek avarijos atveju; ir apsaugoti nuo natūralių ar žmonių sukeltų išorinių įvykių [8]. Tačiau šilumnešio praradimo avarijų (LOCA) atveju, į apsauginio kiauto atmosferą yra išmetamas didelis kiekis šilumnešio (garo formoje), ko pasekoje, apsauginio kiauto atmosferos slėgis išauga per kelias sekundes. Slėgiui išaugus iki projekcinio ir išliekant tokioms sąlygoms ilgesnį laiko tarpą jo nemažinant, gali būti prarastas apsauginio kiauto sandarumas. Taigi, norint užtikrinti apsauginio kiauto funkcionalumą, būtina kontroliuoti jo vidinės atmosferos parametrus. Tai yra pasiekama naudojant skirtingas sistemas [8], kurios priklauso nuo atominės stoties tipo ir dizaino. Bet plačiausiai yra naudojama vandens įpurškimo sistema.

Apsauginio kiauto purkštukų sistemos panaudojimas, siekiant išvengti kritinio slėgio ir sumažinti slėgį iki pradinio, ataušinti apsauginio kiauto atmosferą bei sumažinti potencialių radioaktyviųjų

medžiagų nuotėkio kiekį į aplinką, yra įprasta strategija, naudojama PWR ir BWR reaktoriuose. Purkštukai taip pat padeda pagerinti dujų maišymosi procesą, kas yra itin svarbu, kai apsauginio kiauto atmosferoje pradeda kauptis vandenilis. Jei visos projektinės saugos sistemos veikia tinkamai, slėgis pradeda kristi per kelias minutes ir atmosferinis slėgis pasiekiamas per maždaug 30 minučių nuo avarijos pradžios [9].

Norint užtikrinti purkštukų sistemos funkcionalumą, svarbu pažinti vykstančius šilumos ir masės pernašos procesus tarp išpurkšto skysčio ir apsauginio kiauto atmosferos dujų mišinio, bei sugebėti juos tinkamai valdyti. Išpurškiant skystį susidaro lašelių srautai. Bendruoju atveju jį sudaro skirtingo skersmens lašeliai. Tuomet turime poli dispersinį lašelių srautą. Tai pats sudėtingiausias lašelių srauto atvejis. Kad jame apibrėžti šilumos ir masės pernašos procesus, reikia apskaičiuoti kiekvieno skersmens lašelių šilumą ir garavimą. Jeigu skystis disperguojamas į artimo skersmens lašelius, tuomet galima priimti, jog lašelių srautą sudaro tam tikro vidutinio skersmens lašeliai. Toks srautas vadintųsi mono dispersiniu lašelių srautu. Šilumos ir masės mainus jame apibrėžti galima pagal vieno lašelio modeliavimo rezultatus. Todėl visų pirma reikia mokėti tiksliai suprasti ir įvertinti vieno lašelio šilumos ir masės pernašos procesus. Realus mono dispersinio lašelių srauto atveju dėl lašelių šilumos ir masės mainų kinta lašelius nešančio dujų srauto parametrai. Svarbiausi yra dujų srauto temperatūros ir drėgnumo parametrai. Paprasčiausias lašelių šilumokaitos atvejis bus tuomet, kai jų šilimas ir faziniai virsmai dujų srauto parametrus nekeis. Tai įmanoma į dujų srautą įpurškus nežymų vandens kiekį. Lašelių šilumos ir masės mainų tyrimas mokslinėje literatūroje žinomas kaip „lašo“ uždavinys. Jo sprendinys bendru atveju apima „lašo išorinio“ bei „lašo vidinio“ uždavinių sprendinius: pirmasis duoda atsakymą apie šilumos ir masės pernašą tarp lašelio ir jo apsupties, o antrasis nusako šių procesų intensyvumą lašelyje [10].

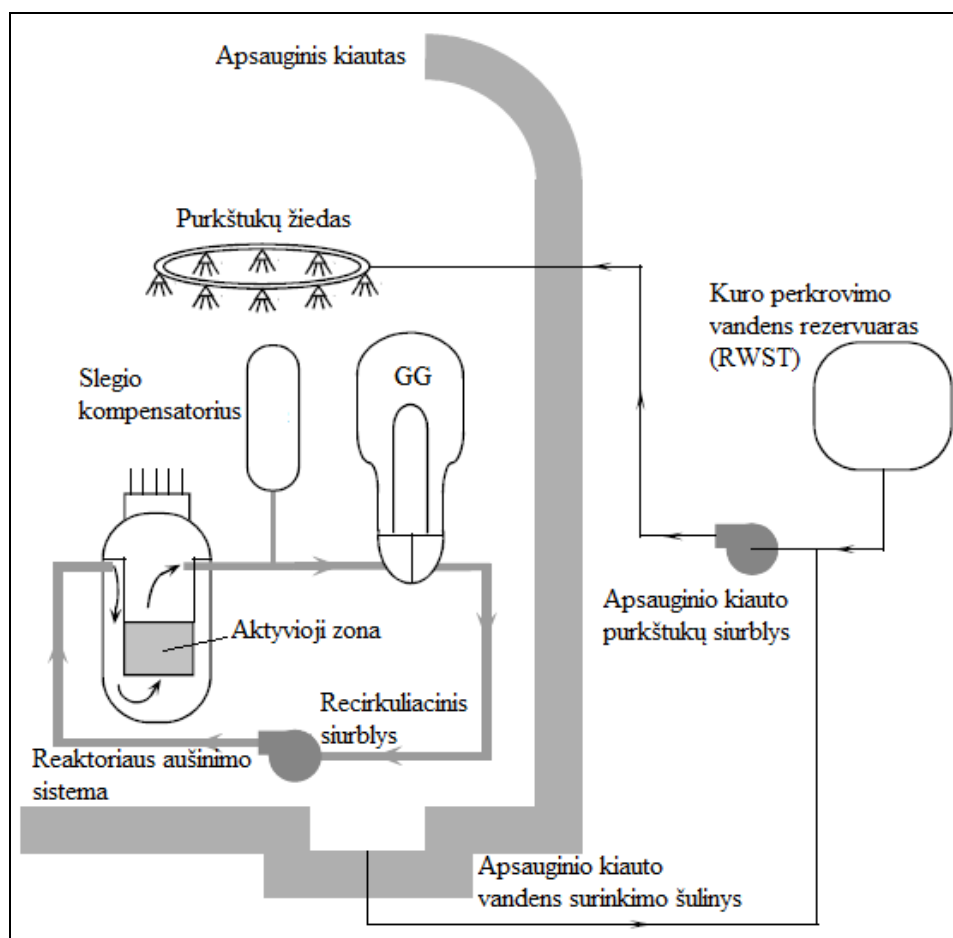
Lašelių šilumos ir masės mainų apskaičiavimas yra pakankamai sudėtingas ir visumoje imlaus darbo reikalaujantis uždavinys. Praktikoje būtų patrauklu lašelių šilumos ir masės mainų uždavinio rezultatus skirtingose kraštinėse sąlygose įvertinti juos tarpusavyje palyginant. Būtų patogu nuosekliai eiti nuo paprasčiausio iki sudėtingiausio lašelių šilumokaitos atvejo.

1 LITERATŪROS TYRIMAS

Jau daugelį metų mokslininkai tyrinėja skysčio išpurškimo technologiją, dėl jos plataus pritaikymo galimybių. Skysčio išpurškimas pritaikomas energetikos, aplinkosaugos, medicinos, biotechnologijų, vidaus degimo, chemijos ir kitose srityse [11–33]. Keletas šios technologijos pritaikymo konkrečių pavyzdžių: ji naudojama reguliuoti aukštos temperatūros dujų srauto terminę būseną, kontroliuoti paviršių erozijos procesus, ataušinti orą tarp turbokompresoriaus pakopų, slopinti gaisro frontą, formuoti klasterius ir sluoksnius ant paviršių, utilizuoti fazinių virsmų sukauptai šilumai, sudaryti apsaugančias dvifazio srauto priedangas ir t.t.

1.1 Vandens įpurškimo sistemos atominių stočių apsauginiame kiaute

Vandens įpurškimo sistema (1.1 pav.), atominių elektrinių apsauginiame kiaute, yra avarinės paskirties sistema, skirta užtikrinti apsauginio kiauto sandarumą avarijos atveju. Ši sistema naudojama išvengti kritinio slėgio; ataušinti apsauginio kiauto atmosferą bei iš jos pašalinti skilimo produktus; ir pagerinti dujų maišymosi procesą, kai apsauginio kiauto atmosferoje yra vandenilio. Įpurškimo sistemos efektyvumas priklauso nuo išpurkšto vandens lašelio dydžio ir pasiskirstymo apsauginiame kiaute; šilumos ir masės mainų su atmosfera proceso; ir lašelių susidūrimų.



1.1 pav. Suslėgto vandens reaktoriaus (PWR) apsauginio kiauto vandens įpurškimo sistema [34]. GG – garo generatorius.

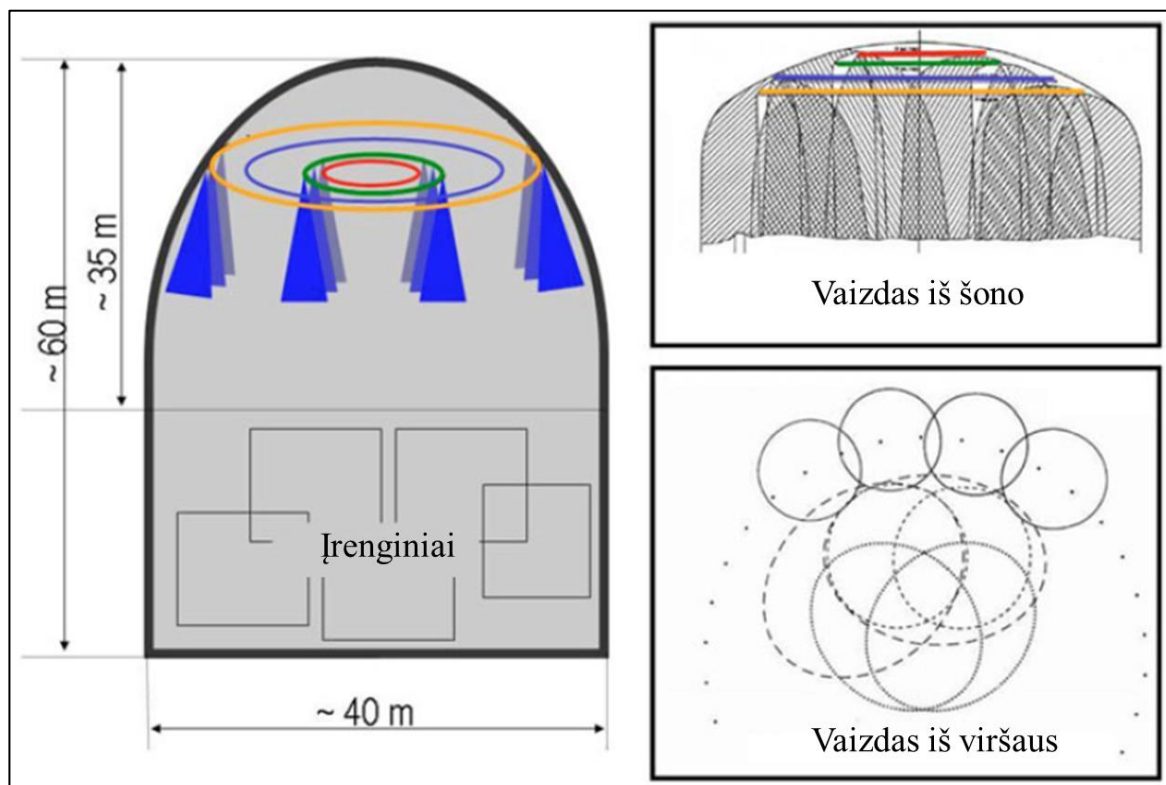
Per kelis paskutinius dešimtmečius buvo atlikta nemažas skaičius eksperimentinių ir teorinių įpurškimo sistemų tyrimų. Dėka spartaus kompiuterinės galios augimo pastarajame dešimtmetyje buvo atliekama vis daugiau CFD [35] (skaičiuojamoji fluidų dinamika) simuliacijų, skirtų realių apsauginio kiaučio parametrų tyrimams avarijos atveju. Tačiau norint patvirtinti simuliacijų realumą, kodai turi būti patikrinti. Dėl to buvo taip pat atlikta eilė eksperimentų, jog būtų patikrintas purkštukų modelių tikslumas. Praeityje purkštukų eksperimentams atlikti buvo naudojami didelio mastelio eksperimentiniai įrenginiai, tokie kaip CVTR, NUPEC ar CSE, naudojant keletą purkštukų [36–38]. Tačiau per paskutinį dešimtmetį buvo išvystyti nauji kompaktiškesni eksperimentiniai standai (CARAIDAS, CALIST, TOSQAN ir MISTRA), skirti apsauginio kiaučio purkštukų sistemos tyrimams. Naudojant TOSQAN ir MISTRA eksperimentinius standus buvo atlikti eksperimentiniai tyrimai ir lygiagrečiai atlikti šių eksperimentų skaitiniai modeliavimai. Šių eksperimentų metu buvo tiriama apsauginio kiaučio purkštukų sistemos įtaką jo atmosferai [39,40]. Slėgio kitimo apsauginio kiaučio analizei buvo atlikti du TOSQAN 101 ir MISTRA MASPn testai [41]. Taip pat buvo atlikti TOSQAN ir MISTRA MARC2b testai, norint iširti išpurkšto skysčio įtaką besikaupiančių nesikondensuojančių dujų stratifikavimuisi [42,43].

Taip pat buvo atlikti du Europiniai projektai SARNET (*Severe Accident Research network*), kur Radiacinės apsaugos ir branduolinės saugos institutas (IRSN) [44] buvo lyderis apsauginio kiaučio vandens įpurškimo sistemų veikloje. Be to, šis institutas taip pat bendradarbiavo su skirtingomis institucijomis (EDF [45], UJV [46], KIT [47]), atliekant kitus purkštukų tyrimus.

Tikslūs skaitiniai skaičiavimai, kurie įvertina šilumos ir masės mainus tarp lašelių ir dujų mišinio yra labai svarbūs. Vandens lašeliai gali būti įvertinti Langražo ar Eulerio metodu. Norint atlikti pilną purkštukų simuliaciją, gali tekti panaudoti visus įmanomus priartėjimo būdus. Mokslininkas Babikas, norėdamas sudaryti TOSQAN eksperimentinio stendo kompiuterinę simuliaciją, panaudojo lašelio-sekimo modelį, paremtą CFX kodu. Šis modelis „sekė“ lašelius ir interpretavo juos kaip energijos, masės ir momento šaltinius arba „sugerėjus“, vienfazėje dujų aplinkoje [16]. Apsauginio kiaučio purkštukų išpurškiamo vandens įtakos garui ir vandeniliui analizė suslėgto vandens reaktoriuose APR1400 ir CPR1000, buvo atlikta su GASFLOW kodu [48–50]. Jame yra naudojamas homogeninis dvifazinio srauto modelis ir priimta, jog fazinius virsmus įtakoja tik terminiai parametrai. Minoumis sukūrė dvifazinio srauto modelį su NEPTUNE_CFD kodu, kad būtų galima apskaičiuoti testo rezultatus, atliktus su TOSQAN eksperimentine įranga [51]. Šis kodas yra paremtas klasikiniu dviejų fluidų vieno slėgio priartėjimo būdu. Maletas panaudodamas Eulerio-Langražo modelį, atliko helio koncentracijos vystymosi simuliaciją, kuomet įpurškimo sistema yra aktyvuota [52]. Joje buvo analizuojama purkštuko parametrų įtaka dujų maišymuisi.

1.1.1 Vandens įpurškimo sistemos aprašymas

1.1.1.1 Vandens įpurškimo sistema atominėje stotyje su PWR reaktoriumi



1.2 pav. Prancūzų PWR reaktoriaus purkštukų žiedai ir jų padengiamų zonų vaizdai iš šono ir viršaus [53].

Atominės stotys su suslėgto vandens reaktoriumi, sudaro du trečdalius visų Pasaulio reaktorių. Šiose stotyse vandens įpurškimo sistema naudojama apsauginio kiauto slėgio kontrolei. Prancūzų PWR reaktoriaus apsauginio kiauto tūris yra apie 60000m^3 - 70000m^3 . Jame purkštukai yra patalpinti keturiose apskritose eilėse (1.2 pav.). Dviejuose 12m skersmens žieduose yra po 70 purkštukų, kurie išpurškia vandenį 54 metrų aukštyje apsauginio kiauto centre. Kiti du žiedai yra 25m skersmens, kuriuose yra po 186 purkštukus. Šie žiedai yra maždaug 51m aukštyje ir išpurškia vandenį link žiedų centro, žemyn ir link sienų. Priimta, jog yra pasiekiamas geras horizontalus apsauginio kiauto perdengimas išpurkštu vandeniu. Detali keturių žiedų informacija pateikta (1.1 lentelė).

1.1 lentelė. Prancūzų 900MW PWR purkštukų žiedų charakteristika [53].

	Aukštis, (m)	Diametras, (m)	Purkštukų skaičius, (vnt.)	Atstumas tarp purkštukų, (m)
Pirmas žiedas	54.8	10.0	66	0.5
Antras žiedas	54.2	14.8	68	0.7
Trečias žiedas	52.3	22.5	186	0.4
Ketvirtas žiedas	51.0	27.0	186	0.4

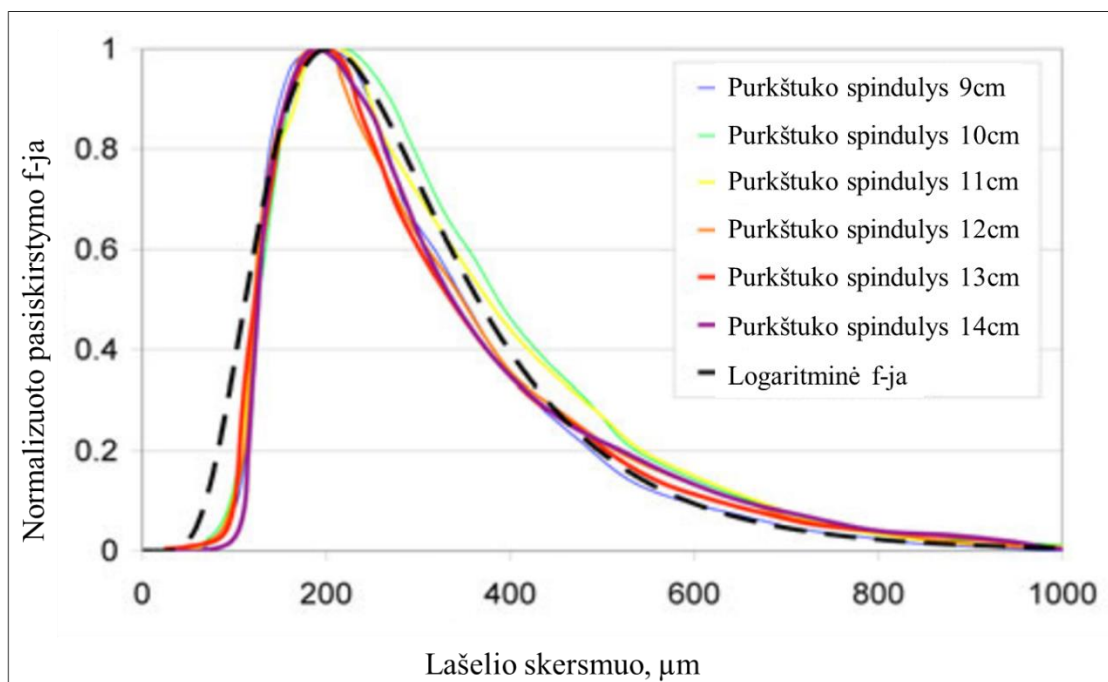
Daugelyje suslėgto vandens reaktorių ir konkrečiai Prancūzų 900MWe PWR yra naudojamas taip vadinamas SPRACO 1713A purkštuko tipas (1.3 pav.).



1.3 pav. Purkštukas SPRACO 1713A (Lechler 373.084.17.BN) [53].

Šis purkštukas naudojamas su 350kPa slėgiu ir jo tūrinis tekėjimo greitis 1L/s. Išorinės angos skersmuo 9,5mm. Išpurškiamo vandens temperatūra yra 20°C arba nuo 60°C iki 100°C, priklausomai nuo avarijos fazės. Apsauginio kiauto vandens išpurškimo sistema yra aktyvuojama, kai slėgis pasiekia 2,5bar, ir naudoja kambario temperatūros vandenį. Tačiau po 30 minučių nuo aktyvavimo pradžios, sistema perjungiama į taip vadinamą recirkuliacijos režimą, kuomet vandens įpurškimo sistema, naudoja vandenį iš vandens surinkimo šulinio. Vanduo yra prapirkuliuojamas pro šilumokaitį, kur vandens temperatūra yra sumažinama iki 60°C.

Remiantis matavimo rezultatais [53], kurie buvo atlikti su CALIST eksperimentine įranga vyraujantis vidutinis lašelių skersmuo yra apie 240-330μm, o vidutinis Sauterio skersmuo 360-560μm (1.4 pav.).

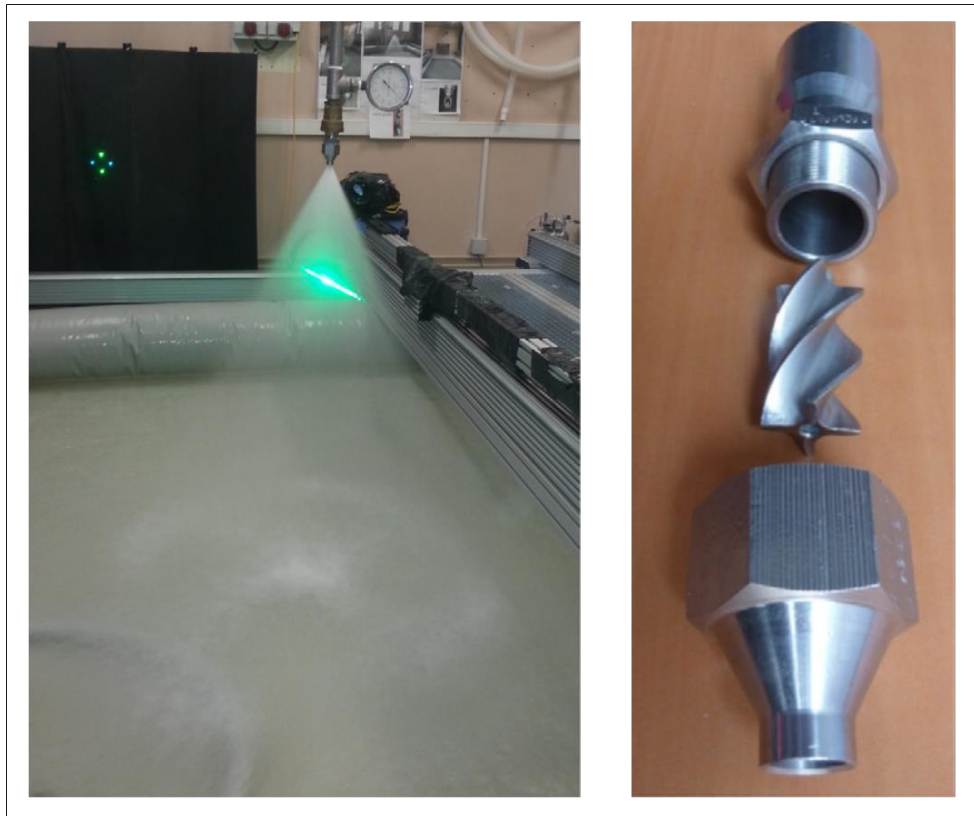


1.4 pav. Eksperimentinis lašelio dydžio pasiskirstymas [53].

1.1.1.2 Vandens įpurškimo sistema atominėje stotyse su VVER reaktoriumi

Rusų suslėgto vandens reaktoriaus modelis VVER (vandens-vandens energetinis reaktorius) yra eksploatuojamas Europos šalyse kaip Čekija, Bulgarija, Suomija, Vengrija ir Slovėnija. Toliau pateikta informacija yra Čekijos atominių stočių su VVER-440/213 ir VVER-1000/320 reaktorių tipais. Apsauginio kiauto tūris yra apie 50000-60000 m³.

VVER-440/213 reaktoriaus apsauginis kiautas susideda iš sujungtų sekcijų/skyrių. Vandens purkštukai (1.5 pav.) yra pakabinti ant garo generatorių skyriaus lubų, +14,3, +15,05 ir 15,6 metrų aukštyje (trys nepriklausomos eilės su apie 65 purkštukais kiekvienoje ir 1,6 kg/s masės srautu per purkštuką). Garo generatorių skyrius (+6 m) yra pilnas įvairiausios įrangos, tai dauguma išpurktų lašelių susidurtų su kuo nors prieš pasiekdami grindinį.



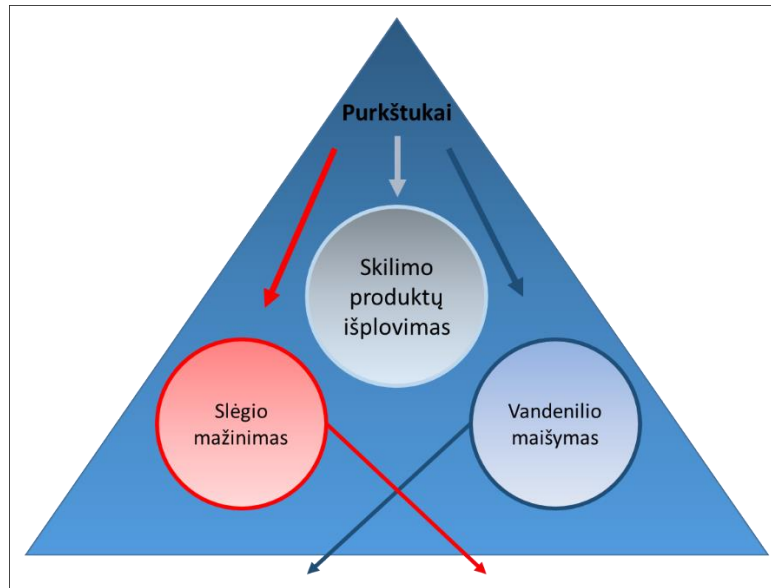
1.5 pav. Suslėgto vandens reaktoriaus VVER vandens išpurškimo sistemos dispergatorius.

Yra priimta, jog pagrindinis kritimo trajektorijos atstumas yra 5m (vertikalusis atstumas tarp purkštukų ir grindinio yra 9m). Purkštukai turi įvairius palinkimo kampus, kad būtų pasiektas didesnis išpurškimo tūris. Vandens išpurškimo sistema pradžioje pumpuoja vandenį iš rezervuarų, o kai jie tušti, iš apsauginio kiauto vandens surinkimo šulinio (vanduo yra prapumpuojamas pro šilumokaitį, jog būtų pašalinta likutinė šiluma).

VVER-1000/320 reaktoriaus apsauginis kiautas yra panašus į „vakarietišku“ atominių stočių. Cilindrinis pastatas su elipsiniu stogu. Vandens purkštukai yra patalpinti kupole +55 ir +65 metrų aukščiuose (trys nepriklausomos eilės turinčios po 20 purkštukų, kurių kiekvieno masės srautas yra apie 8,3 kg/s). Kupolo grindinys yra +36,90 metrų aukštyje. Kaip ir VVER-440 purkštukai pakabinti įvairiais pakrypimo kampais. Vandens išpurškimo sistema naudoja vandenį tiesiogiai iš apsauginio kiauto vandens surinkimo šulinio, kuris visuomet yra užpildytas vandeniu. Vanduo yra prapumpuojamas pro šilumokaitį, kad būtų pašalinta likutinė šiluma [53].

Buvo atliktas purkštukų tyrimas, norint charakterizuoti išpurkštus lašelius. Tyrime buvo atliekami matavimai 30cm atstumu nuo purkštuko. Kai tiekiamo vandens slėgis buvo 1,2bar (nominalus slėgis VVER purkštukams), buvo gauti dideli lašeliai (apie 700 μ m skersmens). Buvo gauta keletas lašelių dydžių ir greičių profilių prie skirtingų tiekiamo vandens slėgių. Vyraujantis vertikalus lašelių greitis apie 10-14m/s. Taip pat buvo nustatyta, jog lašelio dydis kintant aukščiui taip pat pakito (padidėjo 50-100 μ m). Detali informacija pateikta [54].

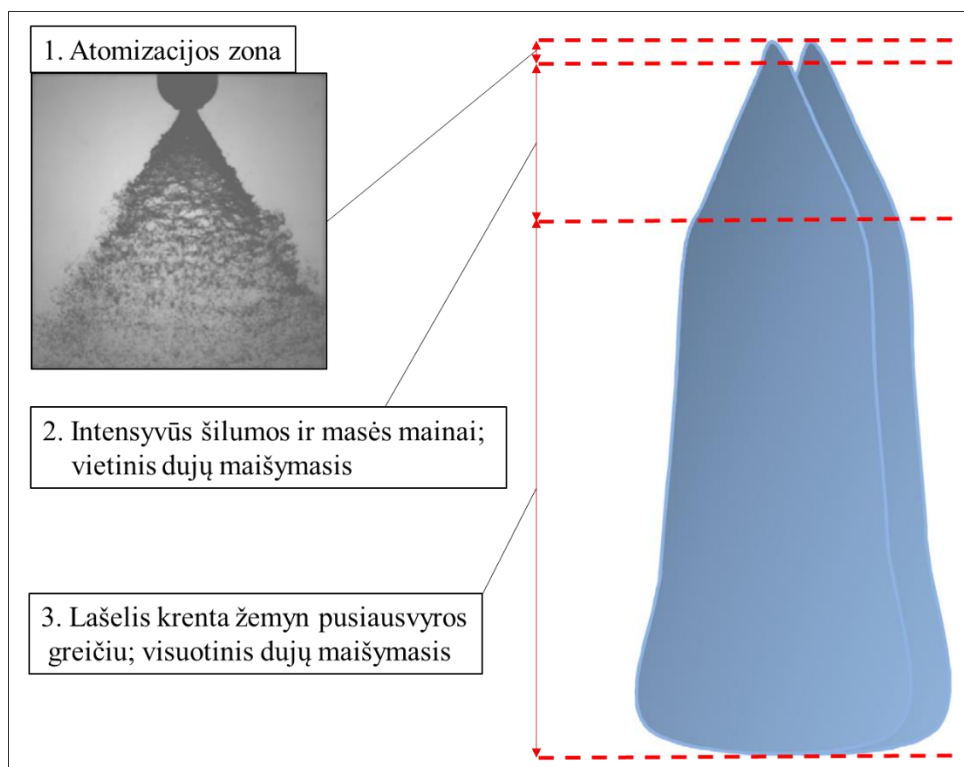
1.2 Reiškiniai užimantys vietą apsauginiame kiaute po vandens išpurškimo



1.6 pav. Principinė purkštukų atliekamų funkcijų apsauginiame kiaute schema [38].

Aktyvavus purkštukus, daug reiškinių užima vietą (1.6 pav.). Bendrai tariant, apsauginiame kiaute vykstantys procesai skirstomi į dvi dalis: termodinaminę ir dinaminę. Termodinaminės dalies vienas iš pagrindinių procesų pasireiškia per dujų būsenos kitimą, kuomet apsauginio kiauto slėgis krinta, dėl garo kondensacijos ant lašelių paviršiaus. Šiai daliai taip pat priskiriamas lašelio garavimo procesas, dėka kurio krinta apsauginio kiauto dujų mišinio temperatūra ir keičiamas atmosferos drėgnumas. Tuo tarpu dinaminei daliai yra priskiriama dujų maišymosi ir skilimo produktų nusodinimo procesai. Abu, termodinaminis ir dinaminis, procesai yra susieti ir vyksta vienu metu [38].

Procesai vykstantys apsauginiame kiaute, priklauso nuo dujų mišinio ir purkštukų parametrų. Išpurkšto lašelio trajektoriją, galima padalinti į trejas pagrindines zonas: išpurškimo; intensyvių šilumos ir masės mainų zona; ir santykinės pusiausvyros zona (1.7 pav.). Šiose zonose vykstantys procesai yra aptariami toliau.



1.7 pav. Pagrindinės lašelio kelio zonos [38].

1.2.1 Atomizacijos zona – lašelių susidūrimai

Šilumos ir masės mainų procesas tiesiogiai priklauso nuo lašelio dydžio, kurį apsprendžia ne tik purkštuko parametrai, bet ir lašelių susidūrimo procesas. Norint tinkamai charakterizuoti purkštukus ir įvertinti jų pritaikymo funkcionalumą, reikia įvertinti kaip greta esančių purkštukų išpurkšto skysčio lašeliai įtakoja vienas kitą. Purkštukai turi būti parinkti tokie, kad būtų pasiektas tolygus vandens lašelių pasiskirstymas apsauginiame kiaute, ir lašelių dydis būtų tokio dydžio, jog terminė pusiausvyra būtų pasiekta greitai po lašelių išpurškimo [8].

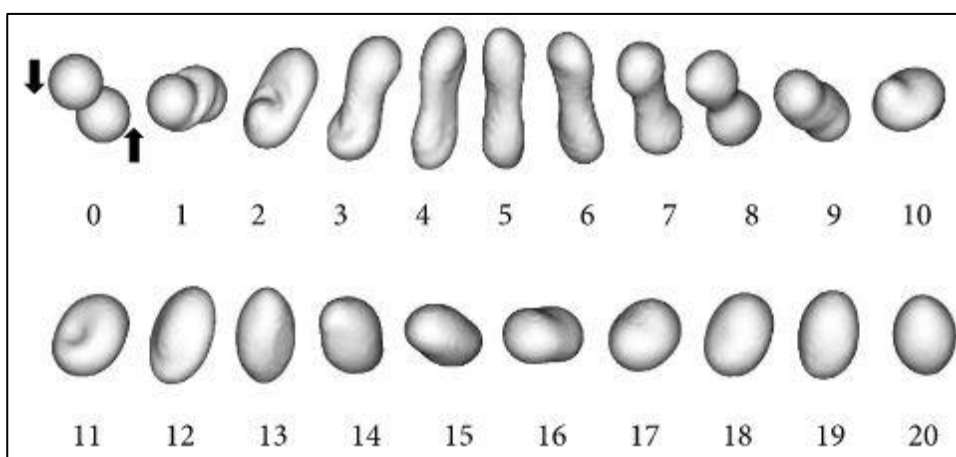
Jau daugelį metų mokslininkai tyrinėja dviejų lašelių susidūrimo dinamiką. Pirmiausiai, lašelių susidūrimus pradėta tirti, dėl noro suprasti fizinius procesus lyjant lietui [55–60]. Lietaus lašai gali susidurti vienas su kitu ir pasidalinti į mažesnius lašelius arba susilieti į didesnius. Vėlesni tyrimai, buvo dedikuoti tirti įvairių įpurškimo sistemų lašelių susidūrimus [61–73]. Eksperimentuose buvo tiriama fluidų, tokių kaip angliavandenilio [61–64,73], mazuto [65], gyvsidabrio [66], ir vandens, lašelių susidūrimų procesai. Dauguma kiekybinės informacijos apie lašelių susidūrimus, buvo gauta eksperimentų metu [66–72], kai tuo tarpu skaitiniai tyrimai buvo naudojami įgyti, šio komplikuoto proceso detalų supratimą.

Lašelių susidūrimų įvertinimas apsauginiame kiaute, yra labai svarbus, nes dėl didelio purkštukų skaičiaus ir jų išdėstymo bei padėties, lašelių susidūrimai yra gan intensyvūs. Tačiau daugeliu atvejų, lašelių susidūrimai apsauginiame kiaute yra neįvertinami, dėl supaprastintos susidūrimų fizikos bei tikslaus pramoninio analizės modelių trūkumo. Šiuo metu, nėra atviros prieigos prie literatūros apie

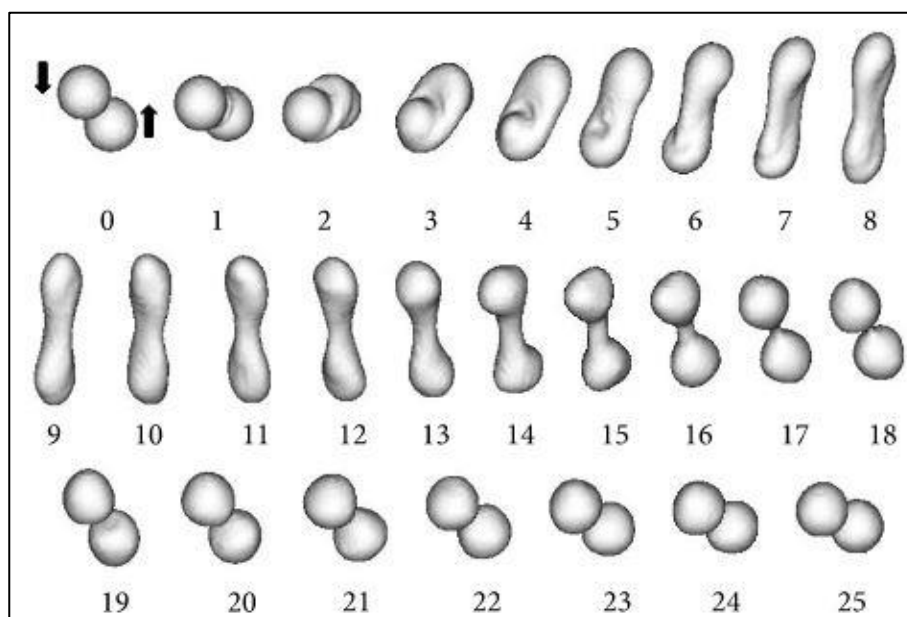
nuodugnų lašelių susidūrimų procesų paaiškinimą. Todėl, supaprastinto modelio sukūrimas, kuris būtų visuomet tikslus su duotais parametrais, yra beveik neįmanomas.

Dviejų lašelių susidūrimo atveju, galima išskirti penkis baigties režimus, kurių metu lašeliai gali [53,65,67,74–76]:

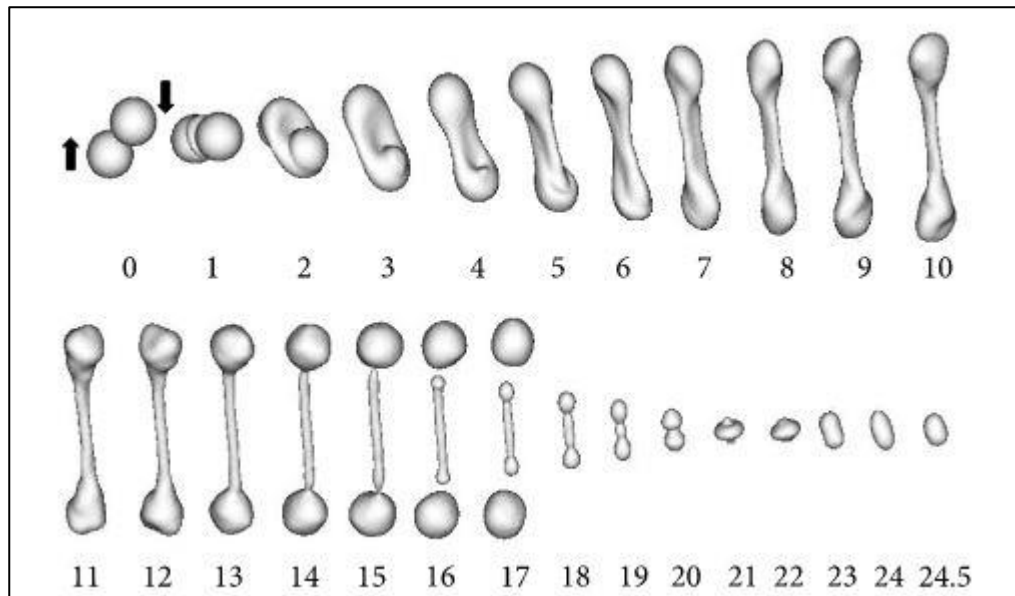
- atšokti – lašeliai nepakinta;
- dalinai susilieti – susidaro du lašeliai, kurių dydžiai skiriasi nuo pradinių(1.9 pav.);
- pilnai susilieti – susidaro vienas lašelis (1.8 pav.);
- pasidalinti – susidaro trys ar daugiau lašelių (1.10 pav.);
- išsitaškyti – susidaro daug lašelių.



1.8 pav. Dviejų lašelių susiliejimo proceso principinė schema [77].



1.9 pav. Dviejų lašelių susidarymo schema, dalinai susiliejant dvejiems lašeliams [77].



1.10 pav. Lašelių pasidalinimo į daugiau nei du lašelius schema [77].

Išsamią apžvalgą apie lašelių susidūrimų procesą galima rasti Breno knygoje [78].

Lašelių dispergavimas yra pradinis procesas, kurio metu susidaro tam tikrų matmenų fizinis lašelis. Tačiau, norint užtikrinti purkštukų sistemos funkcionalumą, itin svarbu pažinti šilumos ir masės pernašos procesus, vykstančius tarp lašelio ir dujų mišinio, ir sugebėti juos tinkamai valdyti.

1.2.2 Išpurkšto skysčio termodinaminis poveikis apsauginiame kiaute

Vandens įpurškimo sistema atlieka energijos kontroliavimo funkciją. Jos paskirtis yra pašalinti terminę energiją iš apsauginio kiaučio atmosferos, jog būtų limituojamos apsauginio kiaučio maksimalios slėgio ir temperatūros reikšmės bei jų egzistavimo trukmė, avarijos atveju.

Apsauginiame kiaute išpurkšto skysčio termodinaminis poveikis gali pasireikšti per kondensacijos arba garavimo režimus. Paprastai šilumos ir masės mainai ant lašelio paviršiaus, branduolinio reaktoriaus avarijos metu, vyksta kondensaciniu režimu. Tai reiškia, kad visa šilumokaita ir kondensacijos šiluma, yra sunaudojamos lašelio šildymui. Po lašelio dispergavimo, jo temperatūra pakyla labai greitai, palyginus su visa atkarpa, kuria lašelis turi leistis. Jei soties sąlygos nesikeičia kintant aukščiui, lašelis pasiekia terminę pusiausvyrą su garo-dujų mišiniu [38].

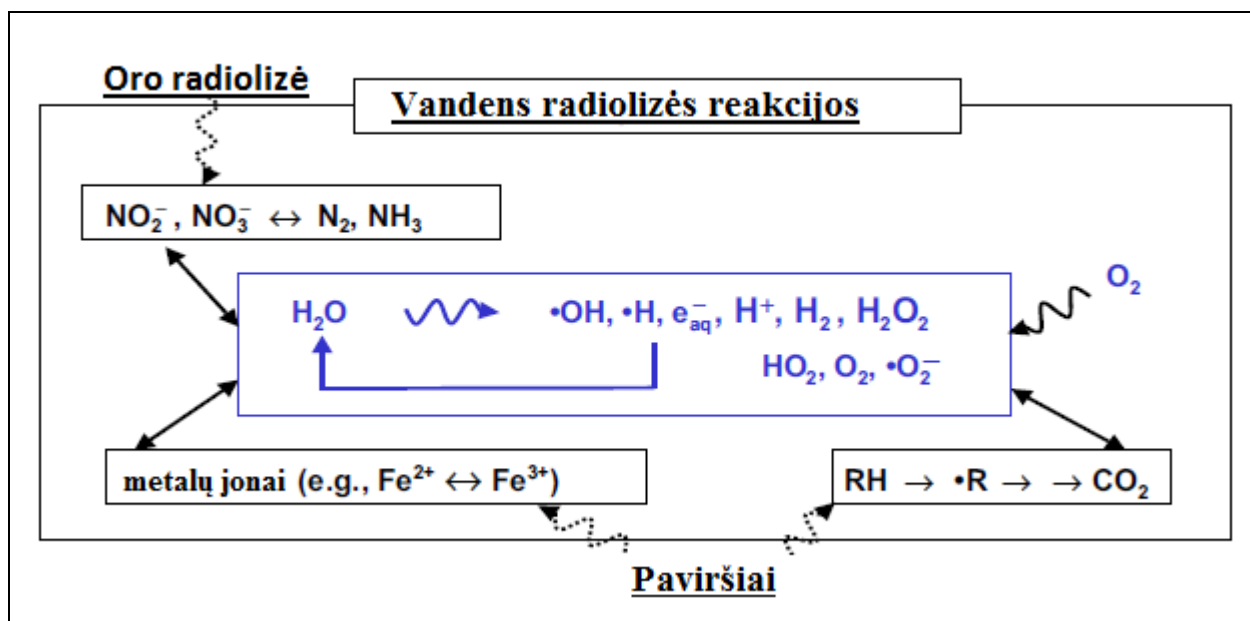
Vieno iš atliktų tyrimų metu buvo nustatyta, jog lašelio dydis kinta tolygiai su jo temperatūra, ir esant intensyviai kondensacijai, lašelis gali padidėti 20-50 μ m [79,80]. Dėka garo kondensacijos ant išpurkšto lašelio paviršiaus, apsauginio kiaučio garo-dujų mišinio tankis netoli purkštukų yra retesnis [81]. Taip pat buvo tiriama konvekcinio aušinimo ir garo kondensacijos įtaka slėgio kritimo greičiui po šaltų lašelių išpurškimo į apsauginio kiaučio atmosferą [82]. Išsamią informaciją apie konvekcinių perdavimą lašelio paviršiuje galima rasti [83].

1.2.3 Išpurkšto skysčio dinaminis poveikis apsauginiame kiaute

1.2.3.1 Dujų maišymosi suintensyvėjimas

Normaliomis eksploatacijos sąlygomis branduolinio reaktoriaus aktyviojoje zonoje radiolizės metu (1.11 pav.) susidaro šalutiniai produktai tokie kaip – vandenilis ir deguonis. Šilumnešio praradimo atveju (LOCA) šie ir kiti šalutiniai produktai yra išmetami į apsauginio kiauto atmosferą ir joje gali susiformuoti vandenilio ir oro dujų mišinys. Bendrai šis mišinys gali susidaryti kaip pasekmė šių reiškinių [8]:

- Vandens radiolizės aktyviojoje zonoje;
- Vandens radiolizės vandens surinkimo šulinyje ar slopinimo baseine;
- Metalų – vandens reakcijos aktyviojoje zonoje;
- Cheminių reakcijų su apsauginio kiauto medžiagomis;
- Vandenilio dujų, ištirpusių pirminiame aušale, pašalinimas;
- Vandenilio nutekėjimas iš vandenilio rezervuarų, skirtų kontroliuoti pirminio aušalo cheminę sudėtį.



1.11 pav. Vandens radiolizės reakcijos [84].

Vandenilis nėra toksiškas žmonėms (tačiau kaip ir kitos dujos, gali pakeisti deguonį iki tokio lygio, jog būtų galima uždusti) ir neturi korozinio poveikio. Pagrindinis pavojus, kurį sukelia dideli kiekiai vandenilio atominėje stotyje, jo degimo galimybė. Vandenilio degimas gali sukelti staigius slėgio ir temperatūros šuolius. Dėl šių sprogo apkrovų, gali būti prarastas apsauginio kiauto sandarumas ar gali būti pažeista įranga, tarp kurių gali būti ir įranga, skirta sumažinti avarijos pasekmes.

Apsauginio kiauto purkštukų sistema išpurškia vandenį į aplinką lašelių pavidale. Lašelio dydį apsprendžia purkštukų charakteristikos. Jei skystis yra paskirstomas mažesniais lašeliais, tai paviršius ant kurio gali vykti kondensacija yra didesnis, dėl ko kondensacijos procesas vyksta intensyviau. Tačiau lašelio dydis taip pat įtakoja jo judėjimo greitį. Lėtesni lašeliai paitensyvins kondensaciją, nes jie ilgiau bus apsauginio kiauto atmosferoje. Greitesni lašeliai, paitensyvins atmosferos maišymosi procesą per intensyvų judesio momento perdavimą tarp lašelių ir jo aplinkos.

Garų kondensacijos ir dujų maišymosi procesai, turi priešingą poveikį vandenilio degimo procesui. Intensyvus dujų maišymosi procesas (dėl didesnio lašelių greičio) užtikrina, jog vandenilio koncentracija apsauginio kiauto atmosferoje yra daug tolygesnė. Tuo tarpu garų kondensacijos metu, mažėja garų koncentracija apsauginio kiauto atmosferoje, o vandenilio didėja [85].

Norint geriau suprasti apsauginiame kiaute vykstančius vandenilio maišymosi ir kaupimosi procesus, buvo atliktas ne vienas eksperimentinis tyrimas. Kaip buvo minėta, labai svarbią reikšmę turi lašelio buvimo laikas apsauginio kiauto atmosferoje, kurį apsprendžia lašelio judėjimo greitis, kuris savo ruožtu priklauso nuo lašelio dydžio ir kitų procesų vykstančių apsauginio kiauto atmosferoje. Vienų iš tyrimų metu, buvo nustatyta, jog lašelių judėjimo greitis yra didesnis nei pusiausvyras greitis, priklausantis tik nuo lašelio masės. Tai yra dėl to, jog apsauginis kiautas yra uždaras ir dėl jame vykstančių pernašos procesų yra sukuriamas recirkuliacijos procesas, kurio metu, dėl dujų konvekcijos, lašelis įgauna papildomo judėjimo greičio [40,82]. Taip pat viename iš šių tyrimų metu, buvo nustatyta, jog termodinamė pusiausvyra yra pasiekama greičiau, nei lašelio pusiausvyras judėjimas. Ir tiksliaiame dujų maišymosi proceso įvertinime, lašelio ir dujų kraštinės sąlygos yra labai svarbūs parametrai [40,74].

Geriausiai žinomi daugiafunkciniai [16,86–93] ir specializuoti (GASFLOW [94], GOTHIC [95–97] HYKA3D [98], NEPTUNE-CFD [51], TONUS-3D [99]) CFD kodai, kurie buvo panaudoti apsauginio kiauto atmosferoje besikaupiančių dujų sluoksniavimuisi ir maišymuisi tirti.

1.2.3.2 Skilimo produktų šalinimas iš apsauginio kiauto

Viena iš purkštukų atliekamų funkcijų yra kontroliuoti radionuklidų koncentraciją apsauginio kiauto atmosferoje. Ši funkcija atliekama nusodinant dujų mišinyje esančias radioaktyvias daleles ir išlaikant jas apsauginio kiauto vandens surenkamajame šulinyje ar slopinimo baseine (BWR – verdančio vandens reaktorius). Tai leidžia sumažinti radioaktyvių medžiagų nutekėjimo sukeltą pasekmę.

Radioaktyvieji cheminiai ir fiziniai elementai yra išmetami į apsauginio kiauto atmosferą, avarijos metu. Pirmajame avarijos etape, trūkus pirmojo kontūro vamzdynui, maži kiekiai radioaktyviųjų elementų yra išmetami į apsauginį kiautą, kurie susidaro normalios eksploatacijos metu. Antrojo etapo pradžia laikoma, kai kuro strypai praranda sandarumą. Tuomet į apsauginio

kiauto atmosferą išmetami lakūs radionuklidai: inertinės dujos (ksenonas ir kriptonas), jodas ir cezis, ir kiti radionuklidai (1.2 lentelė), kurie susidaro ir kaupiasi kuro elemento tarpelyje, eksploatacijos metu [100,101]. Šie radionuklidai yra ypatingos svarbos ir juos būtina izoliuoti apsauginiame kiaute.

1.2 lentelė. Pagrindiniai radioaktyvieji skilimo produktai [101].

Trumpaamžiai		Vidutinio gyvavimo		Ilgaamžiai	
Skilimo produktai	Pusamžis	Skilimo produktai	Pusamžis	Skilimo produktai	Pusamžis
Kr88	2,8h	Zr95/Nb95	64d / 35d	Kr85	10,7m
Sr91/Y91m	9,5h / 0,8h	Mo99	2,8d	Sr90	28,6m
Sr92/Y92	2,7h/3,7h	Ru103	39d	Ru106	1m
Y93	10,5 h	Sb103	3,8d	Ag110m	0,7m
Zr97/Nb97	17 h/1,2 h	I131	8d	Sb125	2,8m
Ru105/Rh105	4,4 h/35,5 h	Te131m	1,2d	Cs134	2,1m
I133	20,8h	Te132/I132	3,2d/2,3h	Cs137	30,1m
I134	0,9h	Xe133	5,2d	Ce144	284d
I135	6,6h	Xe133m	2,2d	Eu144	8,6m
Xe135	9,1h	Ba140/La140	12,8d/1,7d		
Ce143	1,4h	Ce141	32d		
		Ce143	1,4d		
		Nd147	11,1d		
		Np239	2,43d		

Išpurškus vandenį į apsauginį kiautą vyksta keli procesai, kurių dėka vandens lašeliai pašalina radionuklidus iš apsauginio kiauto atmosferos:

- kai radioaktyvios dalelės negali išvengti krintančio lašelio;
- srautui aptekant apie lašelį radioaktyvios dalelės yra perimamos;
- lašelių paviršiuje vyksta difuzijos procesas;
- garo kondensacijos metu.

Bendrai, purkštukų panaudojimas pašalinti radioaktyvias daleles yra labai efektyvus. Tipinis asenizacijos faktorius yra apie $10h^{-1}$, kai tuo tarpu natūralus asenizacijos faktorius be purkštukų yra $0,5h^{-1}$. Purkštukų efektyvumas priklauso nuo radioaktyviųjų dalelių dydžio pasiskirstymo: smulkios ir didelės dalelės yra pašalinamos daug efektyviau nei vidutinio dydžio.

Dažniausiai į purkštukuose naudojamą vandenį yra įmaišomi tam tikri cheminiai priedai, kad būtų pagerinamas radioaktyviųjų dalelių šalinimas iš apsauginio kiauto atmosferos ir sumažinamas

radionuklidų garumas. Cheminės priemonės turi būti parenkamos tokios, kurios nesukeltų korozijos, tiek trumpalaikiu, tiek ilgalaikiu periodu, kadangi korozijos metu, gali ne tik susilpnėti vieni svarbiausių komponentų, palaikančių tvarią saugos sistemų veiklą, bet gali ir susidaryti degios dujos ar nepageidaujami junginiai. Plačiausiai yra naudojami cheminiai priedai tokie kaip: natrio(NaOH) hidroksidas, kalio(KOH) hidroksidas, natrio tiosulfatas ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$), trinatrio fosfatas (Na_3PO_4), kurių dėka yra kontroliuojamas pH lygis. Vandens surinkimo šulinio vandens pH turi būti išlaikomas šarminiame lygyje (pH – 9 ar daugiau nei 7), jog būtų išlaikomi vandenyje ištirpę radionuklidai ir būtų užtikrintas efektyvus radionuklidų pašalinimas iš apsauginio kiauto atmosferos [9].

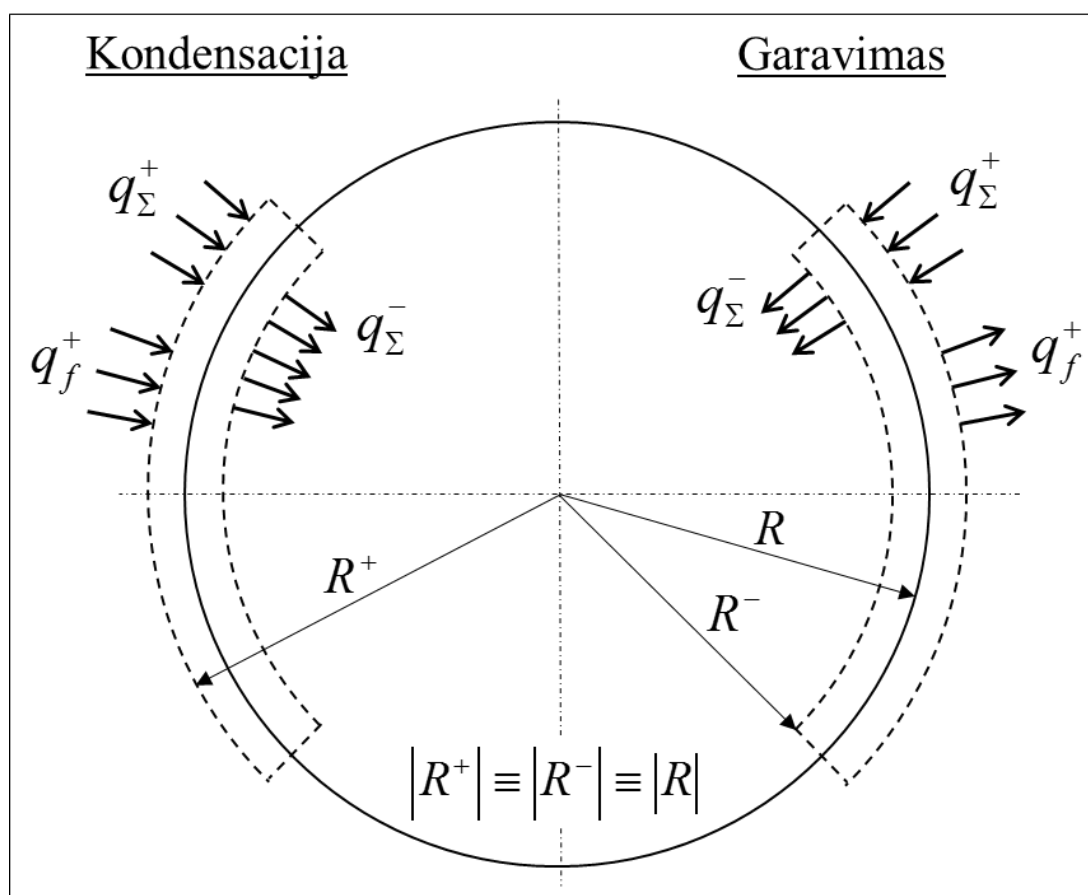
Radioaktyvusis jodas yra ypatingos svarbos, nes jis yra pagrindinis veiksnys, sukeliantis potencialią riziką visuomeninei sveikatai (ypatingai skyd liaukės klausimu) [8]. Jo nutekėjimo kiekis į aplinką stipriai priklauso nuo jo garumo, dėl to jo parametrai ir elgsena apsauginiame kiaute yra intensyviai tyrinėjami. Avarijos atveju, kai išsilydo aktyvioji zona, į apsauginio kiauto atmosferą yra išmetami dideli kiekiai aerozolių formoje esančio jodo, susidedančio iš metalo kilmės jodų ir dujinio jodo [102–104]. Dujinis jodas kondensuojasi ant apsauginio kiauto paviršiaus ir jodo sąveikoje su apsauginio kiauto dažais susidaro organinis jodas [105–107]. Dujinis jodas taip pat gali sąveikauti su oro radiolizės produktais ir suformuoti jodo oksidą ar kitas aerozolių kilmės jodo rūšis [108,109]. Minėtus procesus galima sulėtinti pašalinant dujinį jodą iš apsauginio kiauto atmosferos. Tai gali būti pasiekta panaudojant apsauginio kiauto vandens išpurškimo sistemą. Ji gali pašalinti reikšmingą dalį neorganinio dujinio jodo I_2 . Efektyvumas priklauso nuo vandens pH. Ši sistema laikoma neefektyvi organinio jodo šalinime. [101,110].

2 LAŠELIŲ ŠMM PERNAŠOS PROCESŲ MODELIAVIMAS

Lašelių šilumos ir masės mainų tyrimas mokslinėje literatūroje žinomas kaip „lašo“ uždavinys. Jo sprendinys bendru atveju apima „lašo išorinio“ bei „lašo vidinio“ uždavinių sprendinius: pirmasis duoda atsakymą apie šilumos ir masės pernašą tarp lašelio ir jo apsupties, o antrasis nusako šių procesų intensyvumą lašelyje. Svarbiausiu ŠMM parametru, įtakojančiu dujų būsenos pridėkinimą arba išsausinimą, laikytinas garo srautas lašelio paviršiuje. Jo intensyvumą apibrėžia garo srauto tankis. Šiuos lašelių paviršiuje vykstančių fazinių virsmų parametrus apibrėžia lašelio terminiai ir energiniai parametrai. Terminiai parametrai susiję su lašelio temperatūros lauku, o energinius parametrus apibrėžia šilumos srautai lašelio paviršiuje. Visus šiuo parametrus svarbu mokėti aprašyti matematiškai ir po to susieti tam tikru fizikine logika grindžiamu modeliu.

2.1 Metodinė dalis

Šilumos srautus lašelio paviršiuje kondensaciniame ir garavimo režimuose galima interpretuoti geometriškai (2.1 pav.).



2.1 pav. Lašelio šilumokaitos ir fazinių virsmų geometrinė interpretacija.

Kadangi lašelio paviršiuje vyksta paviršinis lašelio garavimas, energijos srautą apibūdina fazinių virsmų šilumos srautas, kuris nustatomas atsižvelgiant į garuojančio lašelio paviršiuje išsiskiriantį garo srauto tankį ir fazinių virsmų garavimo šilumą:

$$q_{f=g}^+ = m_g^+ \cdot L, \left[\frac{W}{m^2} \right]; \quad (2.1)$$

čia: m_g^+ - garo srauto tankis, $\left[\frac{kg}{m^2 \cdot s} \right]$; L - garavimo šiluma, $\left[\frac{J}{kg} \right]$.

(2.1) paveiksle garavimo atveju, fazinių virsmų garavimo šiluma $q_f^+ = q_g^+$, o kondensacijos atveju $q_f^+ = q_k^+$.

Sudėtinės šilumokaitos atveju apsuptis lašeliui šilumą teikia spinduliavimu ir konvekcija, todėl suminį šilumos srautą lašelio paviršiaus išorinėje pusėje sudaro radiacinis ir konvekcinis srautai. Bendras šilumos intensyvumas apibūdinamas suminiu šilumos srautu:

$$q_{\Sigma}^+ = q_r^+ + q_c^+, \left[\frac{W}{m^2} \right]; \quad (2.2)$$

čia: q_{Σ}^+ - suminis šilumos srautas, $\left[\frac{W}{m^2} \right]$; q_r^+ - radiacinis šilumos srautas, $\left[\frac{W}{m^2} \right]$; q_c^+ - konvekcinis šilumos srautas, $\left[\frac{W}{m^2} \right]$.

Lašelio šilimo intensyvumą apibrėžia nuo vidinio paviršiaus į lašelį sklindančios šilumos suminis šilumos srautas:

$$q_{\Sigma}^- = q_r^- + q_c^-, \left[\frac{W}{m^2} \right]; \quad (2.3)$$

čia: q_{Σ}^- - suminis šilumos srautas vidinėje lašelio paviršiaus pusėje, $\left[\frac{W}{m^2} \right]$; q_r^- - radiacinis šilumos srautas, $\left[\frac{W}{m^2} \right]$; q_c^- - konvekcinis šilumos srautas, $\left[\frac{W}{m^2} \right]$.

Šio srauto prigimtis priklauso nuo fazinių virsmų režimo lašelio paviršiuje. Fazinių virsmų režimai gali būti:

- kondensacinis;
- nestacionaraus garavimo;
- pusiausviro garavimo.

Jų įtaką lašelio šilumokaitai, aptarsime tolimesniuose skyreliuose.

2.2 Matematinis modeliavimas

2.2.1 Garo srauto modelis

Garų srautą lašelio paviršiuje iššaukia vandens garo slėgio prie lašelio ($p_{g,R}$) ir vandens garo slėgio aplinkoje (apsauginio kiauto dujų mišinyje) ($p_{g,\infty}$) disbalansas. Kondensacinis režimas vyksta, kuomet $p_{g,\infty} > p_{g,R}$ ir proceso varomoji jėga apibrėžiama:

$$p_{g,\infty} - p_{g,R} \equiv \Delta p_{var,k}, [Pa]. \quad (2.4)$$

Garavimo režimas vyksta, kuomet $p_{g,R} > p_{g,\infty}$, o proceso varomoji jėga apibrėžiama:

$$p_{g,R} - p_{g,\infty} \equiv \Delta p_{var,g}, [Pa]. \quad (2.5)$$

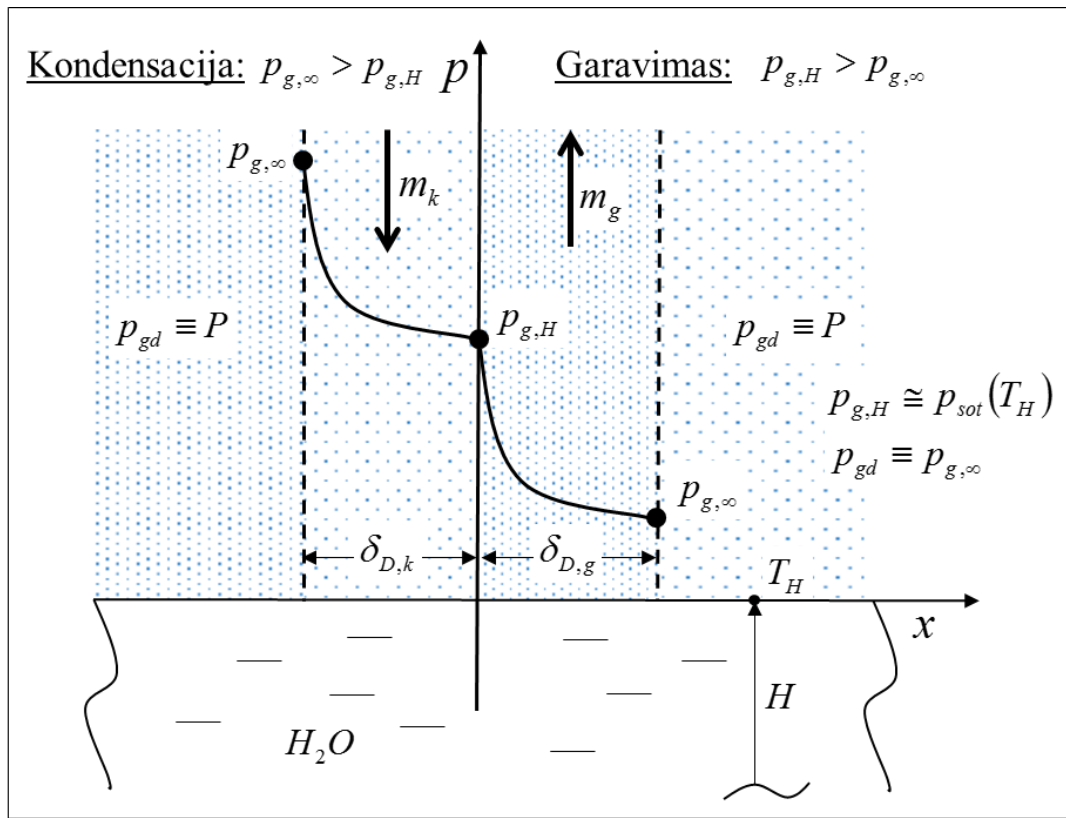
Šios jėgos iššaukia difuzinį garo srautą, aprašomą pagal Fiko dėsnį:

$$m_{g,D} = -D_{gd} \cdot grad\rho_{g,d}, \left[\frac{kg}{m^2 \cdot s}\right]. \quad (2.6)$$

čia:

$\rho_{g,d}$ – garo koncentracija aplinkoje, $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$; D_{gd} – garo difuzijos koeficientas dujose, $\left[\frac{m^2}{s}\right]$.

Garo srauto hidrodinaminę m_{hidr} dedamąją iššaukia lašelio fazinius virsmus visuomet lydintis hidrodinaminis Stefano srautas [111]. Jis dažnai įvertinamas tam tikra pataisa.



2.2 pav. Bendroji dalinio slėgio difuziniame sluoksnyje kitimo schema, garavimo ir kondensacijos režimų atvejais.

Yra žinoma [111], jog pro difuzinį sluoksnį sklindantį bendrą garo srautą (difuzinį ir hidrodinaminį) galima aprašyti analitiniu Stefano formulės pagrindu:

$$m_g^+ = \frac{D_{gd} \cdot \mu_g}{T_{gd,R} \cdot \delta_D \cdot R_\mu} \cdot p \cdot \ln \frac{p - p_{g,\infty}}{p - p_{g,R}}, \left[\frac{kg}{m^2 \cdot s}\right]; \quad (2.7)$$

čia: D_{gd} – garo difuzijos koeficientas dujose, $\left[\frac{m^2}{s}\right]$;

μ_g – garo molekulinė masė, $\left[\frac{kg}{kmol}\right]$;

$T_{gd,R}$ – garo dujų mišinio temperatūra prie lašelio paviršiaus, $[K]$;

δ_D – lašelių supančio difuzinio sluoksnio storis, $[m]$;

R_μ – universalioji dujų konstanta, $8314 \left[\frac{J}{kmol \cdot K} \right]$;

p – dujų (aplinkos) slėgis, $[Pa]$;

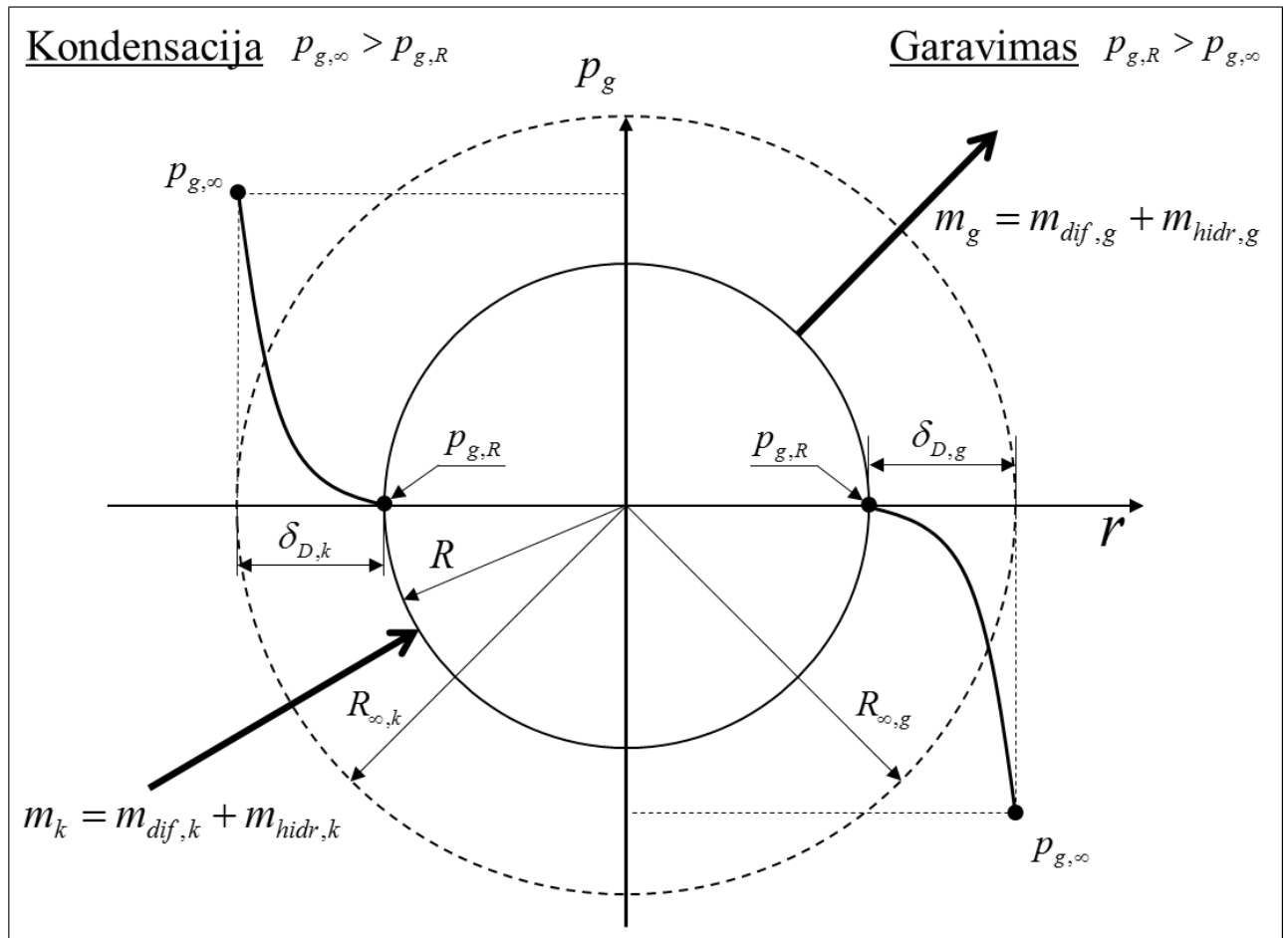
$p_{g,\infty}$ – vandens garo slėgis dujose, $[Pa]$;

$p_{g,R}$ – vandens garo slėgis prie lašelio paviršiaus, $[Pa]$.

Procesą apsprendžia vandens garo slėgis dujose (aps. kiauato atmosferoje) $p_{g,\infty}$. (2.7) formulėje į Stefano hidrodinaminio srauto įtaką atsižvelgiama Stefano logaritmu.

Garų srautą į lašelį, kondensacijos metu, galima laikyti sąlyginai neigiamu, o garavimo metu, atitinkamai teigiamu.

Lašelio atveju reikia atsižvelgti į jo geometrinę formą. Daroma prielaida, jog lašelis yra sferiškai simetriškas (2.3 pav.).



2.3 pav. Vandens garo dalinio slėgio kitimo difuziniame sluoksnyje schema, garavimo ir kondensacijos režimų atvejais.

Sferinio lašelio difuzinis sluoksnis yra proporcingas lašelio spinduliui [112]:

$$\delta_D \sim R \quad (2.8)$$

Stambesniems už keletą mikrometrų lašeliams, fazinius virsmus lydiniame Knudseno sluoksnyje δ_{KN} garo slėgio ir temperatūros šuoliai yra nereikšmingi: $\Delta p_{KN} \approx 0$ ir $\Delta T_{KN} \approx 0$.

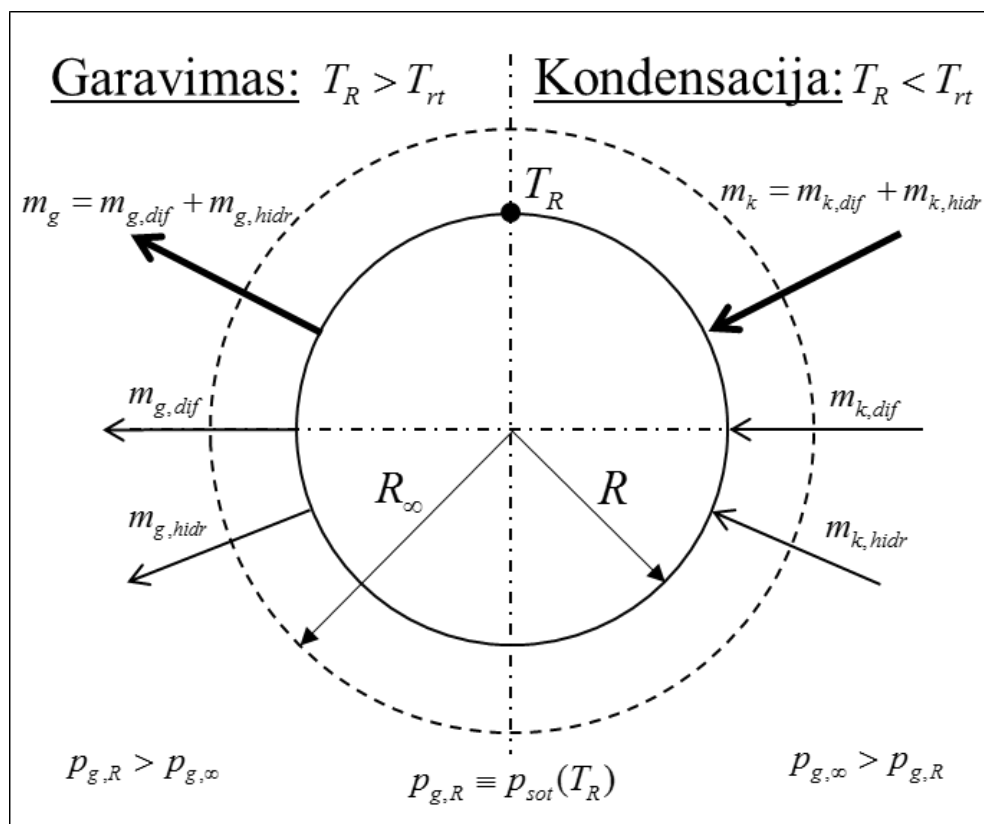
Todėl darome prielaidą, jog garo ir dujų mišinio temperatūra prie lašelio T_{gd_1R} yra artima lašelio paviršiaus temperatūrai T_R :

$$T_{gd_1R} \cong T_R \quad (2.9)$$

Tuomet lygtis (2.7) sferiniam lašeliui bus:

$$m_g^+ = \frac{D_{gd} \cdot \mu_g}{T_R \cdot R \cdot R_\mu} \cdot p \cdot \ln \frac{p - p_{g,\infty}}{p - p_{g,R}}, \left[\frac{kg}{m^2 \cdot s} \right]; \quad (2.10)$$

Skaitiškai modeliuoti fazinius virsmus lašelio paviršiuje pagal (2.10) formulę patogiu, kadangi (2.10) formulė užtikrina garo srauto vektoriaus pokytį, keičiantis kondensacijai į garavimą. Garo srauto tankis apskaičiuotas pagal (2.10) formulę, kondensaciniame režime yra neigiamo ženklo dydis ($m_{g,k}^+$ yra neigiamas). Garavimo režime $m_{g,g}^+$ yra teigiamo ženklo dydis.



2.4 pav. Bendroji garo srauto lašelio paviršiuje schema.

Kondensaciniame fazinių virsmų režime, lašelio paviršiuje kondensuojasi skysčio garas. Jį apibrėžia pritekantis garo srautas (2.4 pav.), kuris susideda iš hidrodinaminio ir difuzinio garo srauto tankio sandų. Tuo tarpu garavimo fazinių virsmų režimo metu, lašelio skystis garuoja ir nuo lašelio nutekantį garo srautą apibrėžia tie patys sandai, tik jų kryptis priešinga, nei kondensaciniame fazinių virsmų režime.

Garas srautas, išsiskiriantis lašelio paviršiuje, yra lygus garo srauto tankiui išsiskiriančiame visame lašelio paviršiaus plote:

$$g_g = 4 \cdot \pi \cdot R^2 \cdot m_g^+, \left[\frac{kg}{s} \right]; \quad (2.11)$$

čia: R - lašelio spindulys, $[m]$; m_g^+ - garo srauto tankis, $\left[\frac{kg}{m^2 \cdot s}\right]$.

Taigi, garo srauto modelis yra apibrėžtas, todėl apibendrinta galima laikyti ir išraišką (2.1), aprašančią fazinių virsmų šilumos srautą.

Vandens garo slėgis prie lašelio $\bar{p}_{g,\infty}$ yra nusakomas vandens garo aplinkoje slėgio santykiu su aplinkos slėgiu:

$$\bar{p}_{g,\infty} = \frac{p_{g,\infty}}{p}, [Pa] \quad (2.12)$$

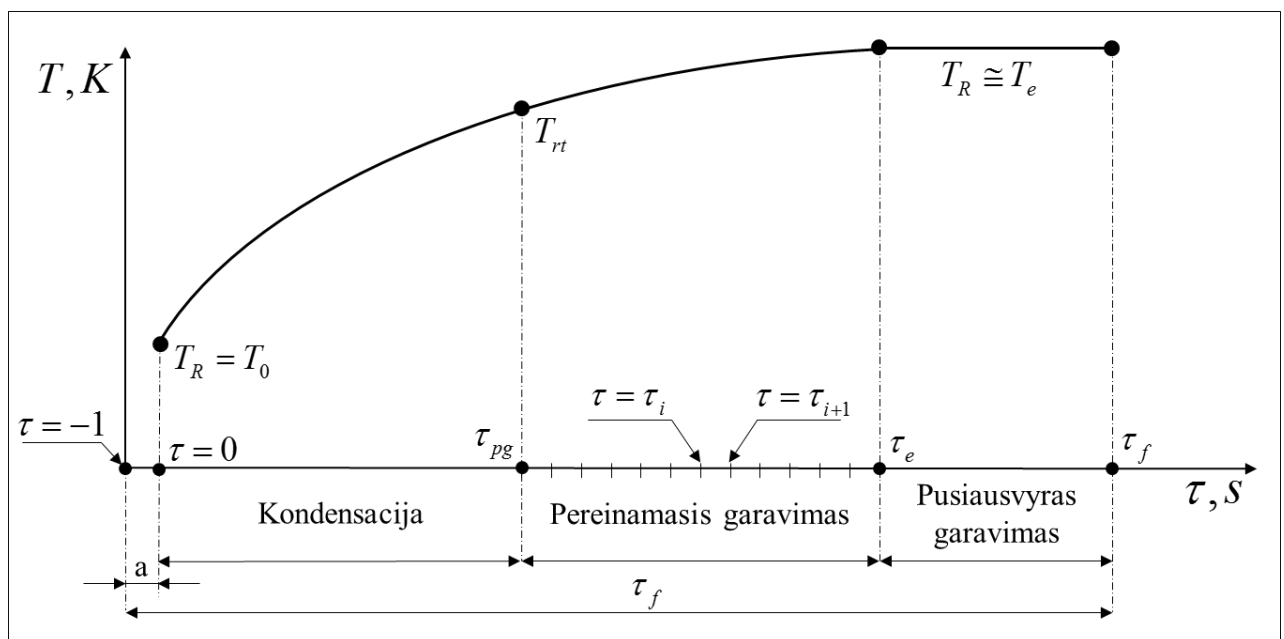
čia:

$p_{g,\infty}$ - vandens garo slėgis aplinkoje, $[Pa]$; p - aplinkos slėgis, $[Pa]$.

Pagrindinis parametras, kuris apibrėžia lašelio paviršiuje vykstančius fazinius virsmus yra lašelio paviršiaus T_R temperatūra:

- $T_R < T_{rt}$, kuomet lašelio paviršiaus temperatūra T_R yra žemesnė nei rasos taško T_{rt} temperatūra, vyksta kondensacija;
- $T_{rt} < T_R < T_e$, kuomet lašelio paviršiaus T_R temperatūra yra aukštesnė nei rasos taško T_{rt} temperatūra, bet žemesnė nei pusiausviro garavimo T_e temperatūra, vyksta pereinamasis garavimas;
- $T_R \equiv T_e$, kuomet lašelio paviršiaus T_R temperatūra yra lygi pusiausviro garavimo T_e temperatūrai, vyksta pusiausvyras garavimas.

Taigi, kiekviename fazinių virsmų režime yra tam tikra lašelio paviršiaus temperatūra T_R . Jos kitimą galima aprašyti $T_R(\tau)$ funkcija ir apibrėžti diagrama (2.5 pav.).

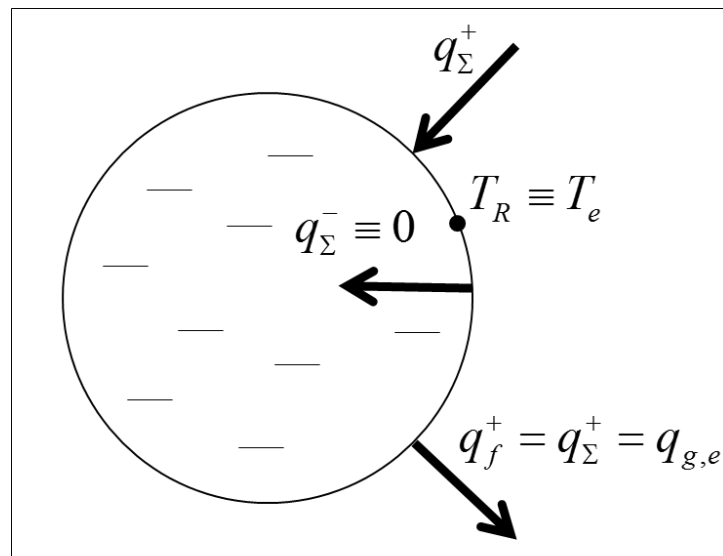


2.5 pav. T_R temperatūros kitimo diagrama, aprašant ją $T_R(\tau)$ funkcija. a – atomizacija; τ_f – lašelio gyvavimo laikas, $[s]$.

Lašelio paviršiaus temperatūra T_R yra nulemta lašelio paviršiuje sąveikaujančiais energijos srautais ir lemia fazinių virsmų režimą: kol ji žemesnė už rasos taško T_{rf} temperatūrą, lašelio paviršiuje kondensuojasi skysčio garas; nestacionariojo garavimo režime ji išauga iki pusiausvirą garavimą užtikrinančios T_e temperatūros. Dėl lašelio paviršiaus apsprendžiančių energijos srautų reikia atsižvelgti į lašelio šilumokaitos išorėje ir jo viduje savitumus. Tam sudaromas lašelio šilumokaitos matematinis modelis.

2.2.1 Šilumos srautų lašelio paviršiuje balansas

Pusiausviru garavimu suprantamas fazinių virsmų atvejis, kai visa lašeliui teikiama šiluma, tik garina skystį (2.6 pav.).



2.6 pav. Pusiausviro garavimo šilumos srautų schema.

Kondensacinį režimą jau aptarėme ir jame:

$$q_{\Sigma}^{-} = q_{\Sigma}^{+} + q_{f=kon}^{+}, \left[\frac{W}{m^2} \right]. \quad (2.13)$$

Tai reiškia, jog kondensaciniame režime į lašelį nuvedama visa šilumokaitos ir kondensacijos procesuose suteikiama šiluma.

Fazinių virsmų režimas po kondensacijos iki pusiausviro garavimo vadinamas pereinamuoju garavimo režimu. Jame garavimo šilumos srautas išreiškiamas lašeliui teikiamos ir į jį nuvedamos šilumos srautų skirtumu:

$$q_g = q_{\Sigma}^{+} - q_{\Sigma}^{-}, \left[\frac{W}{m^2} \right]. \quad (2.14)$$

Laisvai užsiduoti $T_R(\tau)$ funkciją negalima, kadangi lašelio paviršiaus temperatūrą apibrėžia šilumos srautai lašelio paviršiuje. Kiekvienu τ_i laiko momentu, lašelio paviršiaus temperatūra privalo užtikrinti, kad prie lašelio paviršiaus pritekantys ir nuo jo nutekantys šilumos srautai atitiktų. Taip yra todėl, kadangi ant paviršiaus šiluma nesikaupia. Šilumos srautai ir temperatūros lašelio paviršiuje

kinta ir net gali pakisti jų tekėjimo kryptis. Todėl šilumos srautų balansą, galima aprašyti vektorine išraiška:

$$\vec{q}_{\Sigma}^+ + \vec{q}_{\Sigma}^- + \vec{q}_f^+ = 0. \quad (2.15)$$

(2.15) lygtis yra formali ir skaičiavimams netinka. Norint pagal ją apibrėžti paviršiaus temperatūrą, ją būtina konkretizuoti.

Fazinių virsmų srautą q_f^+ (2.15) išraiškoje, jau detalizavome (2.1) lygtyje ir belieka apibrėžti šilumos srautus, kai garo srautas m_g^+ apibrėžiamas pagal (2.10) lygtį.

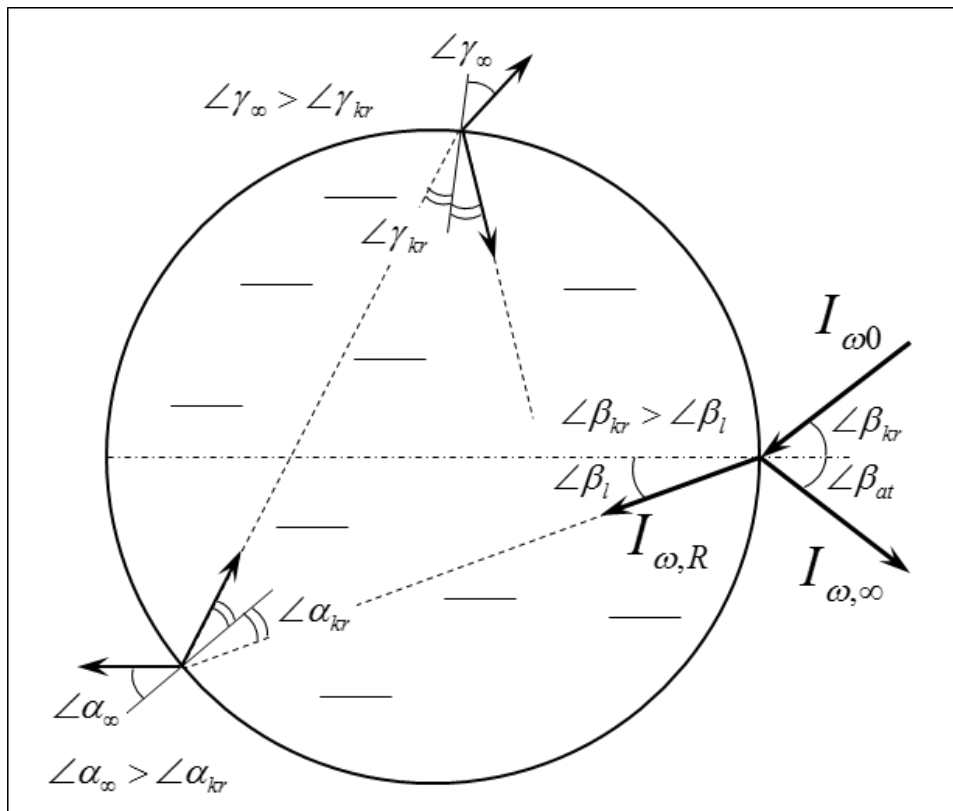
2.2.2 Lašelio šildymo modelis.

Aptarsime, kaip apibrėžti \vec{q}_{Σ}^+ ir \vec{q}_{Σ}^- srautus. Prie lašelio pritekantis suminis šilumos srautas, susideda iš konvekcinio ir radiacinio šilumos srautų dedamųjų:

$$q_{\Sigma}^+ = q_c^+ + q_r^+, \left[\frac{W}{m^2} \right]. \quad (2.16)$$

Vandens lašelis yra pusiau skaidrus kūnas, todėl spinduliuotės srautas sugeriamas ne jo paviršiumi, o lašelio tūryje. Todėl spinduliuotės srautą q_r lašelio paviršiuje, galima apibrėžti tiek pagal išorinį uždavinį, tiek ir pagal vidinį uždavinį. Jų specifiką aptariame vėliau, analizuodami šilumokaitą lašelyje.

$$q_r = q_{r,R}^- \cong q_{r,R}^+, \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]. \quad (2.17)$$



2.7 pav. Į lašelį krintančios spinduliuotės srauto sklaidimo lašelyje schema.

$$q_r^+ = \int_0^\infty \int_0^{4\pi} I_B(T_g, \lambda_B) d\Omega d\lambda_B, \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]. \quad (2.18)$$

Šis uždavinys yra aktualus esant aukštomis temperatūroms. Žemoms temperatūroms, jo galima nepaisyti.

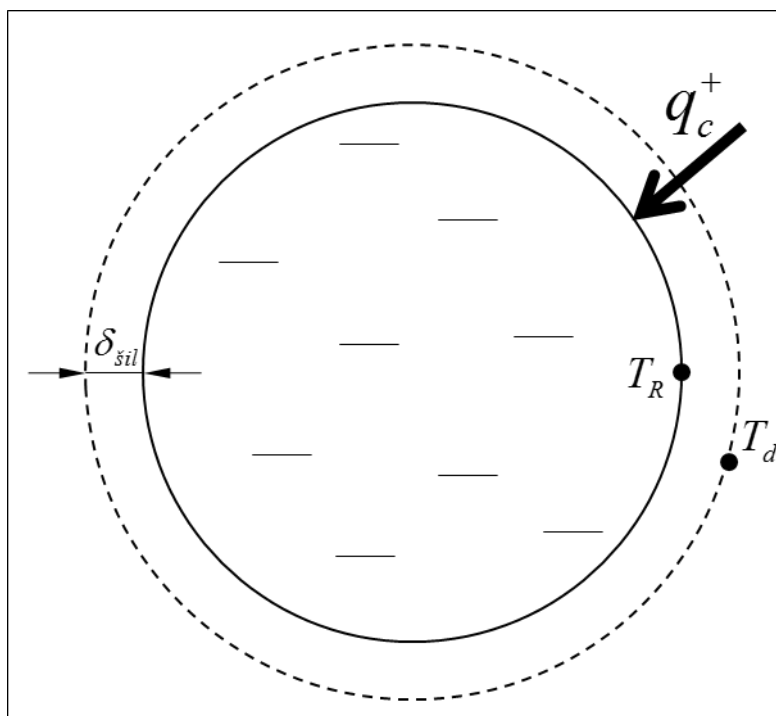
Kai lašelis šildomas jį apiplauančiame žemos temperatūros dujų sraute, tuomet šilumos konvekcija yra pagrindinis lašeliui teikiamos šilumokaitos šaltinis (2.8 pav.). Konvekcinio šildymo intensyvumą apibrėžia Nuselto kriterijus:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda_{gd}}. \quad (2.19)$$

čia: $l \equiv 2R$ – lašelio skersmuo, [m];

α – šilumos atidavimo koeficientas, $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$;

λ_{gd} – garo ir dujų mišinio šilumos laidumo koeficientas, $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$.



2.8 pav. Konvekcinio šilumos srauto schema.

Konvekcinio šilumos srauto tankis q_c^+ aprašomas pagal Niutono šilumos atidavimo dėsnį:

$$q_c^+ = \frac{Nu}{2R} \cdot \lambda_{gd} (T_d - T_R), \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]. \quad (2.20)$$

Problema ta, kad vykstant faziniams virsmams, šilumokaitą lydi Stefano hidrodinaminis srautas, kuris silpnina konvekcinio šildymo intensyvumą, kai lašelis garuoja. Todėl (2.20) išraiškoje neatitinka kietos dalelės atveju apskaičiuotam Nu_{kiet} ir turi būti pakoreguotas:

$$Nu = Nu_{kiet} \cdot f_{BT}. \quad (2.21)$$

čia: f_{BT} – pataisos dėl Stefano hidrodinaminio srauto funkcija.

Nu_{kiet} išraiškos yra gerai žinomos ir sferiškai dalelei yra [13]:

$$Nu_{kiet} = 2 + 0,57 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}; \quad (2.22)$$

čia Reinoldso kriterijus yra:

$$Re = \frac{W_{slyd} \cdot 2R}{\nu_{mod}} = 2 \frac{\rho_d \cdot |W_l - W_d|}{\mu_{gd}} R; \quad (2.23)$$

čia: $\nu_{mod} = \frac{\mu_{gd}(T_{gd})}{\rho_{d,\infty}(T_d)}$ – modifikuotas kinematinės klamos koeficientas, $\left[\frac{m^2}{s}\right]$;

$W_{slyd} = |W_l - W_d|$ – lašelio slydimo dujų sraute greitis, $\left[\frac{m}{s}\right]$;

W_l – lašelio judėjimo greitis, $\left[\frac{m}{s}\right]$;

W_d – dujų srauto tekėjimo greitis, $\left[\frac{m}{s}\right]$;

μ_{gd} – garo ir dujų mišinio dinaminės klamos koeficientas, $\left[\frac{N \cdot s}{m^2}\right]$;

$\rho_{d,\infty}$ - dujų tankis, $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$.

$$Pr = \frac{\nu_{gd}}{a_{gd}}. \quad (2.24)$$

čia: ν_{gd} – garo ir dujų mišinio kinematinės klamos koeficientas, $\left[\frac{m^2}{s}\right]$;

a_{gd} – garo ir dujų mišinio temperatūrinis laidumo koeficientas, $\left[\frac{m^2}{s}\right]$.

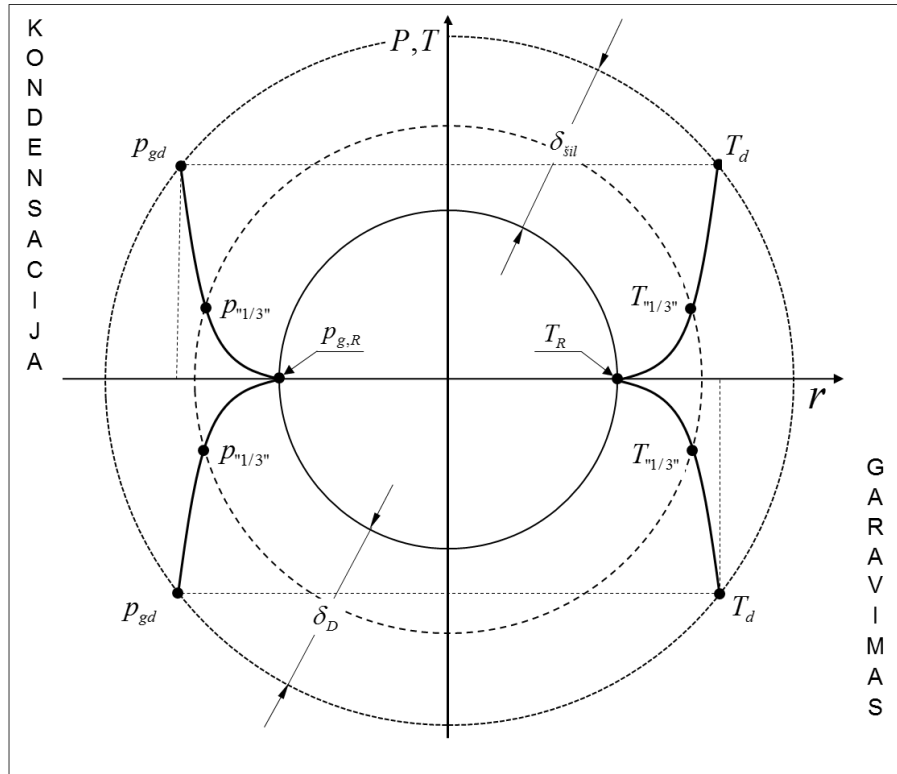
$$a_{gd} = \frac{\lambda_{gd}}{\rho_{gd} \cdot c_{p,gd}}, \left[\frac{m^2}{s}\right]. \quad (2.25)$$

čia: λ_{gd} – garo ir dujų mišinio laidumo koeficientas, $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$;

ρ_{gd} – garo ir dujų mišinio tankis, $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$;

$c_{p,gd}$ – garo ir dujų mišinio savitoji šiluminė talpa, $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$.

Dujų mišinio fizikinės savybės ν_{gd} , λ_{gd} , c_{gd} , $c_{p,gd}$ parenkamos pagal „1/3“ taisyklę.



2.9 pav. „1/3“ taisyklės interpretacijos lašelio geometrijoje schema.

$$T_{1/3}'' = T_R + \frac{T_d - T_R}{3}, [K]. \quad (2.26)$$

$$c_{p,gd} = c_{p,gd}(T_{1/3}''), \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]. \quad (2.27)$$

Vandens garo dalinis slėgis dujų mišinyje apibrėžiamas:

$$p_{g,1/3}'' = p_{g,R} + \frac{p_{g,R} - p_{g,\infty}}{3}, [Pa]. \quad (2.28)$$

$$p_{d,1/3}'' = p_{g,1/3}'' + p_{nesik}, [Pa]. \quad (2.29)$$

Ir šiam mišiniui parenkamas fazinių virsmų srauto slėgis pagal $T_{1/3}''$ temperatūrą.

Pataisos f_{BT} funkcija išraiškoje (2.21), apibrėžiama pagal klasikinę [83] ir empirinę koreliacijos modelius [113], aprašytus (2.30) ir (2.31) išraiškose atitinkamai:

$$f_{BT} = \frac{\ln(1+B_T)}{B_T}; \quad (2.30)$$

čia: B_T – Spoldingo šilumos pernašos parametras;

$$f_{BT} = \frac{1}{(1+B_T)^{0,7}}. \quad (2.31)$$

(2.30) modelis tinkamas lašelio mažo slydimo dujose atveju, o (2.31) tinkamas, kai lašelio slydimas intensyvus. Todėl praktikoje pritaikomas jų apibendrinimas [13]. Tuomet (2.21) išraiška atrodys taip:

$$Nu_f = 2 \cdot \frac{\ln(1+B_T)}{B_T} + 0,57 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3} \cdot \frac{1}{1+B_T}. \quad (2.32)$$

Spoldingo šilumos pernašos parametras B_T apibrėžiamas išraiška [13]:

$$B_T = \frac{c_{p,gd} \cdot (T_g - T_R)}{L + q_l / m_g}; \quad (2.33)$$

čia: $c_{p,gd}$ – garo ir dujų mišinio savitoji šiluminė talpa, $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$;

L – garavimo šiluma, $\left[\frac{J}{kg}\right]$;

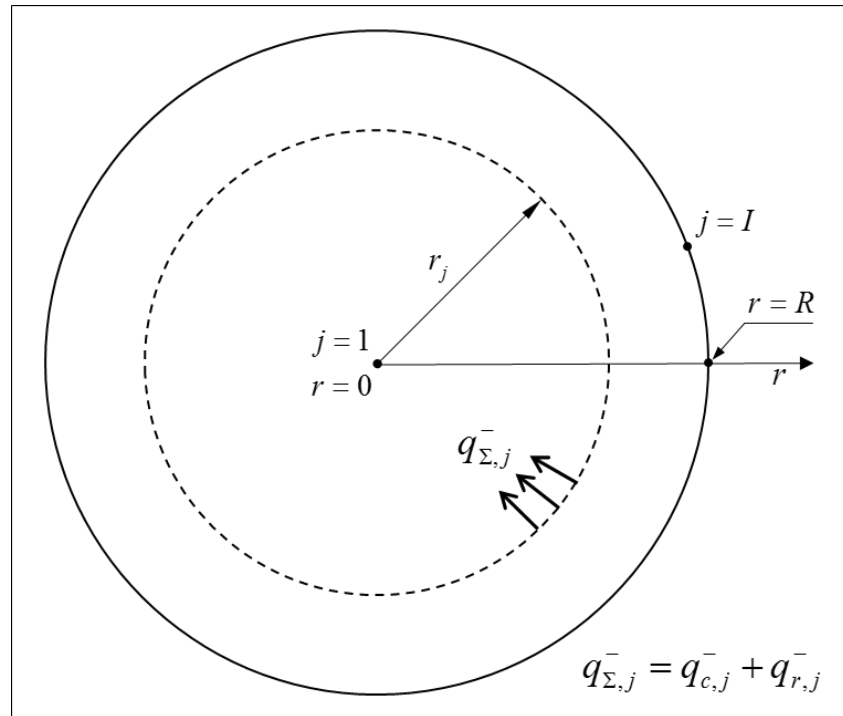
q_l – vandens šildymui lašelyje teikiama šiluma, $\left[\frac{W}{m^2}\right]$;

m_g – garo srautas, $\left[\frac{kg}{m^2 \cdot s}\right]$.

2.2.3 Šilumokaitos lašelyje modelis

Sudėtinės šilumokaitos atveju, lašelyje šiluma plinta laidumu ir spinduliavimu:

$$q_{\Sigma}^-(r, \tau) = q_l^-(r, \tau) + q_r^-(r, \tau), \left[\frac{W}{m^2}\right]. \quad (2.34)$$



2.10 pav. Lokalinio suminio šilumos srauto apskaičiavimo interpretacijos lašelyje schema.

(2.10 pav.) $q_{\Sigma,j}^-$ lokalinis suminis šilumos srautas lašelyje. Norint jį apibrėžti, reikia žinoti temperatūros lauką lašelyje. Jį aprašo $T(r, \tau)$ funkcija. Kadangi temperatūra kinta pagal koordinatę r ir dar gali kisti laike, kai lašelis šyla arba aušta.

Šilumos srauto q_{Σ}^- balanso (2.15) išraišką apibrėžiame pagal (2.34), kai $r \equiv R$:

$$q_{\Sigma}^-(r) \equiv q_{\Sigma}^-(r = R, \tau), \left[\frac{W}{m^2}\right]. \quad (2.35)$$

Šilumos srauto $q_{\Sigma}^-(r, \tau)$ radiacinė dedamoji, apskaičiuojama pagal (2.18) išraišką, pritaikius ją lašeliui, jo sferiškumo prielaidos rėmuose [114].

Šilumos laidumo srauto dedamoji apibrėžiama pagal Furje šilumos laidumo dėsnį:

$$q_l^-(r, \tau) = -\lambda_l \cdot \text{grad}T_{r=R} = -\lambda_l \cdot \left. \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=R}, \left[\frac{W}{m^2} \right]. \quad (2.36)$$

čia: λ_l – skysčio lašelyje laidumo koeficientas, $\left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$,

$\text{grad}T_{r=R} = \left. \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=R}$ – temperatūrinis gradientas, $\left[\frac{K}{m} \right]$.

Kadangi (2.36) lygtyje šilumos srauto ir temperatūros gradiento vektoriai yra skirtingų krypčių, lygties ženklas yra neigiamas.

Temperatūros $T(r, \tau)$ laukas lašelyje ir jo $\text{grad}T_r(\tau) = \text{grad}T(r, \tau)$ aprašomos pagal [13] modelį. Reikia atkreipti dėmesį į tai, jog slystančio lašelio paviršiuje kyla trinties jėgos ir jos gali privesti cirkuliuoti skystį lašelyje. Tuomet šilumos nuvedimas į lašelį bus intensyvesnis negu laidumo atveju. Tai įvertinama efektyviuoju šilumos laidžiu k_e^- parametru:

$$q_l^-(r, \tau) = q_l^-(r, \tau) \cdot k_e^- = -\lambda_l \cdot k_e^- \cdot \left. \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=R}, \left[\frac{W}{m^2} \right]. \quad (2.37)$$

Šilumos laidžio efektyvusis k_e^- parametras yra $k_e^- = 1 \div 2,73$ [13].

2.3 Skaitinio tyrimo iteracinė schema

Skaitinė schema „lašo“ uždaviniui išspręsti sudaroma pagal (2.34) šilumokaitos modelį, sukonkretizavus šilumos srauto balanso (2.15) lygtį nurodžius, jog $q_r \cong 0$, tuomet (2.15) lygtis bus:

$$\vec{q}_c^+ + \vec{q}_c^- + \vec{q}_f^+ = 0. \quad (2.38)$$

Taikant (2.38) lygtį lašelių fazinių virsmų ciklui, reikia atsižvelgti į vykstantį fazinių virsmų režimą. (2.38)

Kondensacijos režimas:

$$q_c^- = q_c^+ + q_{f=kon}^+ \quad (2.39)$$

Garavimo režimas:

$$q_c^- = q_c^+ - q_{f=gar}^+ \quad (2.40)$$

Bendru atveju, abejoms (2.39) ir (2.40) lygtims išraiška:

$$-\lambda \left. \frac{\partial T(r, \tau)}{\partial r} \right|_{r=R} \cdot k_e^- = \frac{Nu}{2R} \cdot \lambda_{gd} \cdot (T_d - T_R) \cdot f_{BT}^+ + L \cdot \frac{D_{gd} \cdot \mu_g}{T_R \cdot R \cdot R_{\mu}} \cdot p \cdot \ln \frac{p - p_{g,\infty}}{p - p_{g,R}}. \quad (2.41)$$

Gradientas (2.41) lygtyje, aprašomas pagal darbo [114] metodiką.

Išraiška (2.41) aprašo lašelio paviršiaus temperatūros $T_R(\tau)$ funkciją, t.y. apibrėžia, kaip lašelio paviršiaus temperatūra kinta laike.

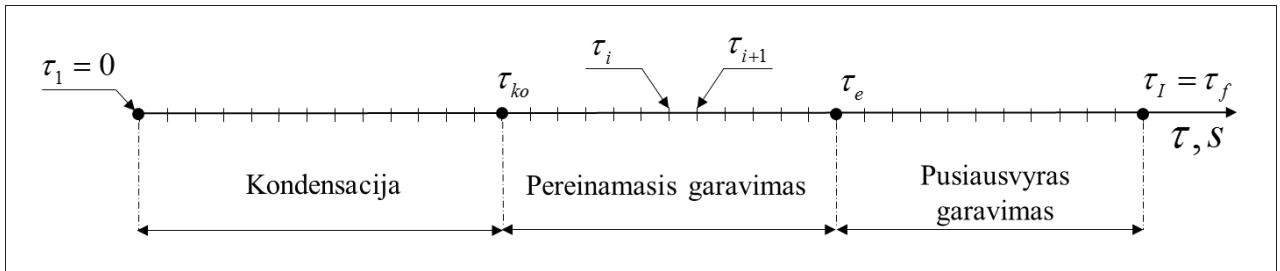
Išraiška (2.41) išsprendžiama skaitiškai tik pagal iteracinę schemą, pagal kurią vykdomas iteracinis ciklas:

$$it = 1 \div IT. \quad (2.42)$$

Šiame cikle, pirmajai $it = 1$ iteracijai parenkama $T_{R,i,it} = T_{R,i-1} + \Delta T_{R,i}$ lašelio temperatūra. Čia $\Delta T_{R,i}$ – konkretus pokytis, pvz. K (tyrėjas jį parenka laisvai, kad $T_{R,min} < T_{R,i,it} < T_{R,max}$, $T_{R,min} \equiv 273,15K$, $T_{R,max} \equiv T_{sot}(P)$).

Po to kitoms $it > 1$ iteracijoms $T_{R,i,it}$ temperatūra parenkama greičiausio nusileidimo metodu, grindžiamu specialia paprograme.

Laiko skalė suskaidoma į I skaičių tarpinių laikų (2.11 pav.).



2.11 pav. Interpretuojamos bematės laiko skalės schema.

Skaidome tolygiai:

$$\Delta\tau_i = \frac{\tau_f - (\tau_1 = 0)}{I - 1} = \frac{\tau_f}{I - 1}. \quad (2.43)$$

Keliama sąlyga:

$$\sum_{i=2}^I (\tau_i - \tau_{i-1}) = \tau_f. \quad (2.44)$$

Iteracinis ciklas vykdomas kiekvienai $\tau_i < \tau_f$. Laiko momentu $\tau_1 = 0$ laikome, jog visus lašelio šilumos ir masės mainų parametrus P_0 žinome. τ_i momentu tariame, jog $T_{R,i} = T_{R,i,it=IT}$.

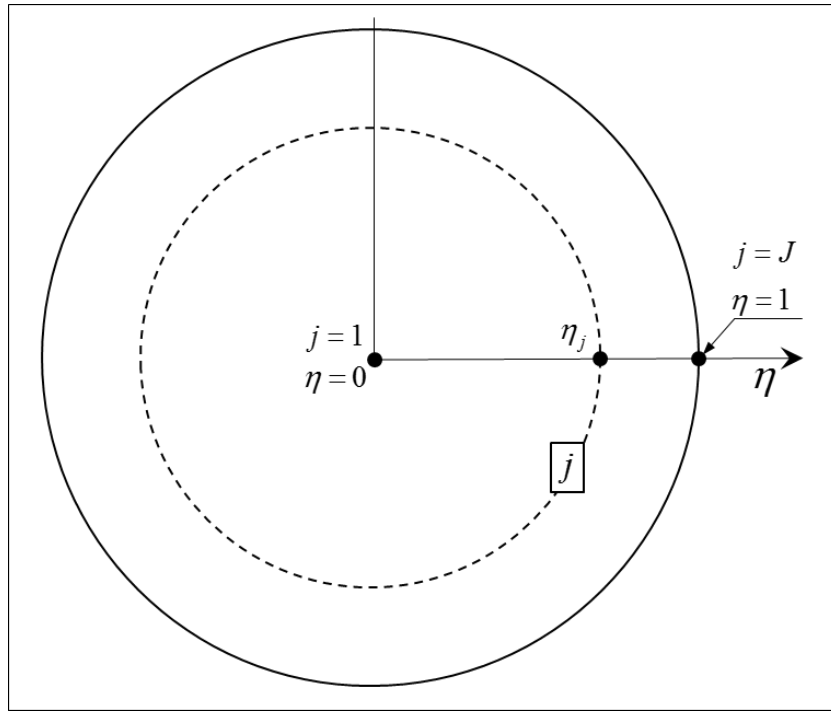
IT iteracijai keliami tikslumo reikalavimai:

- kondensaciniam režimui - $\left| 1 - \frac{q_c^- - q_{f=ko}^+}{q_c^+} \right| \cdot 100\% < 0,05\%$;
- garavimo režimui - $\left| 1 - \frac{q_c^- + q_{f=gar}^+}{q_c^+} \right| \cdot 100\% < 0,05\%$.

Kai $T_{R,i}$ yra apibrėžta, tai lengvai apskaičiuojami visi lašelio šilumos ir masės mainų parametrai τ_i laiko momentu, pagal anksčiau aptartą „lašo“ modelį P_1 .

τ_i kitimą: $\tau_i = \tau_{i-1} + \Delta\tau_i$ baigiame, kai pasiekiamo τ_f (užsiduotą) laiką arba kai lašelis išgaruoja $R_i \approx 0$.

Šilumokaitai lašelyje apibrėžti įvedama bematė lašelio koordinatė $\eta = r/R_i$ (2.12 pav.).



2.12 pav. Lašelio koordinatės η interpretacijos schema.

Koordinatė η lašelio centre visuomet $\eta = 0$, o paviršiuje $\eta = 1$, nors R kinta.

$$\Delta\eta = \frac{1}{J-1}, \quad (2.45)$$

čia $J = 41$.

Keliama sąlyga:

$$\sum_{j=2}^J (\eta_j - \eta_{j-1}) = 1. \quad (2.46)$$

Tuomet lašelio temperatūros laukas $T(\eta, \tau)$ pakeičiamas diskretine funkcija $T_{j,i}$, t.y. kiekviename τ_i laike taikomas individualus temperatūros kitimas lašelyje T_j . Kai $j = 1$, temperatūra T_j yra lygi lašelio centro temperatūrai $T_{j=1} \equiv T_C$, o kai $j = J$, T_j temperatūra yra lygi lašelio paviršiaus temperatūrai $T_{j=J} \equiv T_R$.

Kai apibrėžtas $T_{j,i} \equiv T_{R,i}$, tuomet apibrėžti visi lašo šilumos ir masės mainų parametrai.

3 REZULTATAI

3.1 Tyrimo uždaviniai ir ribinės sąlygos

Uždaviniai:

1. skaitiškai apibrėžti lašelio šilumos ir masės mainų parametrų P kitimą lašelio fazinių virsmų ciklo režimuose;
2. iliustruoti parametrų kitimą grafiškai ir išryškinti kitimo dėsningumus.

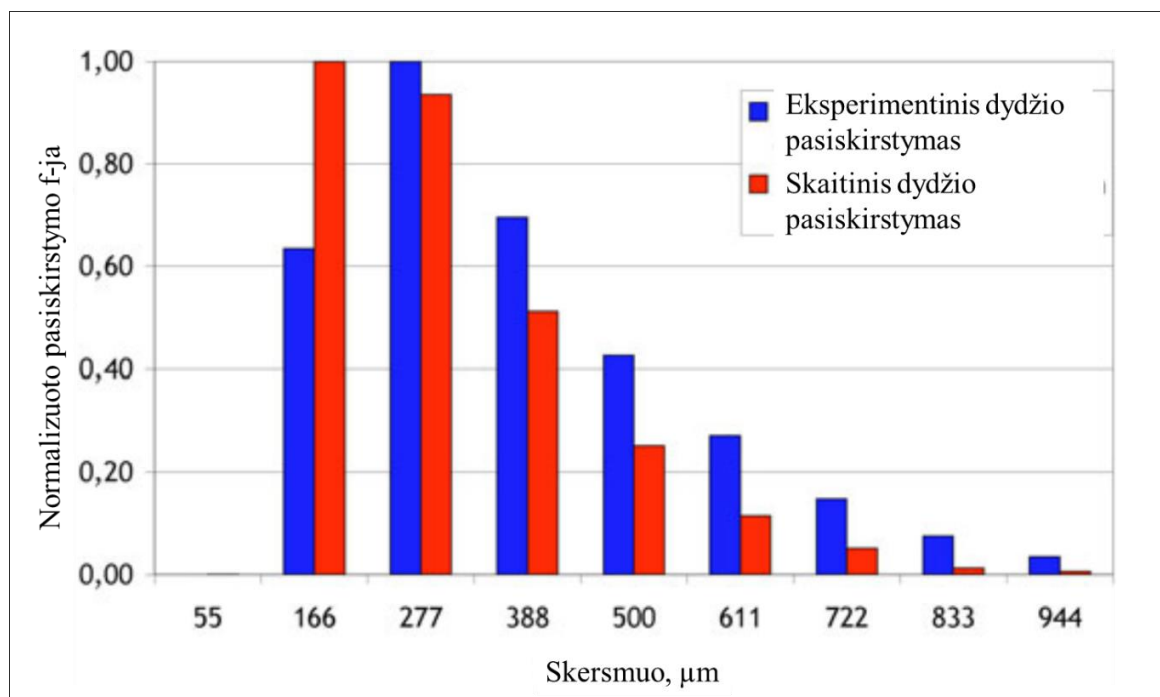
Numatomos kraštinės sąlygos:

- aplinkos dujų temperatūra $T_d \equiv 373 \div 673K$;
- drėgnumas $p = p_{g,\infty}/p = 0,1$, kai $p = 0,1MPa$;
- išpurškiamas šaltas $278K$ arba karštas $343K$ vanduo;
- lašelių slydimo sąlygos: Re : 10, 20, 50, 100;
- lašelių dispersiškumas: $2R$: 30, 50, 100, 150, $200\mu m$.

Matosi, jog uždaviniams pasiekti reikalingas labai platus skaitinis tyrimas, Būtų patogu (naudinga) jį optimizuoti.

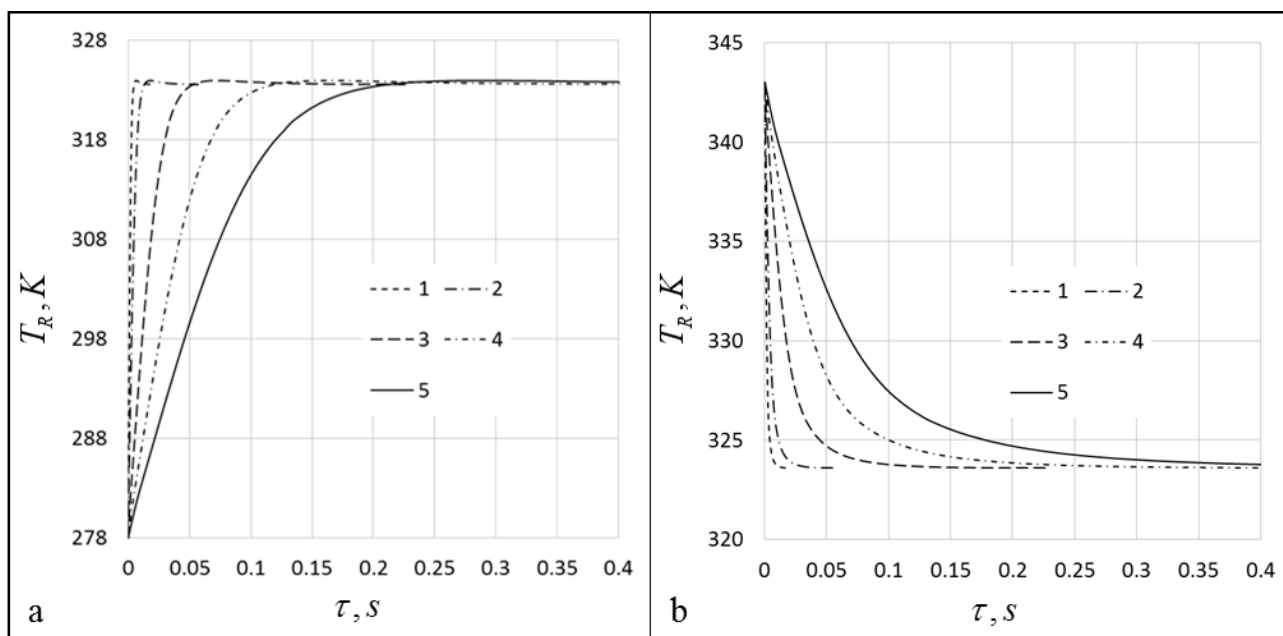
3.2 Skaitinio tyrimo optimizavimo galimybės

Daugiausiai tyrimą išplečia poreikis atsižvelgti į lašelių individualų dispersiškumą, kadangi jis priklauso nuo individualių purkštukų (dispergatorių) parametrų ir teoriškai svyruoja plačiose R_{min} ir R_{max} ribose, kur minimalaus spindulio vertė artėja į nulį $R_{min} \rightarrow 0$, o maksimalaus į begalybę $R_{max} \rightarrow \infty$. Konkretūs, tyrimų metu nustatyti lašelių skersmens parametrai pateikti (3.1 pav.) grafike. Akivaizdu, jog norint įvertinti visas kiekvieno skersmens ($55 \div 944$) lašelių visų parametrų kombinacijas, skaitinis tyrimas būtų labai platus.



3.1 pav. Lašelių skersmens pasiskirstymo funkcijų palyginimas 20cm nuo purkštuko [53].

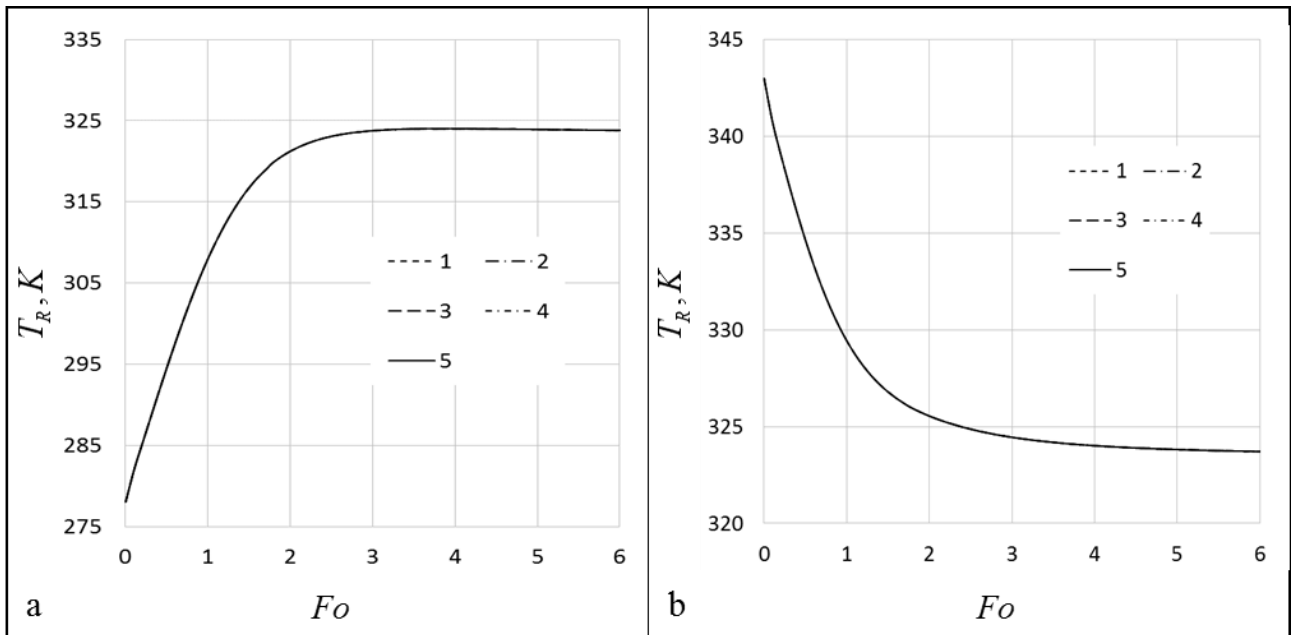
Vykdomė lašelių šilumos ir masės mainų tyrimą, kai $2R \equiv 30, 50, 100, 150, 200 \mu\text{m}$ skersmens lašeliai šyla (aušta) T_d temperatūros dujų mišinyje, jose skysčio garo $\bar{p} = 0,1$, o lašelių slydimo greitis apibrėžiamas $Re_0 = 50$. Tyrimas atliekamas prie skirtingų išpurškiamo vandens temperatūrų T_0, K : 278, 343. Lašeliai garuoja prie pusiausviros T_e temperatūros. Bendru atveju yra laikoma, kad kai $T_0/T_e > 1$, tai vanduo karštas, o $T_0/T_e < 1$ – šaltas.



3.2 pav. Vandens lašelių paviršiaus temperatūros kitimas iki pusiausviros garavimo temperatūros realaus laiko mastelyje. $2R_0 \cdot 10^6, \text{ m}$: (1)30, (2)50, (3)100, (4)150, (5)200; T_0, K : (a) 278, (b) 343.

3.2 pav. akivaizdžiai matosi, jog tiek lašelio šilimas (3.2 pav. a), tiek aušimas (3.2 pav. b) labai priklauso nuo lašelio dydžio. Šalto vandens lašelių paviršiaus temperatūra žemesnė už rasos taško temperatūrą $T_R/T_{rt} < 1$, todėl lašelių paviršiuje vyksta kondensacinis fazinių virsmų režimas, kol lašelio paviršiaus temperatūra pasiekia rasos taško temperatūrą. Kai lašelio paviršiaus temperatūra perkopia rasos taško temperatūrą, bet yra žemesnė nei pusiausviros garavimo temperatūra $T_e > T_R > T_{rt}$, vyksta nestacionarus garavimas, kol T_R pasiekia pusiausviros garavimo temperatūrą T_e (laikas, per kurį pasiekta T_e : 0,0047, 0,0131, 0,0523, 0,1176, 0,2091s). Šie procesai akivaizdžiai atsispindi garo srauto ir jo tankio (3.6 pav. a) bei lašelio masės kitimo (3.8 pav. a) grafikuose. Karšto vandens lašelių temperatūra yra aukštesnė už pusiausviros garavimo temperatūrą $T_R/T_0 > 1$, todėl lašeliai aušta iki pusiausviros garavimo temperatūros T_e (laikas, per kurį pasiekta T_e : 0,0071, 0,0196, 0,0784, 0,1764, 0,3136s). Aiškiai matosi, jog lašelių pašilimas ir ataušimas iki pusiausviros garavimo temperatūros T_e keičiantis skersmeniui $2R$, yra labai individualus.

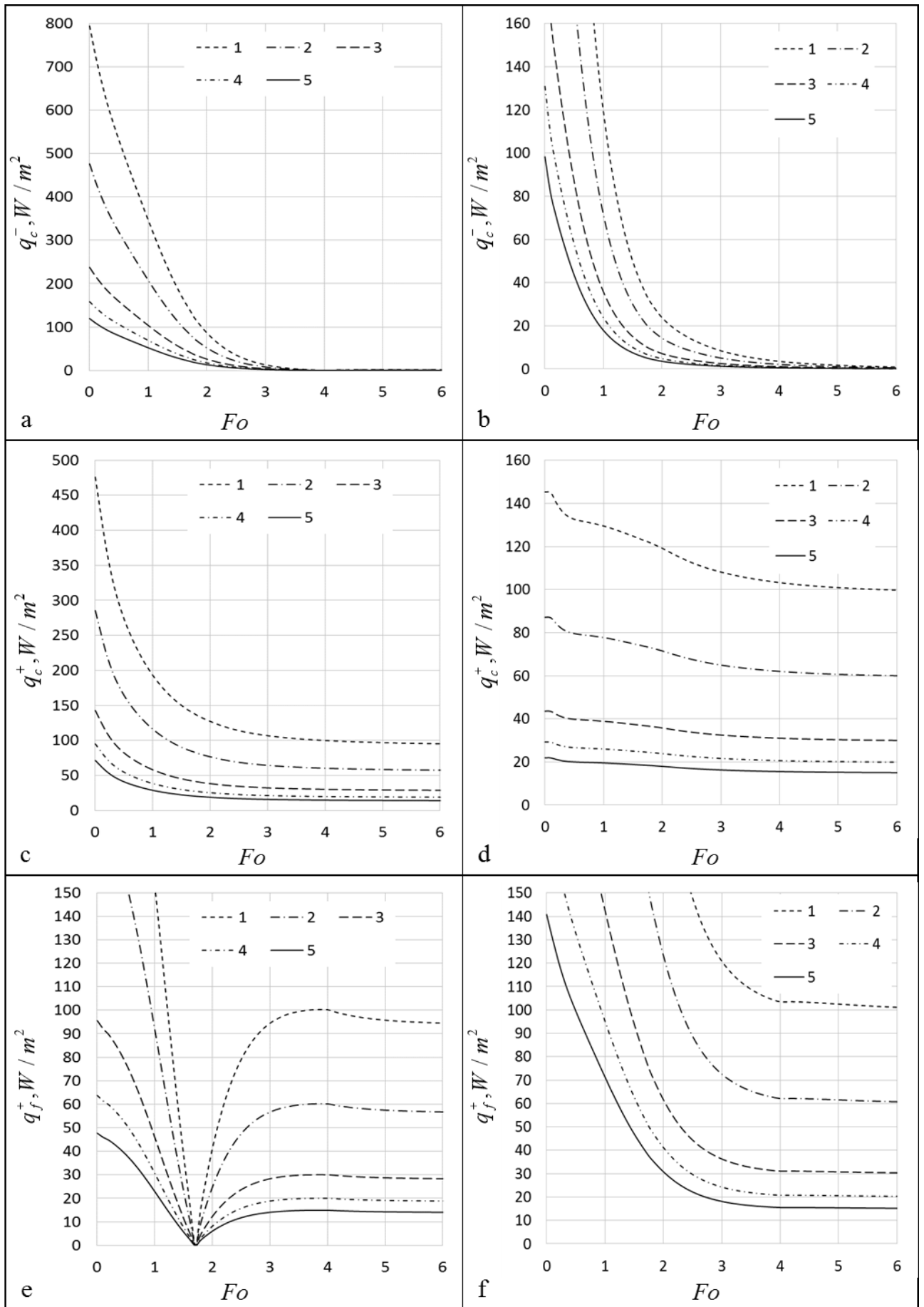
Tačiau, jeigu lašelių šilimą (aušimą) nagrinėsime $Fo = (a_0/R_0^2) \cdot \tau$ Furjė kriterijumi, išreikštu universalus mastelio laiko skalėje, tai visų lašelių pašilimas (3.3 pav. a) arba ataušimas (3.3 pav. b) iki pusiausviros garavimo temperatūros T_e yra aprašomas funkcijos $T_R(Fo)$ grafiku.



3.3 pav. Lašelio paviršiaus temperatūros T_R kitimas iki pusiausviro garavimo temperatūros T_e , išreikštas Furje kriterijaus laiko mastelyje. $2R_0 \cdot 10^6, m$: (1)30, (2)50, (3)100, (4)150, (5)200; T_0, K : (a) 278, (b) 343.

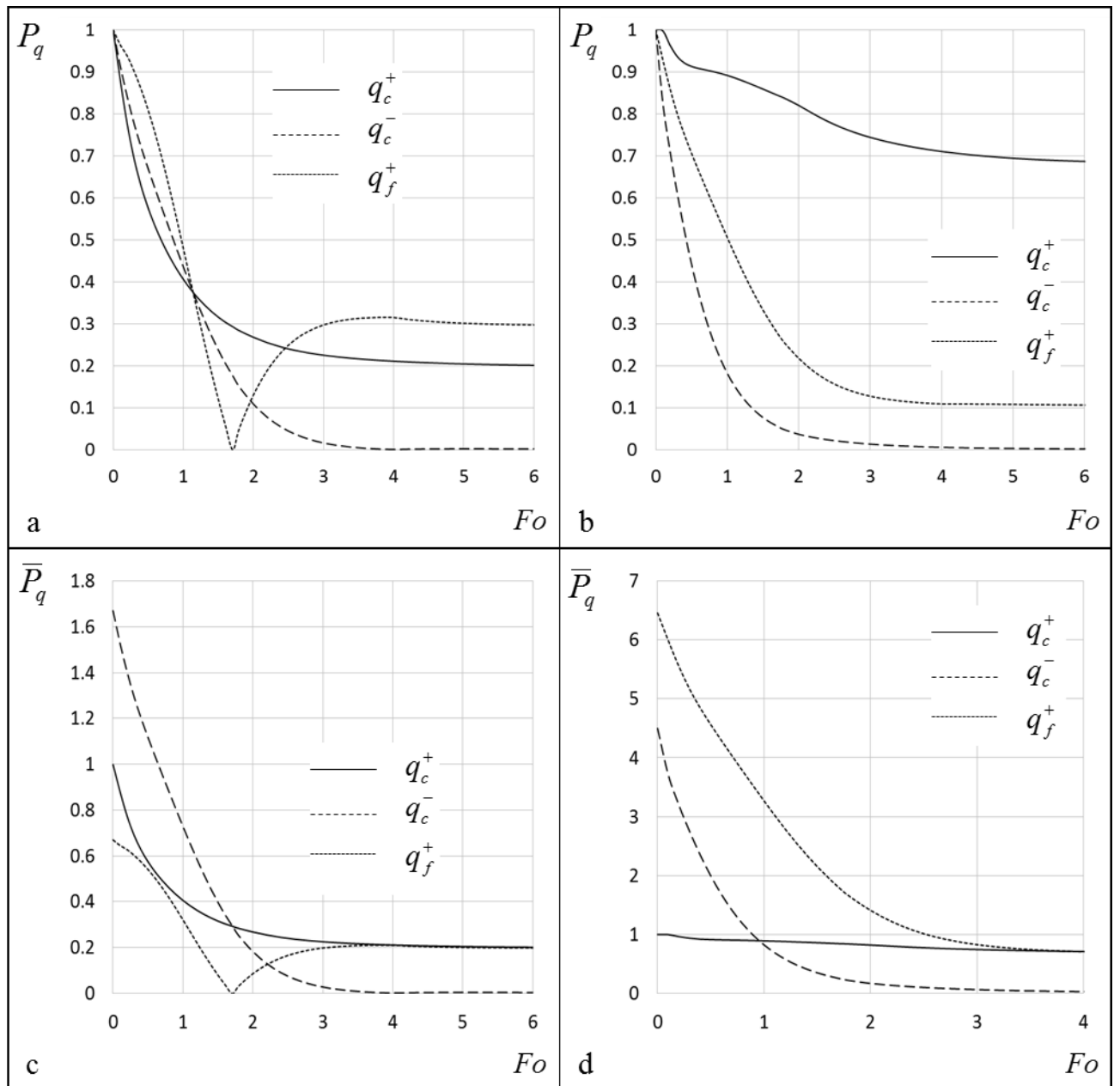
3.3 pav. akivaizdžiai matosi, jog visų tiriamų skersmenų lašeliai šyla (aušta) vienodai, jei laiko mastelis yra išreikštas Furje kriterijumi. Tai yra dėl to, jog pateikiant pernašos procesus Furje masteliu, laidumu šildomų lašelių fazinių virsmų būdingos trukmės nepriklauso nuo skysčio išpurškimo dispersiškumo ir yra vienodos visiems laidumu šildomiems to paties skysčio lašeliams [114,115]. Tai leidžia labai susiaurinti skaitinį tyrimą. Pakanka sumodeliuoti vieno laisvai pasirinkto dispersiškumo lašelio terminę būseną ir fazinių virsmų ciklą apibrėžtų parametrų dujų mišinyje, o kitų pageidaujamų diametrų lašelių pernašos procesų sąveiką įvertinama palyginamuoju būdu.

Svarbu atkreipti dėmesį į tai, jog naudojant Furje mastelyje išreikštų parametrų funkcijas $P(Fo)$ parametrų paieškai, jos galioja tik išpurkšto skysčio lašelio terminės būsenos kitimą fazinių virsmų procese nusakančių terminių P_T parametrų paieškai. Norit palyginamuoju būdu rasti kitus išpurkšto skysčio lašelių šilumokaitą ir masės mainus nusakančius parametrus - energetinius P_q ir fazinių virsmų P_f , būtina sudaryti normuotų parametrų funkcijas $\bar{P} = P(Fo)/P_0$, nes šie parametrai yra jautrūs lašelio dispersiškumui. Tai puikiai atsispindi (3.4 pav.), kur yra pateikti energetinių parametrų $P_q(Fo)$ funkcijų grafikai. Kadangi tiriame laidumu šildomus lašelius, tai energetiniams parametrai bus: pritekantis suminis šilumos srautas $q_{\Sigma}^+ \equiv q_c^+$, šilumos srautas lašelio viduje $q_{\Sigma}^- \equiv q_c^-$, fazinių virsmų šilumos srautas q_f^+ .



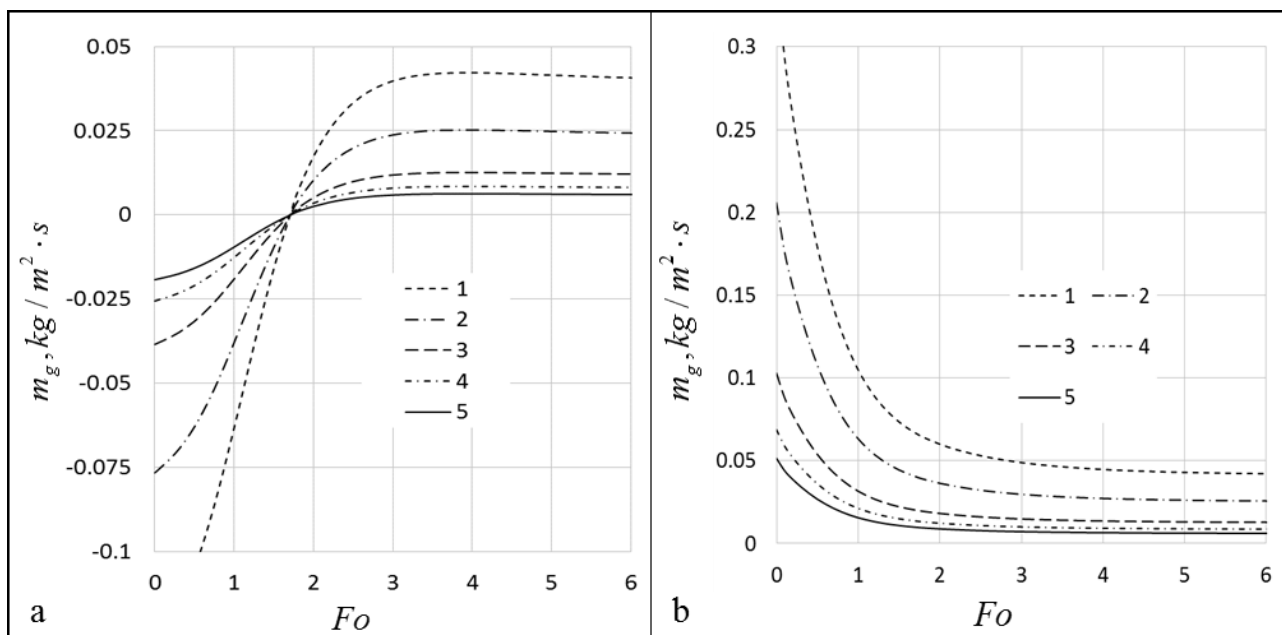
3.4 pav. Energetinių parametų $P_q(Fo)$ funkcijų grafikai šalto ir karšto vandens išpurškimo atvejais. $2R_0 \cdot 10^6$, m: (1)30, (2)50, (3)100, (4)150, (5)200; T_0 , K: (a, c, e) 278, (b, d, f) 343.

(3.4 pav.) matome, jog energetinių parametų kreivės labai savotiškos tiek lašelio šilimo, tiek aušimo atvejais ir nėra jokio universalumo, kuri galėtume panaudoti skaičiavimo supaprastinimui. Tačiau šiuos parametrus išreiškus normuotų energetinių parametų funkcijomis $\bar{P}_q(Fo)$, lašelių dispersiškumas nebeturi įtakos. Normuojančiu vardikliu yra naudojamos energijos srautų pradinės vertės, užtikrinančios $\bar{P}_q(Fo) \equiv P_q(Fo)/P_{q,0}$ funkcijų būdingo grafiko kreivių vieningą pradžios tašką $\bar{P}_q(Fo \equiv 0) = 1$ (3.5 pav. a, b) [10]. Normuojančiu vardikliu patogiu naudoti pradinį pritekantį šilumos srauto tankį $q_{\Sigma,0}^+ \equiv q_{c,0}^+$. Šio normuojančio vardiklio pagrindu sudarytų funkcijų grafikuose akivaizdžiai atsispindi atskirų energijos srautų indėlio lašelio energiniame balanse dinamika (3.5 pav. c, b).



3.5 pav. Normuoti šilumos srautai lašelių paviršiuje, išreikšti Furje kriterijaus laiko mastelyje. T_0, K : (a, c) 278, (b, d) 343.

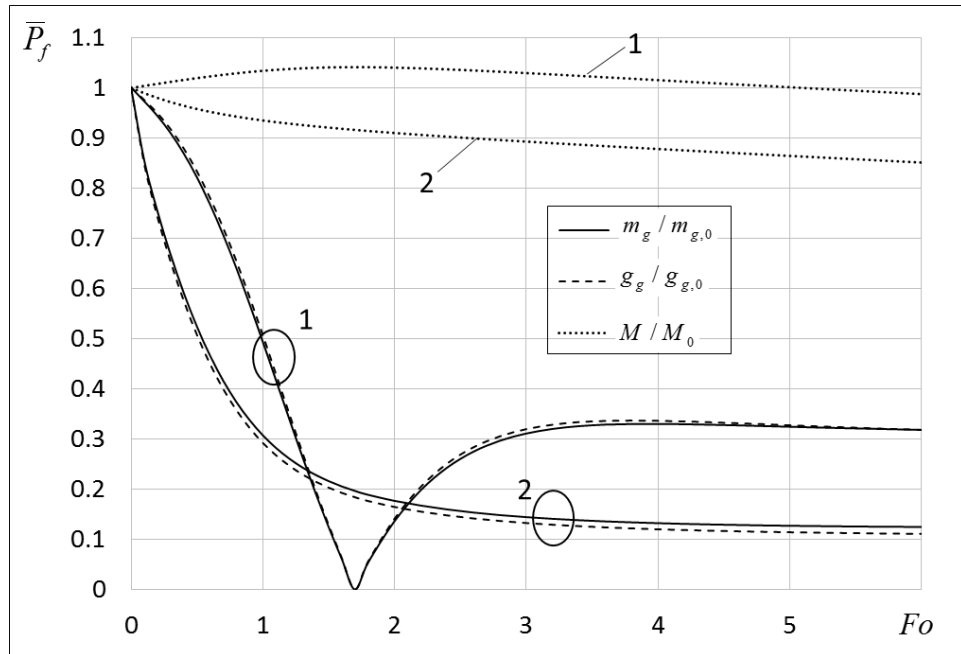
Garų srautas ir jo tankis bei jų dinamikos nulemtas lašelio matmens kitimas yra esminiai fazinių virsmų P_f parametrai. Garų srauto tankio $m_g(\tau)$ funkcijos pažinimas ir tinkamas valdymas įgalina reguliuoti daugelio terminių technologijų efektyvumui svarbią garų srauto $g(\tau)$ funkciją, lemiančią skysčio lašelių gyvavimo ciklą. Pastaroji turi aiškų grįžtamąjį poveikį išpurkšto skysčio lašelių terminiams ir energiniams parametrams [10]. Kaip ir energinių parametru taip ir fazinių virsmų parametru palyginamajame vertinime, būtina naudoti normuotų parametru funkcijas, nes tiek garų srauto ir jo tankio grafikai (3.6 pav.), tiek masės kitimo grafikas stipriai priklauso nuo lašelio dispersiškumo.



3.6 pav. Garų srauto tankio kitimas ant šalto (a) ir karšto (b) vandens lašelių paviršiaus, išreikštas Furje kriterijaus laiko mastelyje. $2R_0 \cdot 10^6$, m : (1)30, (2)50, (3)100, (4)150, (5)200; T_0 , K: (a) 278, (b) 343.

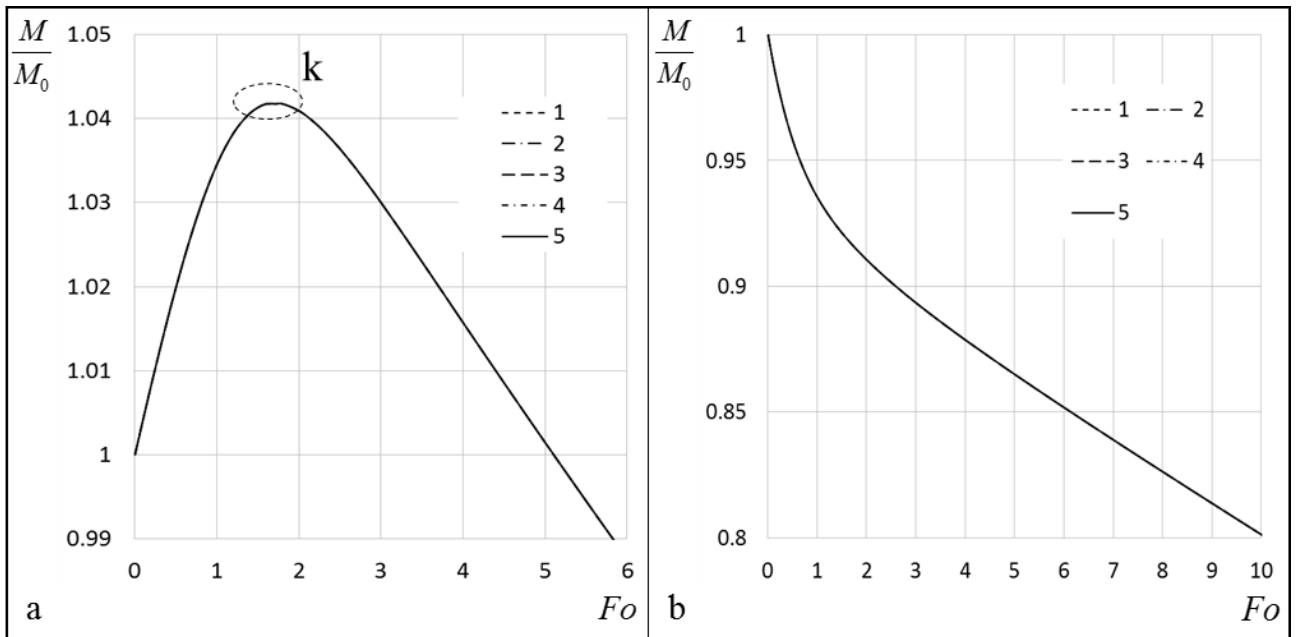
Išpurškus šaltą vandenį, lašelio paviršiuje vyksta intensyvus kondensacinis fazinių virsmų režimas, kuris gerai matomas garų srauto tankio $m_g(Fo)$ funkcijos grafike (3.6 pav. a), kur garų srauto tankio m_g ženklas yra neigiamas, kurį nulemia Stefano logaritmas garų srauto tankio lygtyje (2.10). Garų kondensacija puikiai matoma ir lašelio normuotos masės $\bar{M}(Fo) = M(Fo)/M_0$ funkcijos grafike (3.7 pav., 3.8 pav. a), kur yra matomas akivaizdus lašelio masės augimas. Kondensaciniame fazinių virsmų režime, visa lašeliui teikiama šiluma ir fazinių virsmų šiluma yra nuvedama į lašelį $q_c^- = q_c^+ + q_f^+$ (3.5 pav. c). Garų kondensacinis režimas vyksta tol, kol lašelio paviršiaus temperatūra pasiekia rasos taško temperatūrą $T_R \equiv T_{rt} \equiv T_{sot}(\bar{p}_{g,\infty})$. Garų srauto tankio nulinė vertė (3.6 pav. a; 3.7 pav.) aiškiai apibrėžia fazinių virsmų režimo lašelio paviršiuje kaitos iš garų kondensacinio režimo į skysčio nestacionariojo garavimo režimą momentą. Kadangi $m_g^+ = 0$, todėl ir fazinių virsmų šilumos srautas $q_f^+ = 0$ (3.4 pav. e; 3.5 pav. a, c). Lašelio šildymo intensyvumas atitiks apsupties šiluminio poveikio intensyvumą $q_c^- = q_c^+$. Šiuo metu vandens lašelio

masė yra maksimali (3.7 pav.; 3.8 pav. a, pažymėta k). Nestacionariojo garavimo režimo metu, lašeliui teikiama šiluma vandenį lašelyje šildo ir kartu garina $q_f^+ = q_c^+ - q_c^-$. Lašeliui pasiekus termodinaminę pusiausvirą, vyksta pusiausviras garavimas ir visa lašeliui teikiama šiluma tik garina lašelio vandenį $q_f^+ = q_c^+$.



3.7 pav. Vandens lašelių fazinių virsmų normuoti parametrai, išreikšti Furje kriterijaus laiko masteliu. T_0 , K : (1) 278, (2) 343.

Išpurškiant karštą vandenį, lašelio paviršiuje vyksta intensyvus garavimo fazinių virsmų režimas (3.5 pav. d). Normuotų fazinių virsmų funkcijos grafike (3.7 pav.) ir (3.8 pav. b) ir puikiai yra matomas lašelio masės kritimas. Masės kritimą galima paaiškinti jo paviršiuje matomu aukšto garo srauto tankiu m_g (3.6 pav. b), kuris byloja apie intensyvų garo srauto nutekėjimą nuo lašelio. (3.5 pav. d) matome, jog visa lašeliui teikiama šiluma ir lašelio vidinė šiluma yra sunaudojamos lašelio vandens garinimui $q_f^+ = q_c^+ + q_c^-$. Tai taip pat atsispindi ir lašelio paviršiaus temperatūros $T_R(Fo)$ funkcijos grafike (3.3 pav. b), kur puikiai matomas temperatūros kritimas. Krentant temperatūrai, taip pat matomas akivaizdus q_c^- sando indėlio kritimas (3.5 pav. d) energetinio balanso dinamikai ir galiausiai pasiekia nulinę vertę. Kuomet $q_c^- = 0$, lašelio paviršiaus temperatūra susilygina su pusiausvyros temperatūra $T_R = T_e$ ir lašelio paviršiuje vyksta pusiausviras garavimas, kurio metu visa lašeliui teikiama šiluma sunaudojama jo garinimui $q_f^+ = q_c^+$ (3.5 pav. b, d).



3.8 pav. Šalto ir karšto vandens lašelių normuotos masės $\bar{M}(Fo)$ funkcija. $2R_0 \cdot 10^6$, m: (1)30, (2)50, (3)100, (4)150, (5)200; T_0 , K: (a) 278, (b) 343.

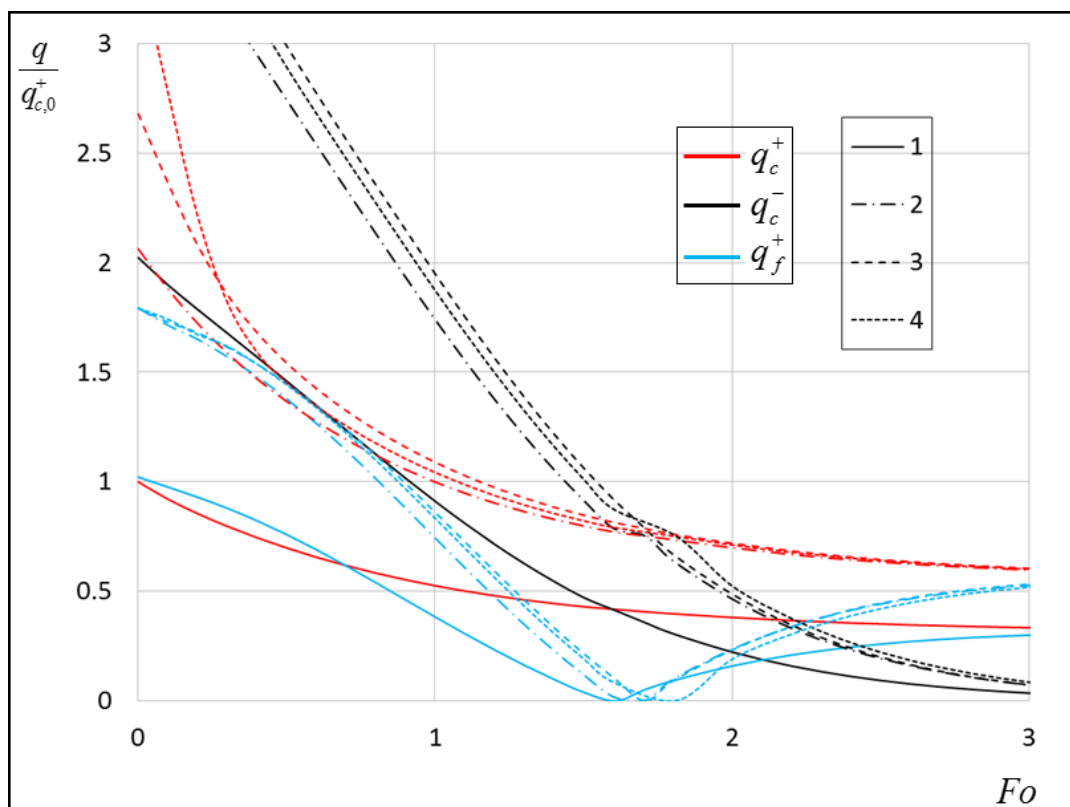
Iš atlikto tyrimo matome, jog išpurškto skysčio lašelių šilumokaitą ir masės mainus nusakančius parametrus P galime rasti, taikant palyginamąjį vertinimą. Terminių P_T parametrų paieškai, užtenka realaus laiko (τ, s) mastelį pakeisti į Furje kriterijumi išreikštą laiko mastelį (Fo) ir šie parametrai puikiai atsispindi šių parametrų $P(Fo)$ funkcijų grafikuose. Tačiau energinių P_q ir fazinių virsmų P_f parametrų vertinimui, būtina sudaryti normuotų $\bar{P}(Fo)$ parametrų funkcijas.

Svarbu paminėti, tai jog atlikto tyrimo metu, buvo tiriama lašelio dispersiškumo įtaka, išpurškus šaltą ar karštą skystį į vienodos T_d temperatūros dujas, kuriose buvo priimtas vienodas lašelių slydimo greitis Re . Taigi, kai tiriama lašeliai yra tokių pačių parametrų dujų mišinyje, skaitinis tyrimas akivaizdžiai gali būti optimizuotas. Pakanka sumodeliuoti vieno pasirinkto dispersiškumo lašelio šilumos ir masės mainus, o kitų pageidaujamų diametrų lašelių pernašos procesų sąveiką

3.3 Lašelio slydimo greičio įtaka vandens lašelių šilumos ir masės mainams

Vykdomė lašelių šilumos ir masės mainų tyrimą, kai $2R \equiv 100\mu m$ skersmens lašeliai šyla $T_d = 373K$ temperatūros dujų mišinyje, jose skysčio garo $\bar{p} = 0,1$, o lašelių slydimo greitis apibūdinamas $Re_0 = 10, 20, 50, 100$. Tyrimas atliekamas išpurškiant šaltą $T_0 = 278K$ temperatūros vandenį.

Išpurkšto vandens lašelių paviršiaus temperatūra yra žemesnė už rasos taško temperatūra, todėl lašelio paviršiuje vyksta intensyvus kondensacinis fazinių virsmų režimas. Šio režimo metu, lašelis yra šildomas tiek fazinių virsmų metu išsiskyrusia q_f^+ šiluma, tiek apsupties teikiama q_c^+ šiluma, tai $q_c^- = q_c^+ + q_f^+$. Tai puikiai atsispindi energetinių srautų indėlio lašelio energetiniame balanse (3.9 pav.) grafikas. Matomas svarus fazinių virsmų šilumos indėlis kondensacinio režimo metu, kuris staigiai krenta ir fazinių virsmų kaitos metu $q_f^+ = 0$. Tačiau didėjant lašelio slydimo greičiui, fazinių virsmų šilumos srauto indėlis lašelio energetiniame balanse kondensacijos pradžioje krenta. Vyraujant lašelio slydimo greičiams $Re > 20$, fazinių virsmų pradinio momento sando dydis nekinta, yra vienodas visiems lašelio slydimo greičiams. Galima teigti, jog lašelio kondensacinio fazinių virsmų režimo pradžios momente, slydimo greitis fazinių virsmų teikiamai šilumai įtakos neturi (3.9 pav.; 3.11 pav. b). Tačiau tolimesniam kondensacijos režimui turi matomą įtaką. Fazinių virsmų kondensacinis režimas vyksta intensyviau (3.11 pav.) prie aukštesnių lašelio slydimo greičių ir jo trukmė pailgėja (3.11 pav. a). Kondensacinio fazinių virsmų režimo trukmė: 0,029991s; 0,031857s; 0,032147s; 0,033848s, kai Re : 10, 20, 50, 100 atitinkamai.

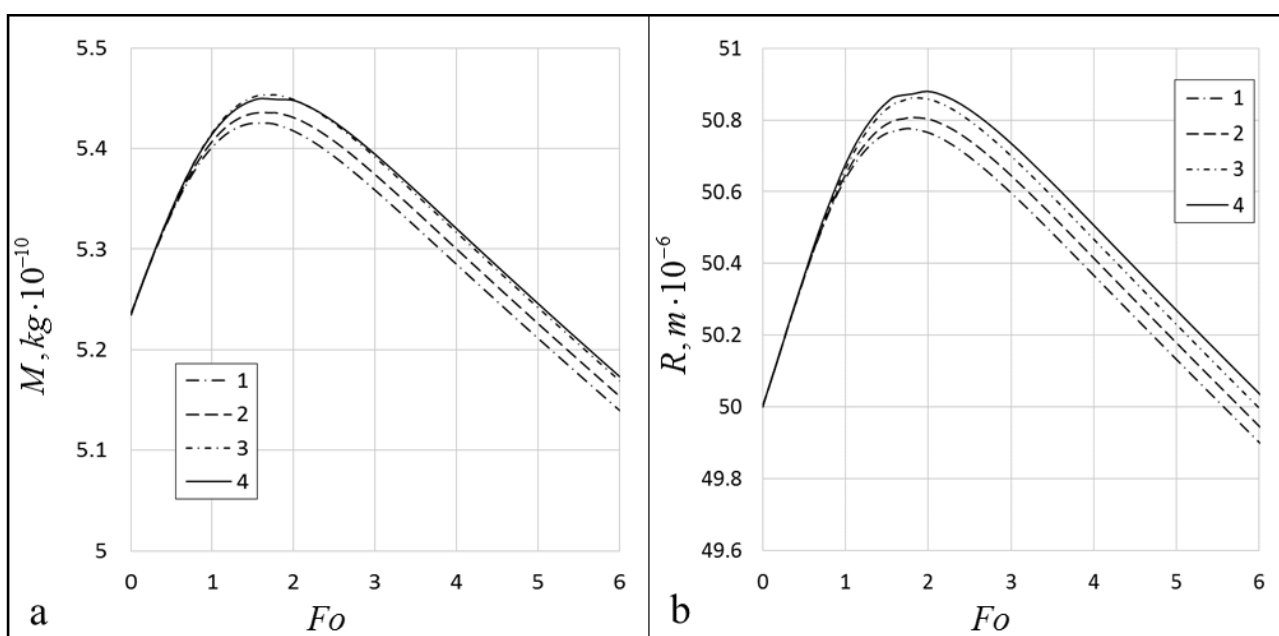


3.9 pav. Energetinių srautų indėlio lašelio energetiniame balanse dinamika. Re_0 : (1) 10, (2) 20, (3) 50, (4) 100; $T_0=278K$; $2R_0=100\mu m$; $T_d=373K$.

Fazinių virsmų kaitos iš kondensacinio fazinių virsmų režimo į nestacionaraus garavimo fazinį režimą momentu, lašelio masės (3.10 pav. a) ir spindulio vertės (3.10 pav. b) yra maksimalios. Lašelio masė ir geometrinis matmuo auga dėl garo srauto kondensacijos ant jo paviršiaus. Grafikuose atsispindi, jog lašelio slydimo greitis akivaizdžiai turi įtakos lašelio masės ir geometrinio matmens kitimui. Didėjant lašelio slydimo Re greičiui, kondensacinio fazinių virsmų režimo metu, lašelio masės ir spindulio vertė pastebimai išauga (3.1 lentelė).

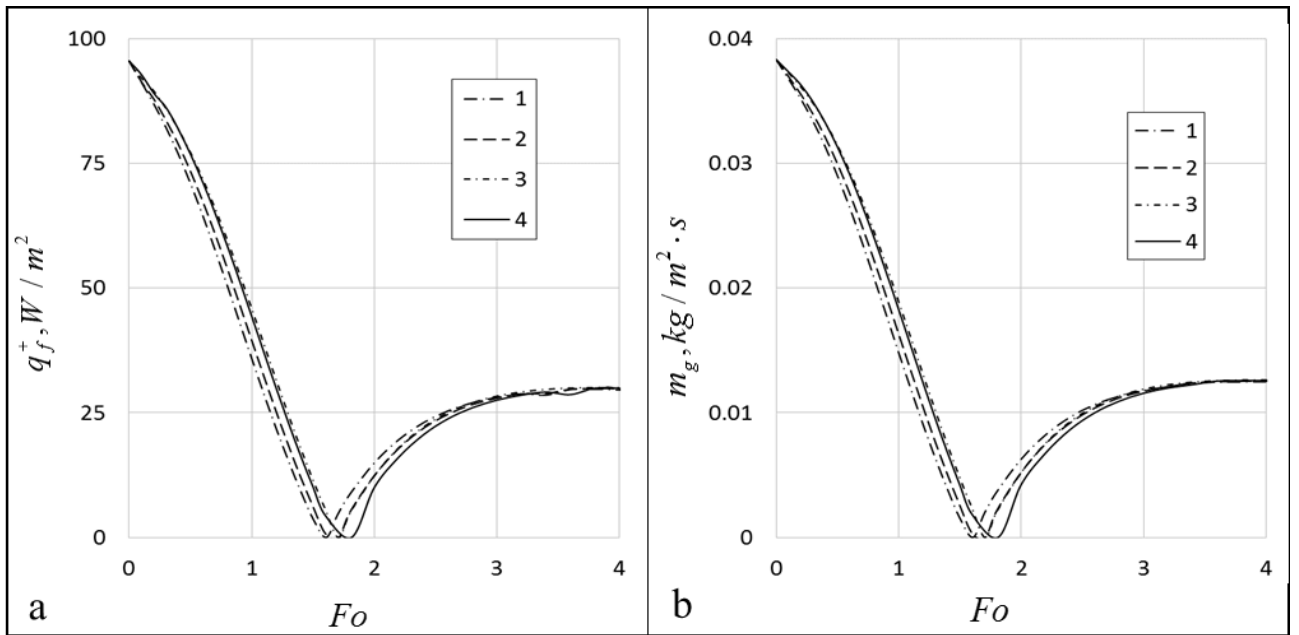
3.1 lentelė. Lašelio masės ir spindulio vertės, kondensacinio fazinių virsmų režimo pabaigoje prie skirtingo lašelio slydimo greičio intensyvumo.

Re_0	10	20	50	100
$M, kg \cdot 10^{-10}$	5.425647	5,435706	5,453354	5,449999
$R, m \cdot 10^{-6}$	50,77527	50,80742	50,86288	50,8793



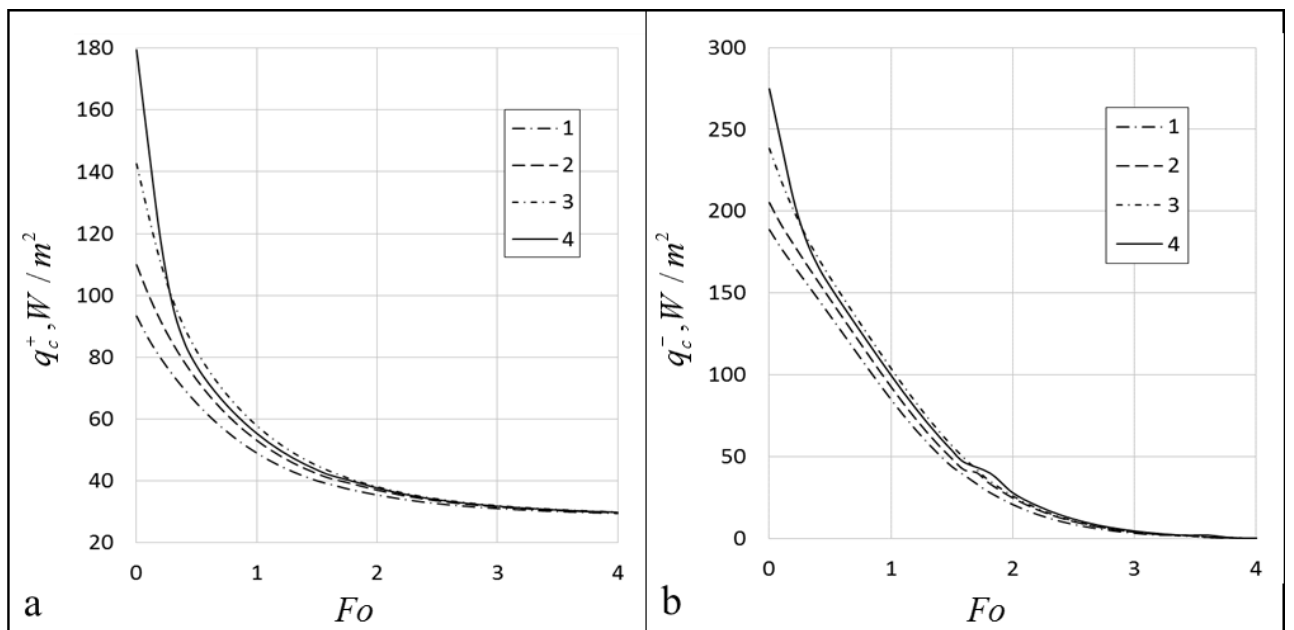
3.10 pav. Lašelio slydimo greičio įtaka vandens lašelio masės ir dispersiškumo kitimui fazinių virsmų metu. Re_0 : (1) 10, (2) 20, (3) 50, (4) 100; $T_0=278K$; $2R_0=100\mu m$; $T_a=373K$.

Kaip jau minėta, keičiantis lašelio slydimo greičiui, kondensacinio fazinių virsmų režimo trukmė kinta, tai reiškia jog jam pailgėjus, ilgesnį laiko periodą prie lašelio priteka garo srautas, kas įtakoja prieš tai aptartus fazinių virsmų parametrus. Tačiau yra matoma, jog lašelio slydimo greičio kitimas, taip pat turi įtakos pritekančiam prie lašelio garo srauto tankiui m_g (3.11 pav. b). Akivaizdžiai matoma, jog kondensacijos fazinių virsmų pradžios momente garo srauto tankis yra vienodas visų lašelio paviršiaus slydimo greičiams. Tai pagrindžiama garo srauto tankio (2.10) lygtimi ir paaiškina, kodėl pradžios momentu fazinių virsmų šilumos srautas yra vienodas visiems lašelio slydimo Re greičiams.



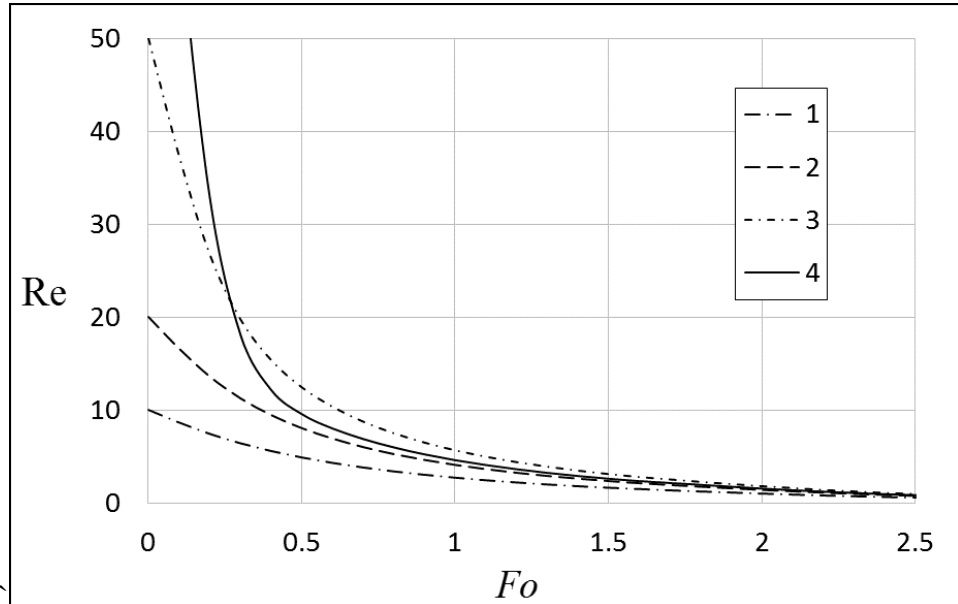
3.11 pav. Lašelio slydimo greičio įtaka lašelio fazinių virsmų šilumos srautui ir garo srauto tankiui kondensaciniame ir garavimo fazinių virsmų režimuose. Re_0 : (1) 10, (2) 20, (3) 50, (4) 100; $T_0=278K$; $2R_0=100\mu m$; $T_d=373K$.

Kondensacinio fazinių virsmų režimo metu, turėtų būti atkreiptas ypatingas dėmesys į lašelio slydimo greičio įtaką išorinei konvekcijai. Intensyvėjant lašelio slydimo greičiui, akivaizdžiai išauga išorinės konvekcijos šilumos srauto pradžios momento vertės (3.12 pav. a; 3.2 lentelė). Tai lemia, jog išorinės konvekcijos q_c^+ indėlis energetinių srautų indėlio energetiniame balanse (3.9 pav.) pradžios momentu tampa esminiu. Jos pradžios momento indėlis perauga fazinių virsmų indėlį $q_f^+ < q_c^+$, kai $Re > 20$.



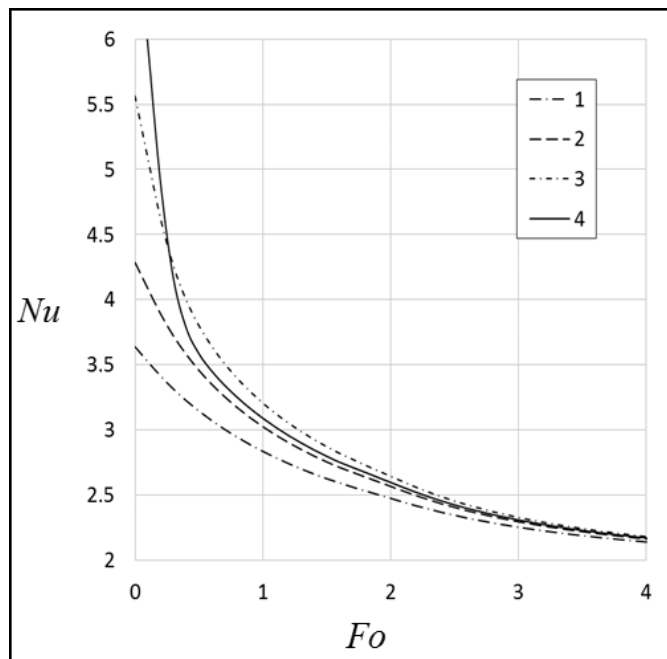
3.12 pav. Lašelio slydimo greičio įtaka išoriniai (a) ir vidinei (b) konvekcijai. Re_0 : (1) 10, (2) 20, (3) 50, (4) 100; $T_0=278K$; $2R_0=100\mu m$; $T_d=373K$.

Po pradžios momento, matyti itin staigus išorinės konvekcijos kritimas (3.9 pav.; 3.12 pav. a). Šį reiškinį lemia tai, jog kondensaciniame fazinių virsmų režime, lašelių slydimo greitis slopsta labai intensyviai ir pradinis Re_0 sumažėja keletą kartų (3.13 pav.).



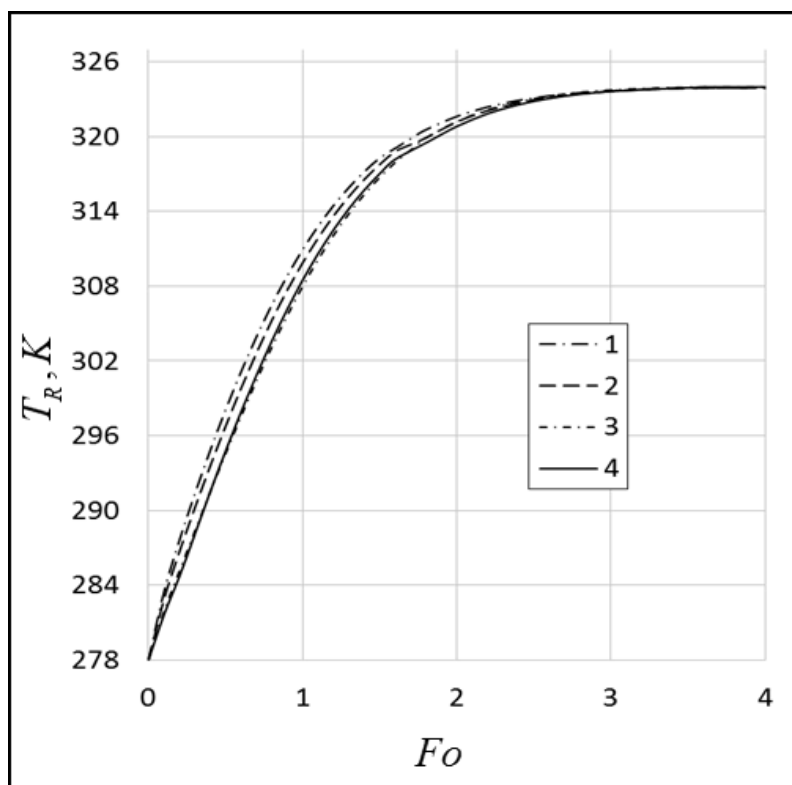
3.13 pav. Vandens lašelių slydimo greičio slopimas dujų mišinyje. Re_0 : (1) 10, (2) 20, (3) 50, (4) 100; $T_0=278K$; $2R_0=100\mu m$; $T_d=373K$.

Lašelių slydimo greičio slopimas, savo ruožtu labai stipriai įtakoja konvekcinius procesus. Konvekcinio šildymo intensyvumas tolygiai krinta su mažėjančiu lašelių slydimo greičiu. Konvekcinio šildymo intensyvumą apibrėžia Nuselto kriterijus ir jo priklausomybė nuo lašelių slydimo greičio, grafiškai pateikta (3.14 pav.).



3.14 pav. Lašelio slydimo greičio įtaka Nuselto kriterijui. Re_0 : (1) 10, (2) 20, (3) 50, (4) 100; $T_0=278K$; $2R_0=100\mu m$; $T_d=373K$.

Išorinės konvekcijos šilumos srauto intensyvumui įtakos turi ir lašelio paviršiaus temperatūra T_R . Ji daro tiesioginę įtaką šilumokaitos varomajai jėgai, kuri apibrėžiama aplinkos dujų mišinio temperatūros ir lašelio paviršiaus temperatūros $T_d - T_R$ skirtumu. Taigi, lašeliui palaipsniui šylant (3.15 pav.), palaipsniui krenta ir šilumokaitos varomoji jėga, kuri įtakoja konvekcijos šilumos srautą. Reikėtų pastebėti, kad lašelio slydimo greičio intensyvėjimas, teigiamai veikia šilumokaitos varomąją jėgą, dėl lėčiau kylančios lašelio paviršiaus temperatūros.

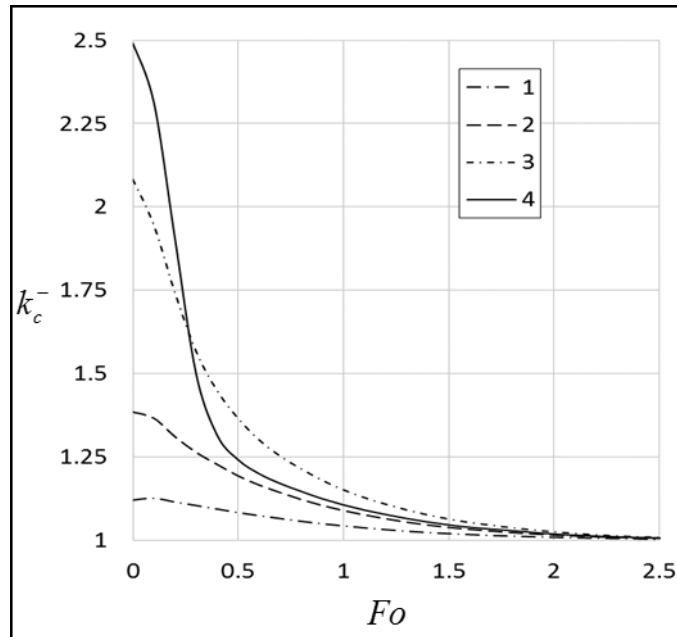


3.15 pav. Lašelio paviršiaus slydimo greičio intensyvumo įtaka lašelio paviršiaus temperatūrai. Re_0 : (1) 10, (2) 20, (3) 50, (4) 100; $T_0=278\text{K}$; $2R_0=100\mu\text{m}$; $T_d=373\text{K}$.

Lašelio slydimo greitis daro įtaką ne tik išorinei konvekcijai (3.12 pav. a), bet ir vidinei (3.12 pav. b) lašelio konvekcijai. Dėl trinties jėgų kylančių tarp lašelio paviršiaus ir jį aptekančio dujų mišinio, jo paviršiuje sukiamas vandens judėjimas, kurio judesio momentas persiduoda į lašelio vidinius sluoksnius, sukeldamas tūrinį lašelio maišymąsi ir taip šilumos nuvedimas į lašelį tampa intensyvesnis negu laidumo atveju. Tai įvertinama efektyviuoju šilumos laidžio k_c^- parametru. Lašelio slydimo greičio įtaka šilumos laidžio parametrai grafiškai pateikta (3.16 pav.), o pradžios momento vertės pateiktos (3.2 lentelė).

3.2 lentelė. Išorinės ir vidinės konvekcijos bei šilumos laidumo parametro pradinio momento vertės.

Re_0	10	20	50	100
q_c^-	188,8099	205,3434	238,1024	274,9837
q_c^+	93,34425	109,8778	142,6367	179,5181
k_c^-	1,120453	1,384926	2,083251	2,491293



3.16 pav. Lašelio slydimo greičio įtaka efektyviojo laidumo parametrui. Re_0 : (1) 10, (2) 20, (3) 50, (4) 100; $T_0=278K$; $2R_0=100\mu m$; $T_a=373K$.

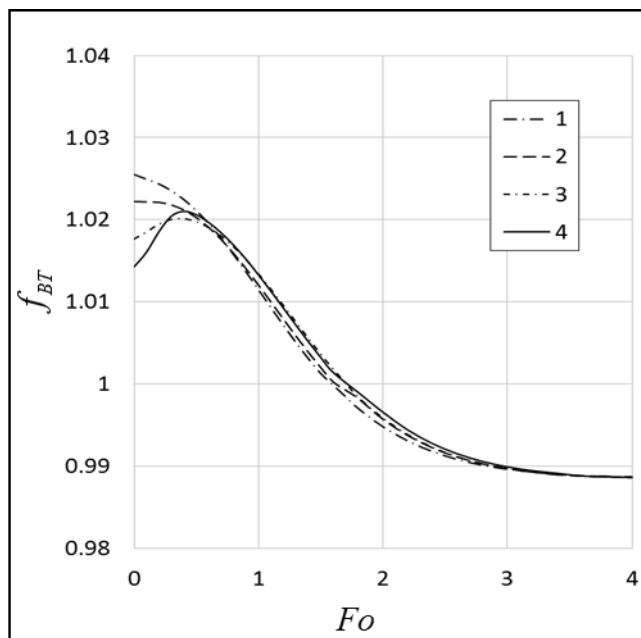
Fazinių virsmų režimo lašelio paviršiuje kaitos iš garo kondensacinio režimo į skysčio nestacionariojo garavimo režimo momentu, lašelis yra šildomas tik išorine konvekcija $q_c^+ = q_c^-$. Tai gerai matoma (3.9 pav.) grafike. Išorinės konvekcijos šilumos srauto (raudona) ir į lašelio nuvedamo šilumos srauto (juoda) susikirtimo taške, jų vertės yra vienodos, o fazinių virsmų šilumos srautas yra nulinis. Kadangi $q_f^+ = 0$, reiškia jog nevyksta masės mainai $m_g^+ = 0$ (3.11 pav. b).

Prasidėjus fazinių virsmų garavimo režimui, fazinių virsmų šilumos srautas pradeda didėti (3.11 pav. a) dėl intensyvėjančio garavimo (3.11 pav. b). Dėl nutekančio garo srauto, mažėja tiek lašelio masė (3.10 pav. a), tiek geometrija (3.10 pav. b). Lašelio garinimo metu, išorine konvekcija tiekiamas šiluma yra labai svarbi, nes ji sunaudojama tiek lašelio šildymui, tiek jo garinimui (3.9 pav.). Šiluma lašelio šildymui yra nuvedama iki kol lašelis pasiekia pusiausviros temperatūrą. Palaipsniui šylant lašeliui į jį nuvedamos šilumos kiekis mažėja (3.12 pav. b), o šiluma lašelio garinimui išauga, dėl ko lašelio garinimas intensyvėja. Pusiausviro garavimo režime, garo srauto intensyvumas auga dėl mažėjančio lašelio diametro. Prieš pat lašelio išgaravimo momentą, jis tampa artimas begalybei.

Vykstant garavimo faziniams virsmams, matoma, kad palaipsniui krenta išorinės konvekcijos šilumos srautas. Vienas iš įtakojančių faktorių jau minėta šilumokaitos varomoji jėga. Kitas įtakojančias faktorius, fazinių virsmų šilumokaitą lydis Stefano hidrodinaminis srautas, kuris silpnina konvekcinio šildymo intensyvumą, kai lašelis garuoja ir intensyvina kondensacijos metu. Jo įtaka įvertinama f_{BT} pataisos funkcija (3.17 pav.). Ši funkcija yra daugiklis (2.21) lygtyje, todėl jos reikšmėms $f_{BT} > 1$ yra įvertinamas Stefano hidrodinaminio srauto poveikis kondensaciniame fazinių

virsmų režime, o kai reikšmės $f_{BT} < 1$ yra įvertinamas Stefano hidrodinaminio srauto poveikis garavimo fazinių virsmų režime.

3.17 pav. matoma, jog garavimo fazinių virsmų režime vyraujant intensyvesniam lašelio paviršiaus slydimo greičiui Stefano hidrodinaminio srauto išorinės konvekcijos slopinimo poveikis silpnėja.



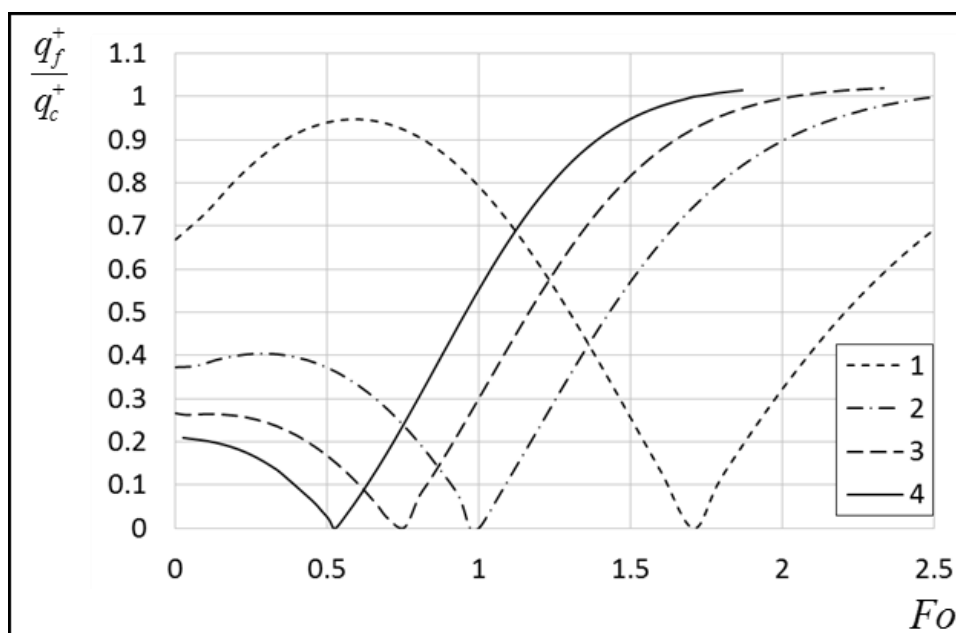
3.17 pav. Lašelio slydimo greičio įtaka Stefano hidrodinaminio srauto pataisos funkcijai. Reo: (1) 10, (2) 20, (3) 50, (4) 100; $T_0=278\text{K}$; $2R_0=100\mu\text{m}$; $T_d=373\text{K}$.

Atlikto tyrimo metu buvo tiriama lašelio paviršiaus slydimo greičio intensyvumo įtaka, išpurškus šaltą vandenį į 373K temperatūros dujas. Buvo nustatyta, jog lašelio paviršiaus slydimo greičio intensyvumas labiausiai paveikia išorinę bei vidinę lašelio konvekcijas. Išorinės konvekcijos vertės kondensacinio fazinio virsmų režimo pradžios momentu akivaizdžiai išauga prie didesnio lašelio paviršiaus slydimo greičio. Lašelio vidinė konvekcija taip pat labai suintensyvėja, dėl intensyvesnės vidinės lašelio cirkuliacijos, kurią sukelia kylančios trinties jėgos tarp lašelio paviršiaus ir jį aptekančių dujų mišinio. Ilgėjanti kondensacinio fazinių virsmų režimo trukmė ir intensyvesnis garo srautas lašelio paviršiuje iššaukia didesnę lašelio masės bei matmens pokytį.

3.4 Dujų mišinio temperatūros įtaka vandens lašelių šilumos ir masės mainams

Vykdome lašelių šilumos ir masės mainų tyrimą, kai $2R \equiv 100\mu m$ skersmens lašeliai šyla $T_a, K: 373, 473, 573, 673$ temperatūros dujų mišinyje, jose skysčio garo $\bar{p} = 0,1$, o lašelių slydimo greitis apibrėžiamas $Re_0 = 50$. Tyrimas atliekamas išpurškiant šaltą $T_0 = 278K$ temperatūros vandenį.

Išpurkšto šalto vandens lašelis šyla kondensacinio fazinių virsmų režimo metu. Kondensaciniame fazinių virsmų režime lašelį šildo apsupties suteikta šiluma ir besikondensuojančio garo išskirta fazinių virsmų šiluma: $q_c^- = q_c^+ + q_f^+$. Fazinių virsmų šilumos ir išorinės konvekcijos šilumos srautų sandų santykis pateiktas grafiškai (3.18 pav.).



3.18 pav. Dujų mišinio temperatūros įtaka fazinių virsmų šilumos srauto ir išorinės konvekcijos šilumos srauto santykiui. $R_0=50\mu m$; $T_0=278K$; $Re_0=50$; T_a, K : (1) 373, (2) 473, (3) 573, (4) 673.

Akivaizdžiai matosi, jog išorinės konvekcijos šilumos srauto dedamoji pradžios momentu yra didžiausia. Jos įtaka išauga dar labiau, jei šaltas vanduo išpurškiamas aukštesnės temperatūros dujų mišinyje. Tai atsispindi (3.18 pav.), kur matomas srautų santykio vertės mažėjimas pradžios momente. Šio santykio vertei artėjant į nulį, išorinės konvekcijos šilumos srauto sando indėlis lašelio šildymo energetinių srautų balanse didėja, lyginant su fazinių virsmų šilumos srauto sando indėliu. Išorinės konvekcijos ir fazinių virsmų šilumos srautų pradžios momento vertės pateiktos (3.3 lentelė).

Būtina turėti omenyje, jog (3.18 pav.) fazinių virsmų ir išorinės konvekcijos šilumos srautų santykis atvaizduotas tiek kondensacinio, tiek garavimo fazinių virsmų režimų metu. Kondensacinis fazinių virsmų režimas vyksta nuo pradžios momento iki fazinių virsmų režimo kaitos momento, kur fazinių virsmų ir išorinės konvekcijos šilumos srautų santykis tampa nuliniu $q_f^+ / q_c^+ = 0$, nes $q_f^+ = 0$ (3.20 pav. a). Fazinių virsmų režimui perėjus į garavimo fazinių virsmų režimą, (3.18 pav.) grafiškai pateiktas fazinių virsmų ir išorinės konvekcijos šilumos srautų santykis apibūdina išorinės

konvekcijos šilumos srauto dalį $q_f^+ = q_c^+ - q_c^-$, nuvedamą lašelio garinimui. Kylanti šio santykio vertė indikuoja augančią išorinės konvekcijos šilumos srauto dalį tenkančią garavimo faziniams virsmams ir intensyvėjantį garavimą (3.22 pav.).

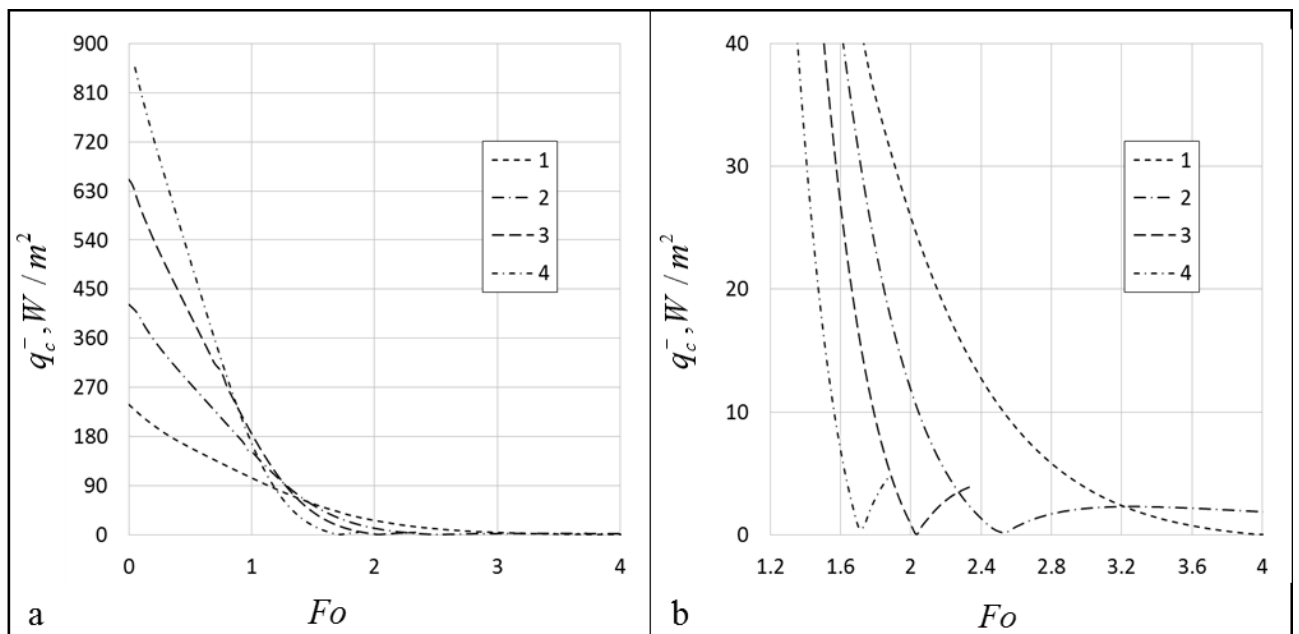
3.3 lentelė. Išorinės konvekcijos šilumos srauto vertės pradžios momentu prie skirtingos dujų mišinio temperatūros.

T_d, K	373	473	573	673
$q_{c,0}^+, \frac{W}{m^2 \cdot s}$	142,6367	308,1139	514,2095	732,1222
$q_{f,0}^+, \frac{W}{m^2 \cdot s}$	95,46565	114,6102	136,4417	153,3075
$\frac{q_{f,0}^+}{q_{c,0}^+}$	0,669292	0,371973	0,265343	0,209402

Garavimo fazinių virsmų režimas intensyvėja, dėl sparčiai krintančios vidinės lašelio konvekcijos (3.19 pav.). Grafike akivaizdžiai atsispindi, jog vidinės lašelio konvekcijos pradžios momento vertės labai skiriasi, kintant dujų mišinio temperatūrai. Kylant dujų mišinio temperatūrai, vidinės lašelio konvekcijos pradžios momento vertės didėja (3.4 lentelė).

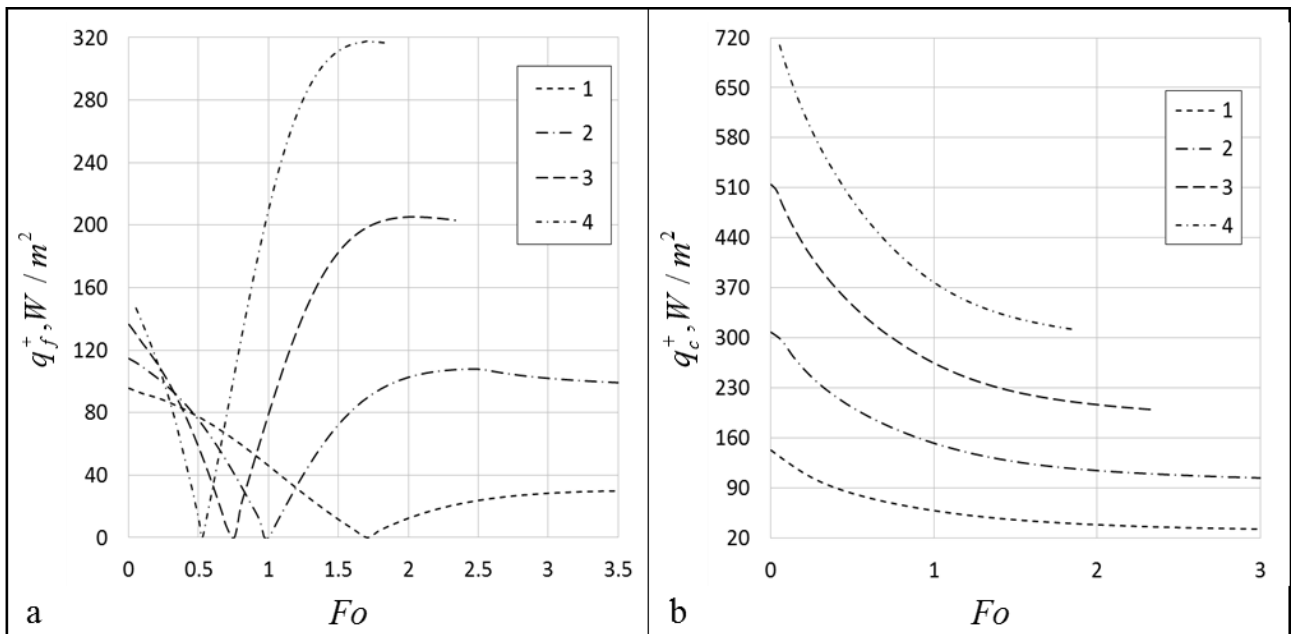
3.4 lentelė. Dujų mišinio temperatūros įtaka pradžios momento vidinei lašelio konvekcijai.

T_d, K	373	473	573	673
$q_{c,0}^-, \frac{W}{m^2 \cdot s}$	238,1024	422,7241	650,6512	904,0754

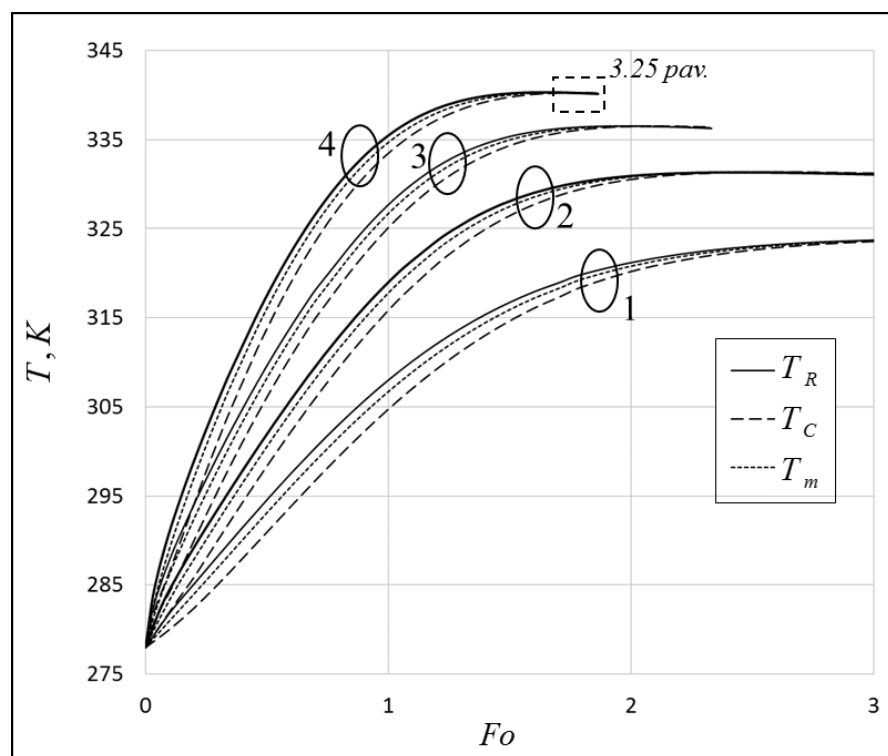


3.19 pav. Dujų mišinio temperatūros įtaka vidinei lašelio konvekcijai. $R_0=50\mu m$; $T_0=278K$; $Re_0=50$; T_d, K : (1) 373, (2) 473, (3) 573, (4) 673.

Matomas staigus vidinės konvekcijos (3.19 pav.) kritimas, kuriam tiesioginės įtakos turi išorinės konvekcijos (3.20 pav. b) ryškus intensyvumo silpnėjimas. Ši išorinės konvekcijos silpimo tendencija, gali būti paaiškinta šilumokaitos varančiosios jėgos $T_d - T_R$ mažėjimu, kuri tiesiogiai priklauso nuo dujų mišinio ir lašelio paviršiaus temperatūros. Lašelio paviršiaus temperatūros kitimas šylant skirtingų temperatūrų dujų mišinyje pateiktas grafiškai (3.21 pav.).

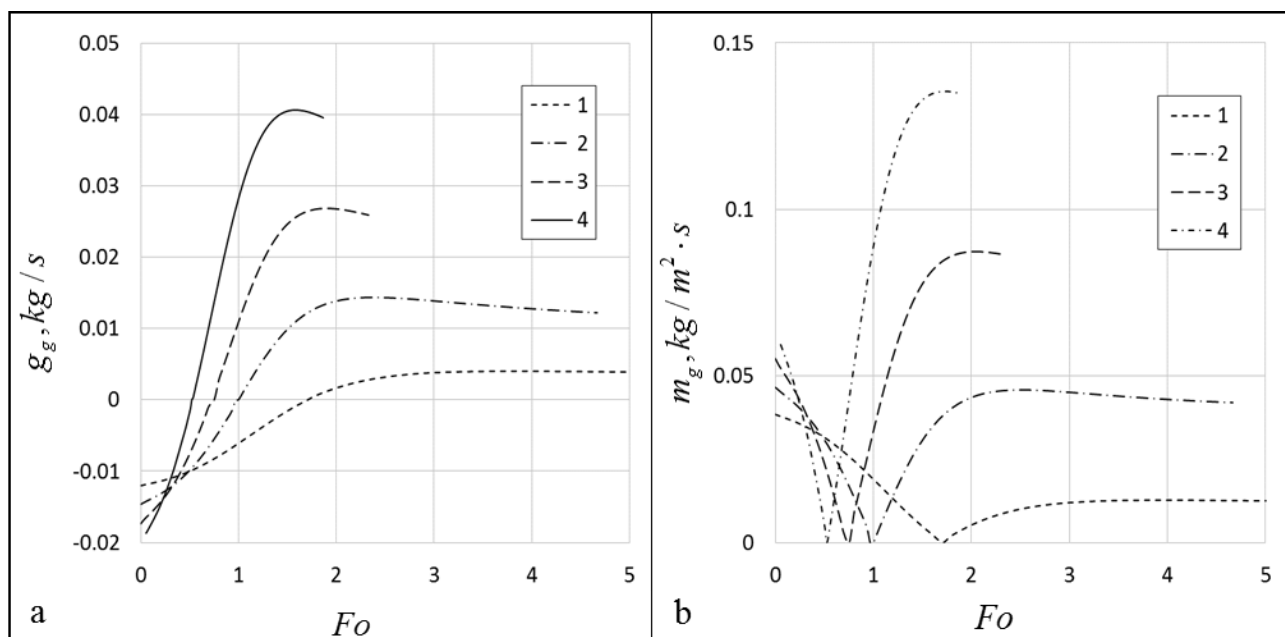


3.20 pav. Dujų mišinio temperatūros įtaka fazinių virsmų (a) ir išorinės konvekcijos (b) šilumos srautams. $R_0=50\mu\text{m}$; $T_0=278\text{K}$; $Re_0=50$; T_d, K : (1) 373, (2) 473, (3) 573, (4) 673.



3.21 pav. Dujų mišinio temperatūros įtaka lašelio terminei būsenai. $R_0=50\mu\text{m}$; $T_0=278\text{K}$; $Re_0=50$; T_d, K : (1) 373, (2) 473, (3) 573, (4) 673.

3.21 pav. išryškėja dujų mišinio temperatūros įtaka lašelio terminei būsenai. Grafike matoma tendencija, jog aukštesnės temperatūros dujų mišinyje lašelis šyla kur kas intensyviau. Kaip jau minėta, kondensaciniame fazinių virsmų režime lašelį šildo išorine konvekcija suteikta šiluma ir besikondensuojančio garo išskirta fazinių virsmų šiluma. Pirmosios, suteikiamos šilumos intensyvumas (3.20 pav. b) priklauso nuo šilumokaitos varomosios jėgos, kuri akivaizdžiai išauga aukštesnės temperatūros dujų mišinyje. Antrąją suteikiamos šilumos intensyvumas priklauso nuo susikondensuojančio garo srauto išskirtos fazinių virsmų šilumos $m_{g,kon} \cdot L$ (3.22 pav.) intensyvumo.



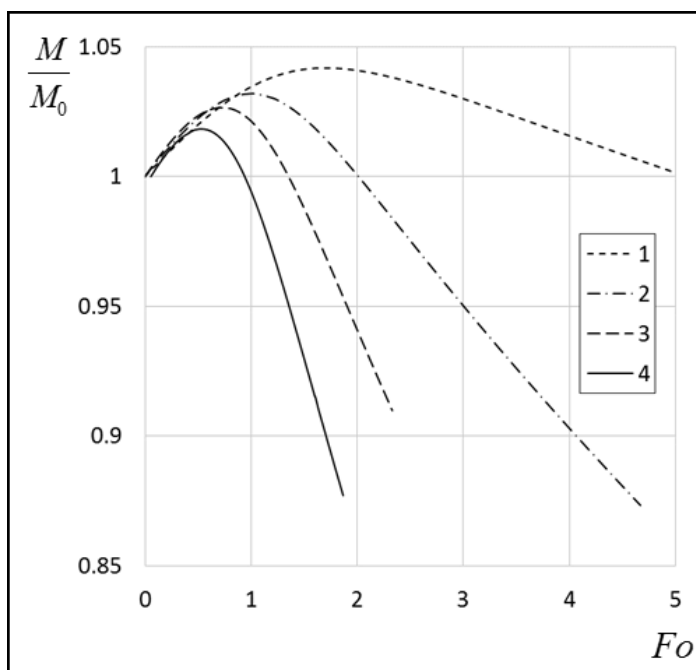
3.22 pav. Dujų mišinio temperatūros įtaka garo srautui (a) ir jo tankiui (b) lašelio paviršiuje. $R_0=50\mu\text{m}$; $T_0=278\text{K}$; $Re_0=50$; T_a, K : (1) 373, (2) 473, (3) 573, (4) 673.

Matomas apčiuopiamas garo srauto tankio pradžios momento verčių pokytis, keičiantis garo dujų mišinio temperatūrai. Akivaizdžiai prie aukštesnių garo dujų mišinio temperatūrų, garo srauto tankis išauga (3.22 pav. b; 3.5 lentelė), kas lemia didėjančią pradžios momento fazinių virsmų šilumos srautą (3.20 pav. a; 3.3 lentelė).

3.5 lentelė. Kondensacinio fazinių virsmų režimo trukmė, bendra fazinių virsmų metu išsiskyrusi šiluma ir bendras pritekėjęs garo srautas prie skirtingos dujų mišinio temperatūros.

T_a, K	373	473	573	673
$m_{g,0}, \frac{kg}{m^s \cdot s}$	0,03835	0,04648	0,05534	0,06175
τ_{kon}, s	0,029866	0,017422	0,013067	0,009458
$\sum q_f^+(\tau_{kon})$	947,553	1087,496	1678,774	1715,071
$\sum g_g(\tau_{kon})$	0,1234	0,1413	0,2181	0,2218

Aukštesnės temperatūros dujų mišinyje lašeliui suteikiamos išorinės konvekcijos ir fazinių virsmų šilumos daug intensyviau. Tai lemia, jog lašelis šyla kur kas greičiau ir jo paviršiuje kondensacinis fazinių virsmų režimas vyksta kur kas trumpiau (3.5 lentelė). Nepaisant trumpėjančios kondensacinio fazinių virsmų režimo trukmės, bendras fazinių virsmų šilumos srautas suteikiamas lašeliui ženkliai išauga. Nors prieš tai aptartiems parametrams slopinamosios įtakos aukštesnė dujų mišinio temperatūra neturi, to negalima pasakyti apie lašelio matmens kitimą (3.23 pav.).

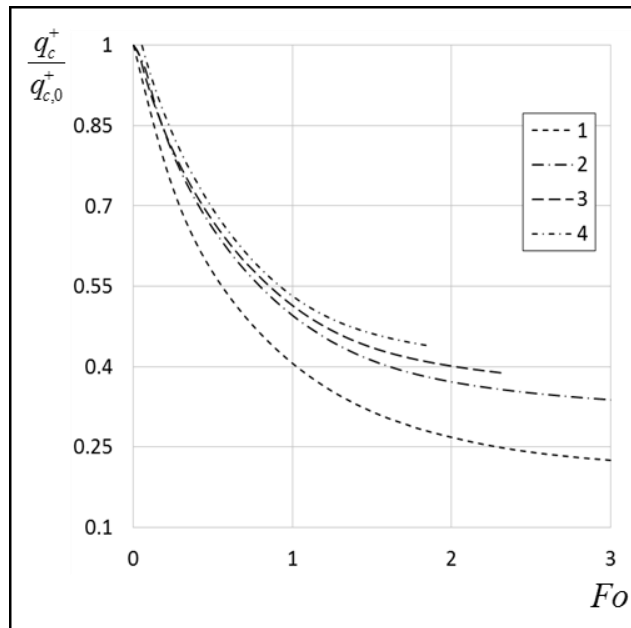


3.23 pav. Dujų mišinio temperatūros įtaka lašelio masei. $R_0=50\mu\text{m}$; $T_0=278\text{K}$; $Re_0=50$; T_a, K : (1) 373, (2) 473, (3) 573, (4) 673.

3.23 pav. ryškiai atsispindi, jog aukštesnės temperatūros dujų mišinyje, lašelio masės prieaugis kondensacinio fazinių virsmų režimo metu mažėja. Lašelio masės prieaugis sumažėja nuo 4,2% iki 2,3% lašelio masės prieaugio, kai dujų mišinio temperatūra 373K, 673K atitinkamai.

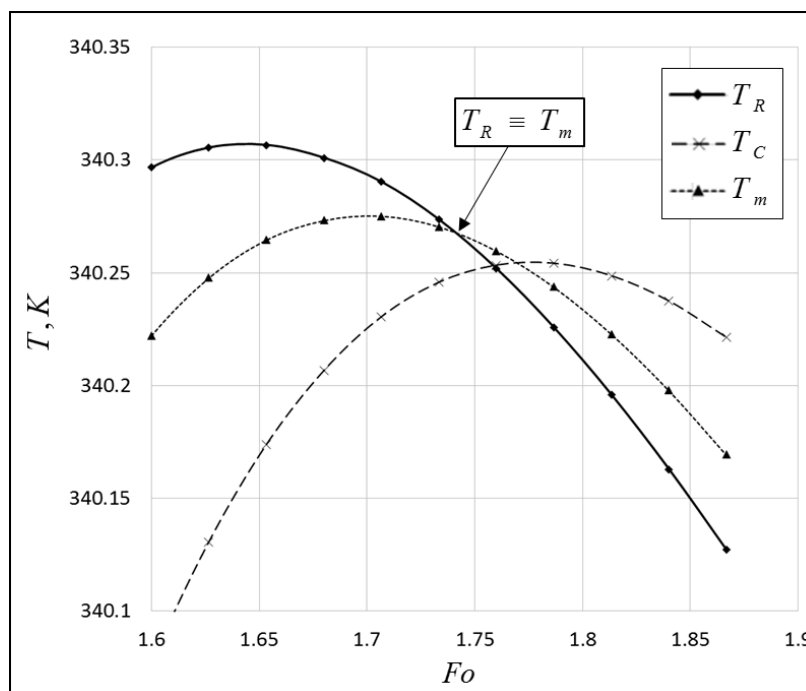
Aukštesnė dujų mišinio temperatūra intensyvina garo srautą ne tik kondensaciniame fazinių virsmų režime, bet ir garavimo fazinių virsmų režime. Tačiau, garo srauto (3.22 pav. a) intensyvėjimas garavimo fazinių virsmų režime lemia spartesnę lašelio matmens kritimą (3.23 pav.), kuris savo ruožtu tiesiogiai įtakoja tą patį garo srautą (2.11). Taigi, garavimo fazinių virsmų režime, pagrindiniu garo srautą apibrėžiančiu parametru, galima laikyti garo srauto tankį m_g . Matome (3.22 pav. b), jog garo srauto tankis pastebimai intensyvėja garavimo fazinių virsmų metu. Paveiksle taip pat išryškėja, jog garo srauto tankio intensyvumas išauga prie aukštesnių dujų mišinio temperatūrų.

Garų srauto tankį, garavimo fazinių virsmų režime, apibūdina fazinių virsmų šilumos srautas $q_f^+ = q_c^+ - q_c^-$. Nors ir matomas aiškus išorinės konvekcijos šilumos srauto (3.20 pav. b) mažėjimas, fazinių virsmų šilumos srautas auga (3.20 pav. a), dėl mažėjančio lašelio matmens.



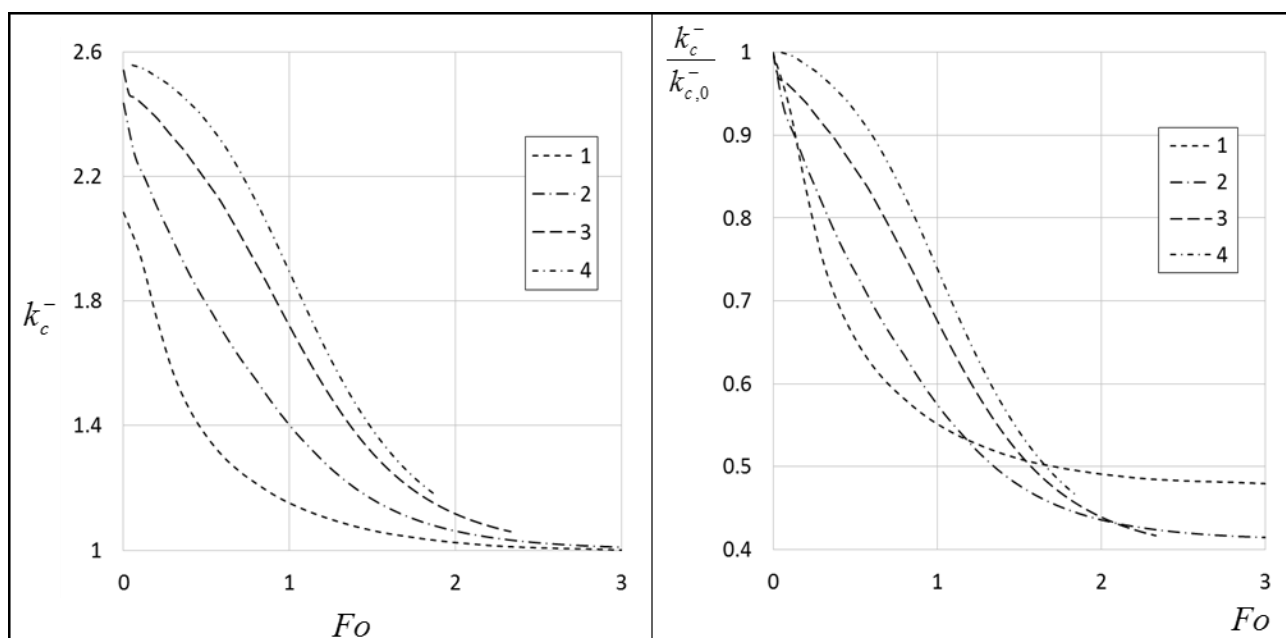
3.24 pav. Dujų mišinio temperatūros įtaka išorinei konvekcijai. $R_0=50\mu\text{m}$; $T_0=278\text{K}$; $Re_0=50$; T_d, K : (1) 373, (2) 473, (3) 573, (4) 673.

Išorine konvekcija teikiama šiluma, garavimo fazinių virsmų režime, tampa esmine. Jos sandas, spartinantis fazinių virsmų režimą, energiniame šilumos srautų balanse tolygiai auga ir tai atsispindi (3.18 pav.). Kai fazinių virsmų ir išorinės konvekcijos šilumos srautų santykis yra lygus vienetui, pasiekiamas pusiausviro garavimo fazinių virsmų režimas, kur visa išorine konvekcija suteikiama šiluma yra nuvedama lašelio fazinių virsmų režimui $q_f^+ = q_c^+ - (q_c^- \equiv 0)$. Tačiau ši sąlyga galioja ne visuomet. Minėto santykio didis gali viršyti vienetą, kas reikštų, jog $q_f^+ > q_c^+$. Pusiausviro garavimo režime lašelis gali pradėti aušti ir jo mažėjančios entalpijos sandas suintensyvina garavimo fazinių virsmų režimą. Jos dydį apibrėžia fazinių virsmų ir išorinės konvekcijos šilumos srautų skirtumas $q_f^+ - q_c^+$ (3.19 pav.). Entalpija pradeda kristi dėl lašelio terminio disbalanso. Lašelio paviršiaus T_R temperatūra pradeda staigiai kristi, kai tuo tarpu lašelio centro T_c ir masės vidutinė T_m temperatūros vis dar kyla (3.25 pav.). Kai lašelio paviršiaus temperatūra nukrenta žemiau masės vidutinės temperatūros $T_R < T_m$ pasikeičia temperatūros lauko kryptis, kuri nesutampa su temperatūros sklaidimo kryptimi, kas savo ruožtu pakeičia temperatūrinio gradiento ženklą į neigiamą ir gauname $q_f^+ = q_c^+ - (-q_c^-) = q_c^+ + q_c^-$.



3.25 pav. Lašelio terminės būsenos kitimas pusiausviro garavimo režime. $R_0=50\mu\text{m}$; $T_0=278\text{K}$; $Re_0=50$; $T_a= 673\text{K}$.

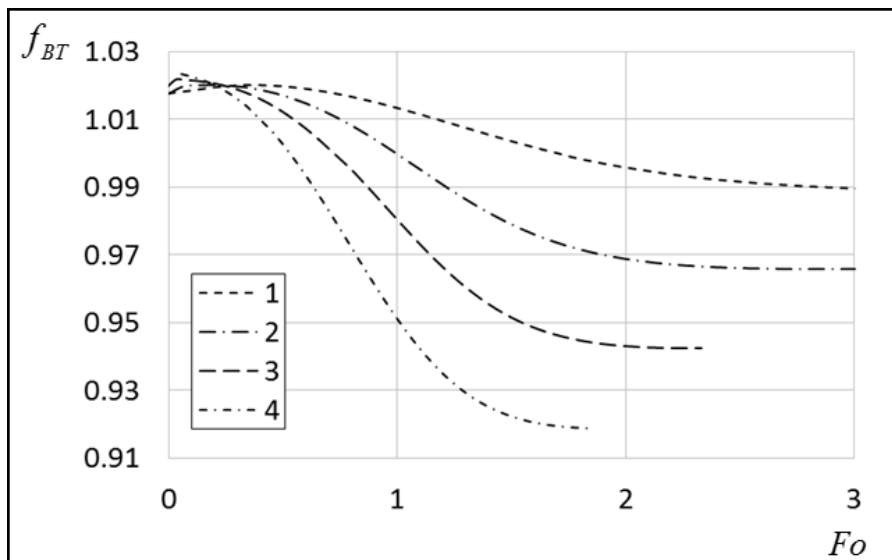
Jau kaip minėta, šilumokaitos varomoji jėga, daro tiesioginę įtaką išorinei konvekcijai. Matoma (3.24 pav.), jog žemesnės temperatūros dujų mišinyje, išorinė konvekcija silpnėja kur kas lėčiau. Lėtesnis išorinės konvekcijos silpimas lemia, jog šilumos nuvedimas į lašelį vyksta intensyviau. Ši tendencija atsispindi efektyviojo šilumos laidžio k_c^- parametro grafiniame paveiksle (3.26 pav.).



3.26 pav. Dujų mišinio temperatūros įtaka efektyviojo laidžio parametru. $R_0=50\mu\text{m}$; $T_0=278\text{K}$; $Re_0=50$; T_a, K : (1) 373, (2) 473, (3) 573, (4) 673.

Svarbu atkreipti dėmesį į dar vieną faktorių, kuris turi įtakos fazinių virsmų režimui. Šis, fazinių virsmų šilumokaitą lydintis srautas, silpnina konvekcinio šildymo intensyvumą garavimo fazinių virsmų režime ir intensyvina kondensaciniame fazinio virsmų režime ir yra žinomas kaip Stefano hidrodinaminis srautas. Stefano hidrodinaminio srauto įtaka yra įvertinama f_{BT} pataisos funkcija,

kuri apskaičiuojama pagal (2.30) modelį, kai lašelio slydimo greitis yra mažas, o prie intensyvaus lašelio slydimo, pagal (2.31). Kai reikšmės $f_{BT} > 1$, Stefano hidrodinaminio srauto poveikis yra teigiamas, o kai reikšmės $f_{BT} < 1$, neigiamas (slopinamasis).



3.27 pav. Dujų mišinio temperatūros įtaka Stefano hidrodinaminio srauto pataisos funkcijai. $R_0=50\mu\text{m}$; $T_0=278\text{K}$; $Re_0=50$; T_d , K: (1) 373, (2) 473, (3) 573, (4) 673.

3.27 pav. pateiktose pataisos funkcijos kreivėse matoma ryški Stefano hidrodinaminio srauto poveikio didėjimo tendencija prie aukštesnių dujų mišinio temperatūrų. Kaip atsispindi grafike, pakylant dujų mišinio temperatūrai 100K, Stefano hidrodinaminio srauto poveikis nutekančiam garo srautui išauga apie ~2%. Tam įtakos turi nutekantis intensyvus garo srautas (3.22 pav. b) garavimo fazinių virsmų metu.

4 IŠVADOS

1. Išpurkšto skysčio lašelių šilumokaitą ir masės mainus nusakančius parametrus P galime rasti, taikant palyginamąjį vertinimą. Terminų P_T parametrų paieškai, užtenka realaus laiko (τ, s) mastelį pakeisti į Furje kriterijumi išreikštą laiko mastelį (Fo) ir šie parametrai puikiai atsispindi šių parametrų $P(Fo)$ funkcijų grafikuose. Tačiau energinių P_q ir fazinių virsmų P_f parametrų vertinimui, būtina sudaryti normuotų $\bar{P}(Fo) = P(Fo)/P_0$ parametrų funkcijas.
2. Lašelio paviršiaus slydimo greičio intensyvumas labiausiai paveikia išorinį bei vidinį lašelio šilumos konvekcinių pernešimą. Išorinės konvekcijos šilumos srauto vertės kondensacinio fazinio virsmų režimo pradžios momentu akivaizdžiai išauga prie didesnio lašelio paviršiaus slydimo greičio. Lašelio vidinė konvekcija taip pat labai suintensyvėja, dėl intensyvesnės vidinės vandens lašelyje cirkuliacijos, kurią sukelia kylančios trinties jėgos tarp lašelio paviršiaus ir jį aptekančių dujų mišinio. Ilgėjanti kondensacinio fazinių virsmų režimo trukmė ir intensyvesnis garo srautas lašelio paviršiuje iššaukia didesnį lašelio masės bei matmens pokytį.
3. Dujų mišinio temperatūra daro ryškia įtaką lašelio kondensacinio fazinių virsmų režimo trukmei. Didėjant dujų mišinio temperatūrai, kondensacinio fazinių virsmų režimo trukmė trumpėja. To pasekoje, lašelio paviršiuje mažėja susikondensuojančio garo kiekis, taip nulemdamas, jog lašelio masės prieaugis kondensacinio fazinių virsmų režimo metu prie aukštesnių temperatūrų mažėja. Mažesnis masės prieaugis ir intensyvesnis lašelio garinimas lemia tai, jog lašelio gyvavimo trukmė sutrumpėja. Dujų mišinio temperatūros įtaka, labai stipriai atsispindi ir išorinės konvekcijos šilumos sraute. Kylant dujų mišinio temperatūrai, šilumokaitos varomoji jėga taip pat auga, taip akivaizdžiai suintensyvindama išorinę konvekciją.
4. Įgauta vienišų lašelių šilumokaitos ir fazinių virsmų skaitinio modeliavimo patirtis atveria kelia skaitiškai ištirti šilumos ir masės mainus lašelių ir drėgnų dujų atominių elektrinių apsauginiuose kiautuose, kai kraštinės sąlygos yra sudėtingesnės ir lašelių pernašos procesai įtakoja dujų parametrus.

5 LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. The World Factbook — Central Intelligence Agency: India. In [interaktyvus]. 2015. [žiūrėta 2016-10-12]. Prieiga per internetą: <<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/xx.html#Geo>>.
2. How much water is there on Earth, from the USGS Water Science School. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-10-12]. Prieiga per internetą: <<http://water.usgs.gov/edu/earthhowmuch.html>>.
3. HARTMANN, D.L. - HARTMANN, D.L. Chapter 5 – The Hydrologic Cycle. In *Global Physical Climatology* . 2016. p. 131–157. ISBN 9780123285317.
4. IEA, I.E.A. World Energy Outlook 2016. In [interaktyvus]. 2016. p. 684. Prieiga per internetą: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEB_WorldEnergyOutlook2015ExecutiveSummaryEnglishFinal.pdf>.
5. GYLYS, J. - AŠMANAS, L. *Atominių elektrinių branduoliniai energetiniai įrenginiai* . Sud. P. Dastikas. Kaunas, Lietuva: Technologija, 2011. 289 p. ISBN 978-9955-25-977-0.
6. REISCH, F. High Pressure Boiling Water Reactor Neutron flux measurement Control rod Steam Moisture separator Water Recirculation flow Fuel. In [interaktyvus]. 2009. no. Figure 1, p. 1–10. [žiūrėta 2016-12-14]. . Prieiga per internetą: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P1500_CD_Web/htm/pdf/topic5/5S02_F.Reisch.pdf>.
7. PETRANGELI, G. Defence in depth. In *Nuclear Safety* [interaktyvus]. [s.l.]: Elsevier, 2006. p. 89–91. ISBN 9780080460789Prieiga per internetą: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780750667234500103>>.
8. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY Design of reactor containment systems for nuclear power plants. In *IAEA Safety Standards Series* . 2004. Vol. No. NS-G-1, p. 117. .
9. KNIEF, R.A. *Nuclear engineering: Theory and Technology of Commercial Nuclear Power* . . Washington: Taylor&Francis, 1992. 544 p. ISBN 978-1560320890.
10. MILIAUSKAS, G. - NORVAIŠIENĖ, K. Garuojančių lašelių sudėtinės pernašos nestacionariųjų procesų sąveikos sisteminis įvertinimas. In *Energetika* . 2013. no. 1, p. 26–41. .
11. LABECKAS, G. - SLAVINSKAS, S. The Effect of Ethanol, Petrol and Rapeseed Oil Blends on Direct Injection Diesel Engine Performance and Exhaust Emissions. In *Transport* [interaktyvus]. 2010. Vol. 25, no. January, p. 116–128. Prieiga per internetą: <<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3846/transport.2010.15>>.
12. ELPERIN, T. - KRASOVITOV, B. Radiation, thermal diffusion and kinetic effects in evaporation and combustion of large and moderate size fuel droplets. In *International Journal of Heat and Mass Transfer* . 1995. Vol. 38, no. 3, p. 409–418. .
13. ABRAMZON, B. - SIRIGNANO, W.A. Droplet vaporization model for spray combustion calculations. In *International Journal of Heat and Mass Transfer* . 1989. Vol. 32, no. 9, p. 1605–

1618. .

14. GODOY, W.F. - DESJARDIN, P.E. Radiation driven evaporation for polydisperse water sprays. In *International Journal of Heat and Mass Transfer* [interaktyvus]. 2009. Vol. 52, no. 11–12, p. 2893–2901. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.12.005>>.
15. TAYLAN, O. - BERBEROGLU, H. Thermal radiation transport in a fluidized dry water system. In *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* [interaktyvus]. 2013. Vol. 120, p. 104–113. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.01.005>>.
16. BABIĆ, M. et al. Simulations of TOSQAN containment spray tests with combined Eulerian CFD and droplet-tracking modelling. In *Nuclear Engineering and Design* . 2009. Vol. 239, no. 4, p. 708–721. .
17. TSENG, C.C. - VISKANTA, R. Enhancement of water droplet evaporation by radiation absorption. In *Fire Safety Journal* . 2006. Vol. 41, no. 3, p. 236–247. .
18. YU, H.Z. A Revisit of Froude-Modeling-Based Physical Scaling of Fire Suppression by Water Sprays. In . 2009. no. Supdet, p. 24–26. .
19. CHANG, J.C. et al. Experimental study on the extinction of liquid pool fire by water droplet streams and sprays. In *Fire Safety Journal* . 2007. Vol. 42, no. 4, p. 295–309. .
20. CHE, D. et al. Heat and mass transfer characteristics of simulated high moisture flue gases. In *Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung* . 2005. Vol. 41, no. 3, p. 250–256. .
21. ZHAO, H. et al. Experimental study on vertical RPU fire suppression performance using water spray. In *Experimental Thermal and Fluid Science* [interaktyvus]. 2015. Vol. 64, p. 108–113. Prieiga per internetą: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0894177715000382>>.
22. JENFT, A. et al. Experimental and numerical study of pool fire suppression using water mist. In *Fire Safety Journal* [interaktyvus]. 2014. Vol. 67, p. 1–12. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.05.003>>.
23. ZHANG, H. et al. Freezing of sessile water droplet for various contact angles. In *International Journal of Thermal Sciences* [interaktyvus]. 2016. Vol. 101, p. 59–67. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2015.10.027>>.
24. DOMBROVSKY, L.A. et al. The use of infrared irradiation to stabilize levitating clusters of water droplets. In *Infrared Physics and Technology* [interaktyvus]. 2016. Vol. 75, p. 124–132. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.infrared.2015.12.020>>.
25. QUILAQUEO, M. - AGUILERA, J.M. Crystallization of NaCl by fast evaporation of water in droplets of NaCl solutions. In *Food Research International* [interaktyvus]. 2016. Vol. 84, p. 143–149. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2016.03.030>>.
26. MAHDIPOOR, M.S. et al. HVOF sprayed coatings of nano-agglomerated tungsten-

- carbide/cobalt powders for water droplet erosion application. In *Wear* [interaktyvus]. 2015. Vol. 330–331, p. 338–347. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2015.02.034>>.
27. HE, M. - QIU, H. Internal flow patterns of an evaporating multicomponent droplet on a flat surface. In *International Journal of Thermal Sciences* . 2016. Vol. 100, p. 10–19. .
28. BRERETON, G.J. A discrete multicomponent temperature-dependent model for the evaporation of spherical droplets. In *International Journal of Heat and Mass Transfer* [interaktyvus]. 2013. Vol. 60, no. 1, p. 512–522. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.01.037>>.
29. DAL'TO??, A.T.O. et al. Cross diffusion effects in the interfacial mass and heat transfer of multicomponent droplets. In *International Journal of Heat and Mass Transfer* . 2015. Vol. 85, p. 830–840. .
30. GAVHANE, S. et al. Evaporation of multicomponent liquid fuel droplets: Influences of component composition in droplet and vapor concentration in free stream ambience. In *International Journal of Thermal Sciences* [interaktyvus]. 2016. Vol. 105, p. 83–95. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.003>>.
31. LIU, L. et al. Evaporation of a bicomponent droplet during depressurization. In *International Journal of Heat and Mass Transfer* [interaktyvus]. 2016. Vol. 100, p. 615–626. Prieiga per internetą: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0017931015314897>>.
32. GOPIREDDY, S.R. - GUTHEIL, E. Numerical simulation of evaporation and drying of a bi-component droplet. In *International Journal of Heat and Mass Transfer* [interaktyvus]. 2013. Vol. 66, p. 404–411. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.07.010>>.
33. MAQUA, C. et al. Bicomponent droplets evaporation: Temperature measurements and modelling. In *Fuel* . 2008. Vol. 87, no. 13–14, p. 2932–2942. .
34. PARBOWO, W. [interaktyvus]. .Prieiga per internetą: <<http://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/for-educators/04.pdf>>.
35. WENDT, J.F.Sud. *Computational Fluid Dynamics* [interaktyvus]. . Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-540-85055-7.
36. 1999. .
37. MALET, J. Presentation of the tests matrix for the TOSQAN facility Spray Programme. In *IRSN technical report* . 2003. .
38. MALET, J. et al. Achievements of spray activities in nuclear reactor containments during the last decade. In *Annals of Nuclear Energy* [interaktyvus]. 2014. Vol. 74, no. C, p. 134–142. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2014.05.033>>.
39. MALET, J. et al. Sprays in containment: Final results of the SARNET spray benchmark. In

- Nuclear Engineering and Design* [interaktyvus]. 2011. Vol. 241, no. 6, p. 2162–2171. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.03.016>>.
40. MALET, J. et al. Gas entrainment by one single French PWR spray, SARNET-2 spray benchmark. In *Nuclear Engineering and Design* [interaktyvus]. 2015. Vol. 282, p. 44–53. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.12.008>>.
41. MALET, J. et al. Modelling of Sprays in Containment Applications : Results of the TOSQAN Spray Benchmark (Test 101). In *The first European Review Meeting on Severe Accident Research (ERSMAR-2005)* . Aix-en-Provence, France, 2005. p. 1–12. .
42. D.ABDO, R.TOMASSIAN, J.BRINSTER, D.ROUMIER, I.TKATSCHENKO, J.L.W. M5-MASP MISTRA Experimental Results, Report DM2S. In *Commissariat à l' Energie Atomique - CEA* . Saclay, France, 2006. .
43. D.ABDO, R.TOMASSIAN, J.BRINSTER, D.ROUMIER, I.TKATSCHENKO, J.L.W. MISTRA Tests MARC2 – MARC2B: Air-Helium-Nitrogen Stratification, Effect of Spray on Buoyant Gas Stratification, Report DM2S. In *Commissariat à l' Energie Atomique - CEA* . Saclay, France, 2006. .
44. IRSN - French public expert in nuclear and radiological risks. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-12-15]. Prieiga per internetą: <<http://www.irsn.fr/EN/Pages/home.aspx>>.
45. EDF at a glance. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-12-15]. Prieiga per internetą: <<https://www.edf.fr/en/the-edf-group/world-s-largest-power-company/edf-at-a-glance>>.
46. Company description. In [interaktyvus]. [žiūrėta 2016-12-15]. Prieiga per internetą: <<http://www.ujv.cz/en/about-company>>.
47. ELBL, D. (PKM) KIT - Profile. In . 2016. .
48. KIM, J. et al. Spray effect on the behavior of hydrogen during severe accidents by a loss-of-coolant in the APR1400 containment. In *International Communications in Heat and Mass Transfer* . 2006. Vol. 33, no. 10, p. 1207–1216. .
49. HUANG, X.G. et al. Effect of spray on performance of the hydrogen mitigation system during LB-LOCA for CPR1000 NPP. In *Annals of Nuclear Energy* [interaktyvus]. 2011. Vol. 38, no. 8, p. 1743–1750. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2011.04.003>>.
50. XIONG, J. et al. CFD Application to Hydrogen Risk Analysis and PAR Qualification. In *Science and Technology of Nuclear Installations* [interaktyvus]. 2009. Vol. 2009, p. 1–10. Prieiga per internetą: <<http://www.hindawi.com/journals/stni/2009/213981/>>.
51. MIMOUNI, S. et al. Modelling of sprays in containment applications with A CMFD code. In *Nuclear Engineering and Design* [interaktyvus]. 2010. Vol. 240, no. 9, p. 2260–2270. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.11.018>>.
52. MALET, J. - HUANG, X. Influence of spray characteristics on local light gas mixing in nuclear

- containment reactor applications. In *Computers and Fluids* [interaktyvus]. 2015. Vol. 107, p. 11–24. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.10.002>>.
53. A. FOISSAC, J. MALET, S. MIMOUNI, P. RUYER, F. FEUILLEBOIS, O.S. EULERIAN SIMULATION OF INTERACTING PWR SPRAYS INCLUDING DROPLET COLLISIONS. In *Nuclear Technology* [interaktyvus]. 2013. Vol. 181, no. 1, p. 133–143. Prieiga per internetą: <http://www.ans.org/pubs/journals/nt/a_15762>.
54. MALET, J. - PARDUBA, Z. EXPERIMENTAL CHARACTERIZATION OF VVER-440 REACTOR CONTAINMENT TYPE SPRAY NOZZLE. In *Atomization and Sprays* [interaktyvus]. 2016. Vol. 26, no. 3, p. 235–255. Prieiga per internetą: <<http://www.dl.begellhouse.com/journals/6a7c7e10642258cc,54cdd3533559658c,5287e8ca02f2447e.html>>.
55. JAYARATNE, O.W. - MASON, B.J. The Coalescence and Bouncing of Water Drops at an Air/Water Interface. In *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* [interaktyvus]. 1964. Vol. 280, no. 1383, p. 545 LP-565. Prieiga per internetą: <<http://rspa.royalsocietypublishing.org/content/280/1383/545.abstract>>.
56. GUNN, R. Collision Characteristics of Freely Falling Water Drops. In *Science* [interaktyvus]. 1965. Vol. 150, no. 3697, p. 695 LP-701. Prieiga per internetą: <<http://science.sciencemag.org/content/150/3697/695.abstract>>.
57. RYLEY, D.J. - BENNETT-COWELL, B.N. The collision behaviour of steam-borne water drops. In *International Journal of Mechanical Sciences* . 1967. Vol. 9, no. 12, p. 817–IN1. .
58. ADAM, J.R. et al. The Collision, Coalescence, and Disruption of Water Droplets. In *Journal of Applied Physics* . 1968. Vol. 39, no. 11. .
59. WHELPDALE, D.M. - LIST, R. The Coalescence process in raindrop growth. In *Journal of Geophysical Research* [interaktyvus]. 1971. Vol. 76, no. 12, p. 2836–2856. [žiūrėta 2016-12-03]. . Prieiga per internetą: <<http://doi.wiley.com/10.1029/JC076i012p02836>>.
60. LOW, T.B. - LIST, R. 1982. .
61. JIANG, Y.J. et al. An experimental investigation on the collision behaviour of hydrocarbon droplets. In *Journal of Fluid Mechanics* [interaktyvus]. 1992. Vol. 234, no. 1, p. 171. [žiūrėta 2016-12-03]. . Prieiga per internetą: <http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0022112092000740>.
62. ASHGRIZ, N. - GIVI, P. Binary collision dynamics of fuel droplets. In *International Journal of Heat and Fluid Flow* . 1987. Vol. 8, no. 3, p. 205–210. .
63. ASHGRIZ, N. - GIVI, P. Coalescence efficiencies of fuel droplets in binary collisions. In *International Communications in Heat and Mass Transfer* . 1989. Vol. 16, no. 1, p. 11–20. .
64. ESTRADA, J.P. et al. Experimental investigation of dynamic binary collision of ethanol

droplets - a model for droplet coalescence and bouncing. In *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 1999. Vol. 20, no. 5, p. 486–491. .

65. ORME, M. Experiments on droplet collisions, bounce, coalescence and disruption. In *Progress in Energy and Combustion Science* [interaktyvus]. 1997. Vol. 23, no. 1, p. 65–79. Prieiga per internetą: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128597000051>>.

66. MENCHACA-ROCHA, a. et al. Coalescence and fragmentation of colliding mercury drops. In *Journal of Fluid Mechanics* [interaktyvus]. 1997. Vol. 346, no. 1997, p. 291–318. [žiūrėta 2016-12-03]. . Prieiga per internetą: <http://www.journals.cambridge.org/abstract_S002211209700640X>.

67. ASHGRIZ, N. - POO, J.Y. Coalescence and separation in binary collisions of liquid drops. In *Journal of Fluid Mechanics* [interaktyvus]. 1990. Vol. 221, no. 1, p. 183. [žiūrėta 2016-11-27]. . Prieiga per internetą: <http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0022112090003536>.

68. BRENN, G. et al. Investigation of the stochastic collisions of drops produced by Rayleigh breakup of two laminar liquid jets. In *Physics of Fluids* [interaktyvus]. 1997. Vol. 9, no. 2, p. 349. [žiūrėta 2016-12-03]. . Prieiga per internetą: <<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pof2/9/2/10.1063/1.869236>>.

69. BRENN, G. et al. The formation of satellite droplets by unstable binary drop collisions. In *Physics of Fluids* [interaktyvus]. 2001. Vol. 13, no. 9, p. 2463–2477. [žiūrėta 2016-12-03]. . Prieiga per internetą: <<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pof2/13/9/10.1063/1.1384892>>.

70. ROISMAN, I. V. Dynamics of inertia dominated binary drop collisions. In *Physics of Fluids* [interaktyvus]. 2004. Vol. 16, no. 9, p. 3438–3449. [žiūrėta 2016-12-03]. . Prieiga per internetą: <<http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pof2/16/9/10.1063/1.1777584>>.

71. GAO, T.C. et al. Collision between an ethanol drop and a water drop. In *Experiments in Fluids* [interaktyvus]. 2005. Vol. 38, no. 6, p. 731–738. [žiūrėta 2016-12-03]. . Prieiga per internetą: <<http://link.springer.com/10.1007/s00348-005-0952-1>>.

72. GUIDO, S. - SIMEONE, □□□ M Binary collision of drops in simple shear flow by computer-assisted video optical microscopy. In *J. Fluid Mech* [interaktyvus]. 1998. Vol. 357, p. 1–20. [žiūrėta 2016-12-03]. . Prieiga per internetą: <http://www.journals.cambridge.org/abstract_S0022112097007921>.

73. BRENN, G. - FROHN, A. Collision and merging of two equal droplets of propanol. In *Experiments in Fluids* [interaktyvus]. 1989. Vol. 7, no. 7, p. 441–446. [žiūrėta 2016-12-03]. . Prieiga per internetą: <<http://link.springer.com/10.1007/BF00187061>>.

74. FOISSAC, A. et al. DROPLET SIZE AND VELOCITY MEASUREMENTS AT THE OUTLET OF A HOLLOW CONE SPRAY NOZZLE. In *Atomization and Sprays* [interaktyvus]. 2011. Vol. 21, no. 11, p. 893–905. Prieiga per internetą: <<http://www.dl.begellhouse.com/journals/6a7c7e10642258cc,57dcb9453f610420,421b682b6d9a26>>.

ee.html>.

75. MASHAYEK, F. et al. Coalescence collision of liquid drops. In *International Journal of Heat and Mass Transfer* . 2003. Vol. 46, no. 1, p. 77–89. .
76. ROTH, N. et al. Droplet Collision Outcomes at High Weber Number. In *ILASS - Europe Meeting* . 2007. .
77. SAROKA, M.D. - ASHGRIZ, N. Separation Criteria for Off-Axis Binary Drop Collisions. In *Journal of Fluids* [interaktyvus]. 2015. Vol. 2015, p. 15. Prieiga per internetą: <<https://www.hindawi.com/journals/fluids/2015/405696/>>.
78. BRENN, G. Droplet Collision. In ASHGRIZ, N.Sud. *Handbook of Atomization and Sprays* [interaktyvus]. Boston, MA: Springer US, 2011. p. 157–181. Prieiga per internetą: <http://link.springer.com/10.1007/978-1-4419-7264-4_7>.
79. LEMAITRE, P. et al. Study of heat and mass transfers in a spray for containment application: analysis of the influence of spray temperature at the injection. In *The 13th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13)* . 2009. Vol. 175, no. 3, p. 553–571. .
80. LEMAITRE, P. et al. Development of a global rainbow refractometry technique to measure the temperature of spray droplets in a large containment vessel. In *Measurement Science and Technology* [interaktyvus]. 2006. Vol. 17, no. 6, p. 1299. Prieiga per internetą: <<http://stacks.iop.org/0957-0233/17/i=6/a=002>>.
81. PORCHERON, E. et al. Experimental investigation in the TOSQAN facility of heat and mass transfers in a spray for containment application. In *Nuclear Engineering and Design* . 2007. Vol. 237, no. 15–17 SPEC. ISS., p. 1862–1871. .
82. LEMAITRE, P. - PORCHERON, E. Analysis of heat and mass transfers in two-phase flow by coupling optical diagnostic techniques. In *Experiments in Fluids* . 2008. Vol. 45, no. 2, p. 187–201. .
83. SIRIGNANO, W.A. *Fluid Dynamics and Transport of Droplets and Sprays*. . 2. Ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 480 p. ISBN 9780521884891.
84. COMMITTEE, N.E.A. - INSTALLATIONS, N. 2007. .
85. OUTLINE, C. Early containment failure. In *Nuclear Safety in Light Water Reactors* . 2012. p. 185–306. ISBN 9780123884466.
86. HEITSCH, M. et al. Simulation of containment jet flows including condensation. In *Nuclear Engineering and Design* [interaktyvus]. 2010. Vol. 240, no. 9, p. 2176–2184. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.11.024>>.
87. BABI??, M. et al. Prediction of light gas distribution in experimental containment facilities using the CFX4 code. In *Nuclear Engineering and Design* . 2008. Vol. 238, no. 3, p. 538–550. .

88. KLJENAK, I. et al. Modeling of containment atmosphere mixing and stratification experiment using a CFD approach. In *Nuclear Engineering and Design* . 2006. Vol. 236, no. 14–16, p. 1682–1692. .
89. WILKENING, H. et al. CFD simulations of light gas release and mixing in the Battelle Model-Containment with CFX. In *Nuclear Engineering and Design* . 2008. Vol. 238, no. 3, p. 618–626. .
90. HEITSCH, M. et al. CFD evaluation of hydrogen risk mitigation measures in a VVER-440/213 containment. In *Nuclear Engineering and Design* . 2010. Vol. 240, no. 2, p. 385–396. .
91. ANDREANI, M. et al. A benchmark exercise on the use of CFD codes for containment issues using best practice guidelines: A computational challenge. In *Nuclear Engineering and Design* . 2008. Vol. 238, no. 3, p. 502–513. .
92. HOUKEMA, M. et al. Validation of the CFX4 CFD code for containment thermal-hydraulics. In *Nuclear Engineering and Design* . 2008. Vol. 238, no. 3, p. 590–599. .
93. MARTÍN-VALDEPEÑAS, J.M. et al. Improvements in a CFD code for analysis of hydrogen behaviour within containments. In *Nuclear Engineering and Design* . 2007. Vol. 237, no. 6, p. 627–647. .
94. J.R. TRAVIS, P. ROYL, R. REDLINGER, G. NECKER, J.W. SPORE, K.L. LAM, T.L.W. - B.D. NICHOLS, C.M. 1998. .
95. ANDREANI, M. et al. Simulation of basic gas mixing tests with condensation in the PANDA facility using the GOTHIC code. In *Nuclear Engineering and Design* [interaktyvus]. 2010. Vol. 240, no. 6, p. 1528–1547. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.02.021>>.
96. ANDREANI, M. - PALADINO, D. Simulation of gas mixing and transport in a multi-compartment geometry using the GOTHIC containment code and relatively coarse meshes. In *Nuclear Engineering and Design* [interaktyvus]. 2010. Vol. 240, no. 6, p. 1506–1527. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.02.020>>.
97. HOLZBAUER, H., & WOLF, L. GOTHIC verification on behalf of the Heiss Dampf Reaktor hydrogen-mixing experiments. In *Nuclear technology* . 1999. Vol. 125, no. 2, p. 166–181. .
98. CHOI, Y.S. et al. Improvement of HYCA3D code and experimental verification in rectangular geometry. In *Nuclear Engineering and Design* . 2003. Vol. 226, no. 3, p. 337–349. .
99. KUDRIAKOV, S. et al. The TONUS CFD code for hydrogen risk analysis: Physical models, numerical schemes and validation matrix. In *Nuclear Engineering and Design* . 2008. Vol. 238, no. 3, p. 551–565. .
100. NRC 1995. .
101. OUTLINE, C. Fission Product Release and Transport. In *Nuclear Safety in Light Water Reactors* [interaktyvus]. 2012. p. 425–517. ISBN 9780123884466Prieiga per internetą:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123884466000058>>.

102. COLOMBANI, J. - J., PASCAL, C., MONCHALIN, N., MARTINET, L., & GOMEZ, C. Experimental study of organic iodide volatilization from painted surfaces present in the containment during a severe accident. In *Proceedings of the 6th European Review Meeting on Severe Accident Research* . France, 2013. .
103. GIRAULT, N. - PAYOT, F. Insights into iodine behaviour and speciation in the Phébus primary circuit. In *Annals of Nuclear Energy* [interaktyvus]. 2013. Vol. 61, p. 143–156. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2013.03.038>>.
104. JACQUEMAIN, D., N. HANNIET, C. POLETIKO, S. DICKINSON, C. WREN, D. POWERS, E. KRAUSSMANN, F. FUNKE, R. CRIPPS, and B.H. AN OVERVIEW OF THE IODINE BEHAVIOUR IN THE TWO FIRST PHEBUS TESTS FPT-0 AND FPT-1. In *OECD Workshop on Iodine Aspects of Severe Accident Management* . Vantaa, 1999. p. 41. .
105. SIMONDI-TEISSEIRE, B. et al. Iodine behaviour in the containment in Phébus FP tests. In *Annals of Nuclear Energy* . 2013. Vol. 61, p. 157–169. .
106. BOSLAND, L. et al. Iodine-paint interactions during nuclear reactor severe accidents. In *Annals of Nuclear Energy* [interaktyvus]. 2014. Vol. 74, no. C, p. 184–199. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.anucene.2014.07.016>>.
107. SÉVERINE, G. et al. Formation of organic iodide in the containment in case of a severe accident. In *Engineering* . p. 291–292. .
108. BOSLAND, L. et al. PARIS project: Radiolytic oxidation of molecular iodine in containment during a nuclear reactor severe accident: Part 2. Formation and destruction of iodine oxides compounds under irradiation - Experimental results modelling. In *Nuclear Engineering and Design* [interaktyvus]. 2011. Vol. 241, no. 9, p. 4026–4044. Prieiga per internetą: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.06.015>>.
109. BOSLAND, L. et al. PARIS project: Radiolytic oxidation of molecular iodine in containment during a nuclear reactor severe accident: Part 2. Formation and destruction of iodine oxides compounds under irradiation - Experimental results modelling. In *Nuclear Engineering and Design* . 2011. Vol. 241, no. 9, p. 4026–4044. .
110. KIM, H.C. - CHO, Y.H. RAIM - A model for iodine behavior in containment under severe accident condition. In *Nuclear Engineering and Technology* . 2015. Vol. 47, no. 7, p. 827–837. .
111. SHORIN, S.N. *Teploperedacha*. . Moskva: Vishaja Shkola, 1964. .
112. KUZIKOVSKIJ, A.V. Dynamic of spherical particle in powerful optical field. In *Izvestiya VUZ* . 1970. no. 5, p. 89–94. .
113. MILIAUSKAS, G. et al. Modelling of heat and mass transfer processes in phase transformation cycle of sprayed water into gas: 4. Thermal state analysis of a droplet slipping in

humid air flow. In *Mechanika* . 2016. Vol. 22, no. 2, p. 96–104. .

114. MILIAUSKAS, G. Regularities of unsteady radiative-conductive heat transfer in evaporating semitransparent liquid droplets. In *International Journal of Heat and Mass Transfer* . 2001. Vol. 44, no. 4, p. 785–798. .

115. MILIAUSKAS, G. - SABANAS, V. Interaction of transfer processes during unsteady evaporation of water droplets. In *International Journal of Heat and Mass Transfer* . 2006. Vol. 49, no. 11–12, p. 1790–1803. .

6 PRIEDAI

1 priedas

Skaičiavimo rezultatai (pagal lašelio spindulį)

Elies Nr.	t	Fo	a0/RO*2	mg	gpx10*7	TR	TC	Tm	R	q+	q+	q-	GradTR	Mix10*10	M/M0	Re	Nu	FBT	Kc-	Td	Pa	pg/p	
s				kg/(m2s)	kg/s	K	K	K	mkm	W/m*2	W/m*2	W/m*2	K/m							K	proc		
1	0	0	595.2445	-0.12784	-0.00362	278	278	278	15	475.4558	318.2189	793.6747	677127.2	0.141344		1	50	5.564722	1.01763	2.083251	373	0	0.1
2	0.000168	0.1	595.2445	-0.12431	-0.00353	281.8845	280.0525	281.0203	15.02149	419.4096	306.8508	726.2604	652733.9	0.141944	1.004243	37.31038	5.087872	1.018484	1.945308	373	0.034812	0.1	
3	0.000336	0.2	595.2445	-0.12061	-0.00343	285.1219	282.4179	284.0099	15.04303	368.8755	298.314	667.1895	660509.4	0.142528	1.008397	26.70928	4.622237	1.019434	1.742379	373	-0.02659	0.1	
4	0.000504	0.3	595.2445	-0.11622	-0.00332	288.3088	285.1207	287.0268	15.06531	328.9213	286.5917	615.513	668727.8	0.143094	1.012425	19.74097	4.261911	1.020008	1.566996	373	-0.03187	0.1	
5	0.000672	0.4	595.2445	-0.11103	-0.00318	291.4614	287.9904	290.0752	15.08681	298.1287	272.9287	571.0754	662633.6	0.143639	1.0163	15.34793	3.999224	1.020095	1.448531	373	-0.03008	0.1	
6	0.00084	0.5	595.2445	-0.10497	-0.00301	294.5485	290.9232	293.1053	15.10738	273.4558	257.1775	530.6334	646165.9	0.144159	1.019999	12.42271	3.80114	1.019746	1.364902	373	0.006165	0.1	
7	0.001008	0.6	595.2445	-0.09803	-0.00282	297.5433	293.8518	296.0761	15.12827	239.4866	492.2123	623288.6	0.144649	1.023479	10.3258	3.642817	1.019026	1.302448	373	0.004464	0.1		
8	0.001176	0.7	595.2445	-0.09027	-0.0026	300.4059	296.7395	298.9516	15.14789	234.8321	219.9598	454.7919	593008.3	0.145104	1.026726	8.73493	3.510279	1.01799	1.251535	373	-0.012	0.1	
9	0.001344	0.8	595.2445	-0.08179	-0.00236	303.1088	299.5341	301.6934	15.16596	198.7332	197.8767	557417.5	0.145522	1.029695	7.843221	3.396034	1.01668	1.21236	373	0.007892	0.1		
10	0.001512	0.9	595.2445	-0.07268	-0.00211	305.6432	302.1973	304.2798	15.18296	205.306	176.1827	381.4886	520370.3	0.145897	1.032374	6.474306	3.295681	1.015128	1.178654	373	0.001142	0.1	
11	0.00168	1	595.2445	-0.06313	-0.00183	307.9886	304.7163	306.6957	15.19882	193.0345	152.6946	345.729	480310.8	0.146228	1.034733	5.646487	3.206388	1.013385	1.150319	373	-0.00018	0.1	
12	0.001848	1.1	595.2445	-0.05353	-0.00155	310.1342	307.0713	308.9259	15.21273	182.1779	128.7684	310.9462	438585	0.146512	1.036761	4.957389	3.126168	1.011502	1.126835	373	-0.0011	0.1	
13	0.002016	1.2	595.2445	-0.04356	-0.00127	312.0762	309.2476	310.9619	15.22463	172.5861	104.9206	277.5067	396401.7	0.146749	1.038453	4.377045	3.053571	1.009533	1.107203	373	-0.00305	0.1	
14	0.002184	1.3	595.2445	-0.03394	-0.00099	313.8175	311.2349	312.8015	15.23455	164.1256	81.60257	245.7282	355037.3	0.146939	1.039808	3.883407	2.987507	1.007532	1.090064	373	-0.00226	0.1	
15	0.002352	1.4	595.2445	-0.02467	-0.00072	315.3647	313.032	314.448	15.24294	156.6742	59.23023	215.9045	315247.3	0.147082	1.040841	3.459973	2.92714	1.005547	1.074985	373	-0.00241	0.1	
16	0.00252	1.5	595.2445	-0.01592	-0.00047	316.7258	314.6427	315.9084	15.24933	150.1316	38.16937	188.301	277352.9	0.147182	1.041561	3.039916	2.871787	1.003623	1.062465	373	-0.00346	0.1	
17	0.002688	1.600001	595.2445	-0.0078	-0.00023	317.913	316.0722	317.1915	15.25431	144.3993	18.68002	163.0793	241949.6	0.147241	1.041998	2.775353	2.820891	1.001795	1.052061	373	-0.00416	0.1	
18	0.002864	1.70664	595.2445	0	0	318.9683	317.3581	318.3406	15.25764	139.2865	0	139.385	207746	0.147241	1.041998	2.595906	2.727619	0.999983	1.043641	373	-0.00254	0.1	
19	0.003024	1.800001	595.2445	0.006827	0.0002	319.8923	318.4838	319.3466	15.25886	134.8103	16.25648	118.5538	177801.4	0.147241	1.041991	2.351271	2.730358	0.998397	1.036269	373	-0.00425	0.1	
20	0.003192	1.900001	595.2445	0.017134	0.000507	321.2024	320.1972	320.806	15.25784	127.4194	91.32195	86.09734	130301.3	0.147122	1.041152	1.929244	2.644712	0.995852	1.023994	373	-0.00779	0.1	
21	0.00336	2.000001	595.2445	0.025246	0.000738	322.1396	321.4167	321.8545	15.25282	121.1832	60.20127	60.98188	92938.77	0.146913	1.039673	1.384418	2.560231	0.993825	1.014794	373	-0.00142	0.1	
22	0.004032	2.400001	595.2445	0.03101	0.000906	322.7937	322.2858	322.5936	15.24482	116.2354	73.89433	42.3641	64841.13	0.146637	1.037719	1.067684	2.486588	0.992724	1.009036	373	-0.00636	0.1	
23	0.004368	2.800001	595.2445	0.035071	0.001023	323.2407	322.8942	323.1034	15.23466	112.4305	83.54089	28.89962	44328.36	0.146313	1.035427	0.830649	2.424547	0.991124	1.005584	373	0.000153	0.1	
24	0.004704	3.200001	595.2445	0.03785	0.001102	323.5397	323.3055	323.4476	15.22313	109.4379	90.12882	19.30909	29674.28	0.145956	1.032902	0.652963	2.3724	0.990292	1.003505	373	-0.00553	0.1	
25	0.00504	3.600001	595.2445	0.039697	0.001154	323.7344	323.5808	323.6741	15.21053	107.0655	94.51383	12.55166	19350.65	0.145577	1.030221	0.517985	2.328168	0.989701	1	373	-0.00226	0.1	
26	0.005376	4.000001	595.2445	0.040874	0.001186	323.8558	323.7595	323.818	15.1972	105.1547	97.29772	7.857021	12110.52	0.145184	1.02744	0.413949	2.290233	0.989291	1	373	-0.00548	0.1	
27	0.005712	4.400001	595.2445	0.04158	0.001205	323.9266	323.8696	323.9044	15.18339	103.5909	98.9785	4.612382	1108.502	0.144782	1.024598	0.33274	2.257361	0.989013	1	373	0.00028	0.1	
28	0.006048	4.800001	595.2445	0.041964	0.001213	323.9629	323.9328	323.9513	15.16931	102.292	99.8865	2.40553	3707.122	0.144376	1.021725	0.268705	2.228634	0.98883	1	373	-0.00111	0.1	
29	0.006384	5.200001	595.2445	0.042129	0.001216	323.9761	323.9641	323.9716	15.15506	100.1996	100.2767	0.922825	1422.119	0.143968	1.018838	0.217798	2.203353	0.988713	1	373	-0.00254	0.1	
30	0.00672	5.600001	595.2445	0.04215	0.001214	323.9741	323.974	323.9742	15.14074	100.2709	100.2709	0.05368	-82.724	0.143559	1.01595	0.174605	2.180981	0.988644	1	373	-0.00418	0.1	
31	0.007056	6.000001	595.2445	0.042078	0.00121	323.9623	323.9654	323.9654	15.12639	99.47458	98.79416	0.680418	-138.518	0.143152	1.01307	0.140333	2.161093	0.988607	1	373	-0.00248	0.1	
32	0.007392	6.400002	595.2445	0.041948	0.001204	323.9446	323.9568	323.9495	15.11206	98.78685	97.72337	0.163749	-1638.96	0.142747	1.010202	0.117839	2.143348	0.988593	1	373	-0.00216	0.1	
33	0.007728	6.800001	595.2445	0.041787	0.001197	323.9236	323.9383	323.9296	15.09777	98.18955	96.91059	1.278959	-1971.11	0.142343	1.007349	0.096386	2.127464	0.988593	1	373	-0.00291	0.1	
34	0.008064	7.200001	595.2445	0.041611	0.00119	323.9009	323.9169	323.9073	15.08353	97.66866	96.28551	1.383157	-2131.79	0.141942	1.004513	0.078944	2.113211	0.988603	1	373	-0.00203	0.1	
35	0.0084	7.600001	595.2445	0.041431	0.001182	323.8779	323.8943	323.8845	15.06936	97.21303	95.80146	1.411567	-2175.66	0.141544	1.001694	0.06473	2.100394	0.988619	1	373	-0.00219	0.1	
36	0.008736	8.000001	595.2445	0.041254	0.001175	323.8552	323.8715	323.8617	15.05224	96.81374	95.42251	1.391237	-2144.4	0.141148	0.998893	0.053121	2.088847	0.988639	1	373	-0.00223	0.1	
37	0.009072	8.400001	595.2445	0.041084	0.001168	323.8334	323.849	323.8396	15.04118	96.46359	95.1238	1.339784	-2065.17	0.140754	0.996109	0.043626	2.078429	0.98866	1	373	-0.00315	0.1	
38	0.009408	8.800001	595.2445	0.040925	0.001161	323.8127	323.8275	323.8187	15.02718	96.15656	94.88587	1.270681	-1958.72	0.140363	0.993341	0.035847	2.069019	0.988682	1	373	-0.00329	0.1	
39	0.009744	9.200001	595.2445	0.040778	0.001155	323.7932	323.8072	323.7988	15.01324	95.88774	94.69417	1.193572	-1839.92	0.139974	0.990588	0.029467	2.06051	0.988704	1	373	-0.00069	0.1	
40	0.01008	9.600001	595.2445	0.040644	0.001149	323.7752	323.7881	323.7804	14.99935	95.65275	94.54367	1.109709	-1729.73	0.139587	0.98785	0.02423	2.052808	0.988725	1	373	-0.00227	0.1	
41	0.010416	10	595.2445	0.040522	0.001144	323.7585	323.7704	323.7632	14.98755	95.44806	94.42203	1.026031	-1581.75	0.139202	0.985126	0.019927	2.045832	0.988746	1	373	-0.00184	0.1	
42	0.010752	10.4	595.2445	0.040413	0.001138	323.743	323.7541	323.7474	14.97117	95.27052	94.17306	0.944942	-1456.78	0.138818	0.982415	0.01629	2.039511	0.988765	1	373	-0.00132	0.1	
43	0.011088	10.800001	595.2445	0.040315	0.001133	323.7289	323.739	323.7329	14.95794	95.11742	94.24981	0.867604	-1337.58	0.138437	0.979715	0.013482	2.033779						

I priedo tęsinys

25-R_50-Re_373-Td_278-TI																						
1	0	0	214.288	-0.07671	-0.00603	278	278	278	25	285.2735	190.9313	476.2048	406276.3	0.65437	1	50	5.564722	1.01763	2.083251	373	0	0.1
2	0.000467	0.1	214.288	-0.07458	-0.00588	281.8845	280.0525	281.0203	25.03581	251.6458	184.1105	435.7563	391640.4	0.657146	1.004243	37.31038	5.087872	1.018484	1.945308	373	0.034812	0.1
3	0.000933	0.2	214.288	-0.07237	-0.00572	285.1219	282.4179	284.0099	25.07172	221.3254	178.9882	400.3136	396305.6	0.65985	1.008397	26.70928	4.622237	1.019434	1.742379	373	-0.02652	0.1
4	0.0014	0.3	214.288	-0.06973	-0.00553	288.3088	285.1207	287.0268	25.10885	197.3528	171.955	369.3078	401236.7	0.662473	1.012425	19.74097	4.261911	1.020008	1.566996	373	-0.03187	0.1
5	0.001867	0.4	214.288	-0.06662	-0.00529	291.4614	287.9904	290.0752	25.14467	178.8772	163.757	342.6343	397580	0.664998	1.0163	15.34793	3.999224	1.020095	1.448531	373	-0.02997	0.1
6	0.002333	0.5	214.288	-0.06298	-0.00502	294.5485	290.9232	293.1053	25.17896	164.0735	154.3064	318.3799	387699.3	0.667403	1.019999	12.42271	3.801141	1.019746	1.364902	373	0.006285	0.1
7	0.0028	0.6	214.288	-0.05882	-0.0047	297.5433	293.8518	296.0761	25.21378	151.6354	143.692	295.3274	373973.3	0.669671	1.023478	10.32579	3.642817	1.019026	1.230248	373	0.004441	0.1
8	0.003267	0.7	214.288	-0.05416	-0.00434	300.4059	296.7395	298.9516	25.24649	140.8992	131.9761	272.8753	355805.3	0.671779	1.026276	8.73493	3.510279	1.01799	1.251534	373	-0.01213	0.1
9	0.003733	0.8	214.288	-0.04907	-0.00394	303.1088	299.5341	301.6934	25.27659	131.4975	119.2398	250.7373	334450.3	0.673711	1.029695	7.48322	3.396034	1.01668	1.212326	373	0.008003	0.1
10	0.0042	0.9	214.288	-0.04361	-0.00351	305.6432	302.1973	304.2798	25.30493	123.1835	105.7118	228.8953	312225	0.675449	1.032374	6.474303	3.295681	1.015128	1.178654	373	-0.00079	0.1
11	0.004667	1	214.288	-0.03788	-0.00305	307.9886	304.7163	306.6957	25.33137	115.8206	91.61734	207.438	288187.2	0.676981	1.034733	5.464845	3.206387	1.013385	1.150319	373	-0.00085	0.1
12	0.005133	1.1	214.288	-0.03201	-0.00259	310.1342	307.0713	308.9259	25.35454	109.3067	77.26133	186.568	263151.3	0.678297	1.036762	4.975389	3.126168	1.011502	1.126835	373	-0.00149	0.1
13	0.0056	1.2	214.288	-0.02613	-0.00211	312.0762	309.2476	310.9619	25.37439	103.5157	62.95058	166.5023	237838.4	0.679394	1.038453	4.377064	3.035371	1.009533	1.107203	373	-0.00132	0.1
14	0.006067	1.3	214.288	-0.02036	-0.00165	313.8175	311.235	312.8015	25.39092	98.4754	48.96134	147.4367	210022.1	0.680272	1.039808	3.883408	2.927508	1.007532	1.090064	373	-0.00205	0.1
15	0.006533	1.4	214.288	-0.0148	-0.0012	315.3647	313.032	314.448	25.40491	94.00456	35.33808	129.5426	189148.3	0.680937	1.040841	3.459974	2.927141	1.005547	1.074985	373	-0.00234	0.1
16	0.007	1.5	214.288	-0.00955	-0.00078	316.7258	314.6427	315.9084	25.41588	90.07899	22.90161	112.9806	166441.8	0.681398	1.041561	3.039918	2.871787	1.003623	1.062465	373	-0.00346	0.1
17	0.007467	1.6	214.288	-0.00468	-0.00038	317.913	316.0722	317.1915	25.42385	86.63599	11.20805	97.84764	145169.8	0.681668	1.041988	2.733797	2.820891	1.001795	1.052061	373	-0.00422	0.1
18	0.007964	1.70664	214.288	0	0	318.9683	317.3581	318.3406	25.42789	83.97188	0	83.60312	124647.7	0.68167	1.04199	2.495908	2.72762	0.999983	1.043641	373	-0.00258	0.1
19	0.0084	1.8	214.288	0.004096	0.000333	319.8923	318.4838	319.3466	25.43144	80.86517	9.75386	71.13231	106680.9	0.681671	1.041991	2.251274	2.730359	0.998397	1.036269	373	-0.00428	0.1
20	0.008933	2	214.288	0.010389	0.000844	321.2024	320.1972	320.806	25.42974	76.45159	24.79316	51.65843	681121	1.041152	1.041152	1.973422	2.744713	0.998592	1.023994	373	-0.00180	0.1
21	0.010267	2.2	214.288	0.015148	0.00123	322.1396	321.4167	321.8545	25.42137	72.7099	36.12075	36.58915	55763.29	0.680153	1.039673	1.38442	2.560231	0.993825	1.014794	373	-0.00144	0.1
22	0.0112	2.4	214.288	0.018606	0.001509	322.7937	322.2858	322.5936	25.40803	69.75507	44.33661	25.41846	38904.68	0.678875	1.037719	1.067685	2.486588	0.992274	1.009036	373	-0.00635	0.1
23	0.012133	2.6	214.288	0.021042	0.001705	323.2407	322.892	323.1034	25.3911	67.45832	50.12455	17.33378	26597.03	0.677375	1.035427	0.830651	2.424548	0.991124	1.005584	373	0.000162	0.1
24	0.013067	2.799999	214.288	0.02271	0.001837	323.5397	323.3055	323.4476	25.37189	65.66276	54.0773	11.58546	17804.58	0.675722	1.032902	0.652964	2.372401	0.990292	1.003505	373	-0.00552	0.1
25	0.014	3	214.288	0.023818	0.001924	323.7344	323.5808	323.6741	25.35088	64.23931	56.70831	7.530999	11610.4	0.673967	1.030221	0.517985	2.328168	0.989701	1	373	-0.00023	0.1
26	0.014933	3.199999	214.288	0.024524	0.001977	323.8558	323.7595	323.818	25.32866	63.09286	58.37864	4.714215	7266.317	0.672146	1.02744	0.413949	2.290234	0.989291	1	373	-0.00547	0.1
27	0.015866	3.399999	214.288	0.024948	0.002008	323.9266	323.8696	323.9044	25.30566	62.15454	59.38711	2.767431	4265.104	0.670287	1.024598	0.332741	2.257362	0.989013	1	373	0.00028	0.1
28	0.0168	3.599999	214.288	0.025178	0.002022	323.9629	323.9328	323.9513	25.28218	61.37523	59.93191	1.44332	2224.276	0.668406	1.021725	0.268706	2.228635	0.98883	1	373	-0.00111	0.1
29	0.017733	3.799999	214.288	0.025277	0.002027	323.9761	323.9716	323.9716	25.25843	60.71975	60.16605	0.553695	854.272	0.666517	1.018988	0.217798	2.203584	0.988713	1	373	-0.00254	0.1
30	0.018666	3.999999	214.288	0.02529	0.002024	323.9741	323.974	323.9742	25.23456	60.16256	60.13035	0.032208	-49.635	0.664627	1.01595	0.177066	2.180982	0.988644	1	373	-0.00416	0.1
31	0.0196	4.199999	214.288	0.025247	0.002016	323.9623	323.9698	323.9654	25.21065	59.68476	59.27651	0.662741	-101.307	0.662741	1.01307	0.144304	2.161094	0.988607	1	373	-0.00291	0.1
32	0.020533	4.399999	214.288	0.025169	0.002006	323.9446	323.9568	323.9495	25.18677	59.27213	58.63404	0.630808	-983.377	0.660864	1.010201	0.117839	2.143348	0.988593	1	373	-0.00213	0.1
33	0.021466	4.599999	214.288	0.025072	0.001995	323.9236	323.9383	323.9296	25.16295	58.91375	58.14637	0.767376	-1182.67	0.658997	1.007349	0.096386	2.127464	0.988593	1	373	-0.00208	0.1
34	0.0224	4.799999	214.288	0.024967	0.001983	323.9009	323.9169	323.9073	25.13922	58.60121	57.77132	0.829894	-1279.07	0.65714	1.004513	0.078485	2.113211	0.988603	1	373	-0.00201	0.1
35	0.023333	4.999999	214.288	0.024858	0.00197	323.8779	323.8943	323.8845	25.11559	58.32783	57.48089	0.84694	-1305.39	0.655296	1.001694	0.06473	2.100394	0.988619	1	373	-0.00218	0.1
36	0.024266	5.199999	214.288	0.024752	0.001958	323.8552	323.8715	323.8617	25.09206	58.08826	57.25352	0.834741	-1286.64	0.653462	0.998893	0.053122	2.088847	0.988639	1	373	-0.00231	0.1
37	0.0252	5.399999	214.288	0.024651	0.001947	323.8334	323.849	323.8396	25.06863	57.87816	57.07429	0.80387	-1239.1	0.65164	0.996109	0.043625	2.078429	0.98866	1	373	-0.00315	0.1
38	0.026133	5.599999	214.288	0.024555	0.001936	323.8127	323.8275	323.8187	25.0453	57.69394	56.93153	0.762408	-1175.23	0.649828	0.993341	0.035847	2.069019	0.988682	1	373	-0.00329	0.1
39	0.027066	5.799999	214.288	0.024467	0.001925	323.7932	323.8072	323.7988	25.02206	57.53264	56.81665	0.716413	-1103.95	0.648027	0.990588	0.02947	2.060509	0.988704	1	373	-0.0007	0.1
40	0.028	5.999999	214.288	0.024386	0.001915	323.7752	323.7881	323.7804	24.99981	57.39164	56.7262	0.665447	-1025.84	0.646235	0.989785	0.02463	2.052808	0.988725	1	373	-0.00228	0.1
41	0.028933	6.199998	214.288	0.024313	0.001906	323.7585	323.7704	323.7632	24.97584	57.26884	56.65322	0.616519	-949.409	0.644451	0.988126	0.019927	2.045832	0.988746	1	373	-0.00185	0.1
42	0.029866	6.399998	214.288	0.024248	0.001897	323.743	323.7541	323.7474	24.95284	57.16231	56.59535	0.566965	-874.066	0.642677	0.987415	0.01639	2.039511	0.988765	1	373	-0.00131	0.1
43	0.0308	6.599998	214.288	0.024189	0.001889	323.7289	323.739	323.7329	24.9299	57.07043	56.54987	0.520562	-802.548	0.64091	0.979715	0.013481	2.033779	0.988783	1	373	-0.0004	0.1
44	0.031733	6.799999	214.288	0.024137	0.001882	323.7159	323.7252	323.7196	24.90702	56.99179	56.51532	0.476466	-734.582	0.63915	0.977027	0.011088	2.02858	0.988799	1	373	-4.6E-05	0.1
45	0.032666	6.999999	214.288	0.024091	0.001875	323.7041																

