



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

# **Vandens virimo cilindrinio kūno paviršiuje termohidrodinaminis tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas

---

**Dovidas Narkevičius**  
Projekto autorius

**Lekt. Linas Paukštaitis**  
Vadovas

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

# **Vandens virimo cilindrinio kūno paviršiuje termohidrodinaminis tyrimas**

Baigiamasis magistro projektas  
Termoinžinerija (6211EX023)

---

**Dovidas Narkevičius**  
Projekto autorius

**Lekt. dr. Linas Paukštaitis**  
Vadovas

**Doc. dr. Raminta Skvorčinskienė**  
Recenzentė

---

**Kaunas, 2021**



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas  
Dovidas Narkevičius

## **Vandens virimo cilindrinio kūno paviršiuje termohidrodinaminis tyrimas**

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

1. baigiamąjį projektą parengiau savarankiškai ir sąžiningai, nepažeisdama(s) kitų asmenų autoriaus ar kitų teisių, laikydamasi(s) Lietuvos Respublikos autorių teisių ir gretutinių teisių įstatymo nuostatų, Kauno technologijos universiteto (toliau – Universitetas) intelektinės nuosavybės valdymo ir perdavimo nuostatų bei Universiteto akademinės etikos kodekse nustatytų etikos reikalavimų;
2. baigiamajame projekte visi pateikti duomenys ir tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti teisėtai, nei viena šio projekto dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar elektroninių šaltinių, visos baigiamojo projekto tekste pateiktos citatos ir nuorodos yra nurodytos literatūros sąrašė;
3. įstatymų nenumatytų piniginių sumų už baigiamąjį projektą ar jo dalis niekam nesu mokėjęs (-usi);
4. suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo ar kitų asmenų teisių pažeidimo faktui, man bus taikomos akademinės nuobaudos pagal Universitete galiojančią tvarką ir būsiu pašalinta(s) iš Universiteto, o baigiamasis projektas gali būti pateiktas Akademinės etikos ir procedūrų kontrolieriaus tarnybai nagrinėjant galimą akademinės etikos pažeidimą.

Dovidas Narkevičius

*Patvirtinta elektroniniu būdu*



**Kauno technologijos universitetas**  
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

## **Baigiamojo magistro projekto užduotis**

Studentui (-ei)	Dovidui Narkevičiui
Projekto tema	Vandens virimo cilindrinio kūno paviršiuje termohidrodinaminis tyrimas Thermohydrodynamic study of water boiling on the surface of a cylindrical body
Darbo tikslas ir uždaviniai	Tikslas – Ištirti termohidrodinaminius procesus vykstančius įkaitinto cilindrinio kūno paviršiuje jį panardinant po vandeniu. Uždaviniai: <ol style="list-style-type: none"><li>1. Sukurti eksperimentinį stendą ir aprašyti darbo metodiką</li><li>2. Virimo procesų analizavimas</li><li>3. Gautų rezultatų apibendrinimas</li></ol>
Reikalavimai ir sąlygos	Apiforminimas pagal bendruosius reikalavimus
Vadovas	Lekt. dr. Linas Paukštaitis (vadovo pareigos, vardas, pavardė, parašas)
	2021-02-18 (data)

Narkevičius Dovidas. Vandens virimo cilindrinio kūno paviršiuje termohidrodinaminis tyrimas. Magistro studijų baigiamasis projektas / vadovas Lekt. Linas Paukštaitis; Kauno technologijos universitetas, mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Energijos inžinerija

Reikšminiai žodžiai: virimas, temperatūra, plėvelinis virimas, šilumos srautas, garo plėvelė.

Kaunas, 2021. 67 p.

### **Santrauka**

Šiame baigiamajame magistro projekte tirti termohidrodinaminiai procesai, vykstantys panardinant įkaitintą cilindrinį kūną į vandenį. Sukurtas eksperimentinis stendas bei tiriamasis cilindrinis kūnas. Parašytas MatLAB programos kodas, kurio pagalba galima apskaičiuoti garo plėvelės storį skirtingais virimo momentais. Atlikus eksperimentus nustatyta, kad garo plėvelės storis plėvelinio virimo metu yra stabilus ir mažai kintantis. Vykstant plėveliniam virimui atiduodamas šilumos srautas yra pastovus, tačiau nedidelis palyginus su kitais virimo procesais. Pereinamuoju virimo metu atiduodamas šilumos srautas yra labai nepastovus, kintantis, tačiau didesnis nei plėvelinio. Didžiausi šilumos mainai vyksta burbulinio virimo metu. Pastebėta, kad pradinė kūno temperatūra nedaro įtakos pilnojo virimo procesui, kinta tik atskirų virimo fazių trukmė.

Narkevičius Dovidas. Thermohydrodynamic Study of Water Boiling on the Surface of a Cylindrical Body / supervisor Lekt. Linas Paukštaitis ; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Energy engineering

Keywords: boiling, temperature, film boiling, heat flux, vapor film.

Kaunas, 2021. 67 p.

### **Summary**

In this master's final project, the thermohydrodynamic processes taking place by immersing a heated cylindrical body in water are investigated. An experimental stand and a research cylindrical body were created. MatLAB program code is written, with the help of which it is possible to calculate the thickness of the vapor film at different boiling regimes. Experimental study have shown that the thickness of the vapor film is stable and constant during film boiling. The heat flux during film boiling is constant but small compared to other boiling regimes. The heat flux during the transition boiling is very volatile and changes rapidly. The heat flux during nucleate boiling is the highest. It was observed that the initial body temperature does not affect the full boiling process, only the duration of the individual boiling regimes.

## Turinys

<b>Lentelių sąrašas .....</b>	<b>8</b>
<b>Paveikslų sąrašas .....</b>	<b>9</b>
<b>Įvadas.....</b>	<b>11</b>
<b>1. Literatūros analizė.....</b>	<b>12</b>
1.1. Konvekcinis virimas .....	12
1.2. Burbulinis virimas .....	12
1.3. Pereinamasis virimas .....	13
1.4. Plėvelinis virimas .....	14
1.5. Plėvelinio virimo šilumos mainai ir garo plėvelės suirimas sferinio cilindrinio ir plokštelės paviršiuje tyrimas .....	15
1.5.1. Aparatūra .....	16
1.5.2. Duomenų analizė .....	19
1.5.3. Sprogusis plėvelės irimas .....	29
1.5.4. Progresyvus plėvelės irimas .....	30
1.5.5. Sprogusis-progresyvusis plėvelės irimas.....	31
1.5.6. Teoriniai tyrimai.....	33
1.5.7. Tyrimo apibendrinimas .....	38
1.5.8. Tyrimo išvados .....	40
<b>2. Eksperimentinis stendas ir tyrimo metodika .....</b>	<b>41</b>
2.1. Eksperimentinė įranga ir darbo eiga.....	41
2.2. Darbo eiga .....	45
2.3. Garo plėvelės ploto apskaičiavimo metodika.....	46
2.4. Rezultatų analizės metodika .....	47
<b>3. Eksperimentinių tyrimų rezultatai .....</b>	<b>49</b>
3.1. Temperatūros kitimo laike rezultatai.....	49
3.2. Šilumos perdavimo srautas.....	52
3.3. Garo plėvelės storis kūno paviršiuje.....	58
3.4. Rezultatu apibendrinimas .....	63
<b>4. Išvados .....</b>	<b>65</b>
<b>Literatūra .....</b>	<b>66</b>

## Lentelių sąrašas

<b>2.1 lentelė.</b> Plieninio cilindro fizikiniai duomenys .....	43
<b>2.2 lentelė.</b> Pagrindiniai „PICO TC-08 Thermocouple Data Logger“ parametrai .....	44
<b>2.3 lentelė</b> Cilindrinio indo duomenys .....	45



## Paveikslų sąrašas

<b>1.1pav.</b> Konvekcinis virimas.....	12
<b>1.2pav.</b> Burbulinis virimas .....	13
<b>1.3pav.</b> Pereinamasis virimas.....	13
<b>1.4pav.</b> Plėvelinis virimas .....	14
<b>1.5pav.</b> Tipinis sferinis pavyzdys tarpiniams eksperimentams (A) ir vandens ratas (B).....	17
<b>1.6pav.</b> Pusiausvyros būsenos eksperimente naudoto plokštės bandinio skerspjūvis, kuriame vaizduojamos šildytuvų pozicijos, (3x6 mm skylės) ir termoporų pozicijos (2x1,2 mm skylės). ....	18
<b>1.7pav.</b> Bandinio perkaitinimo variacijos diagrama priklausomai nuo laiko plėvelinio virimo eksperimento ant cilindro metu. D=20 mm, L=60 min, Tw=95 °C, uw=2 cm/s. ....	19
<b>1.8 pav.</b> Šilumos perdavimo koeficiento kitimas priklausomai nuo bandinio perkaitinimo.....	22
<b>1.9pav.</b> Garo plėvelės storio kitimas pagal cilindrinio bandinio perkaitinimą, D=20 mm, L=80 mm, uv=17,6 cm/s. ....	22
<b>1.10pav.</b> Šilumos srauto kitimas pagal bandinio perkaitinimą 20 mm sferos bandinyje, D=20 mm. ....	23
<b>1.11pav.</b> Vandens greičio poveikis šilumos perdavimo koeficiento kitimui .....	24
<b>1.12pav.</b> Bandinio matmenų (ilgio ir diametro) poveikis šilumos perdavimo koeficientui .....	25
<b>1.13pav.</b> Maksimalaus šilumos perdavimo koeficiento (A) ir minimalaus šilumos srauto (B) kitimas priklausomai nuo vandens temperatūros, sferai D=35 mm .....	26
<b>1.14pav.</b> Minimalaus garo plėvelės storio kitimas priklausomai nuo vandens temperatūros .....	27
<b>1.15pav.</b> Minimalaus šilumos srauto kiekis reikalingas palaikyti plėvelinį virimą priklausomai nuo vandens temperatūros, sferai D=35 mm. ....	28
<b>1.16pav.</b> Sprogus irimo modelis 20x80 mm cilindriui, Tw=75 °C, uw=7,5 cm/s .....	29
<b>1.17pav.</b> Progresyvusis irimo modelis 140x35x10 mm plokštei, Tw=96,5 °C, uw=12 cm/s.....	30
<b>1.18pav.</b> Sprogus-progresyvus irimo modelis 70x35x10 mm plokštei, Tw=85 °C, uw=12 cm/s .	31
<b>1.19pav.</b> Šilumos perdavimo koeficiento kitimas priklausomai nuo bandinio temperatūros tarpiniuose ir pusiausvyros būsenos eksperimentuose, Tw atitinkamai 85 °C ir 92,5 °C .....	32
<b>1.20pav.</b> Eksperimentinių rezultatų palyginimas ir prognozės plokštelėms (A ir B), ir 10 mm diametro cilindriui priešpriešiniame sraute (C) .....	37
<b>2.1pav.</b> Temperatūros matavimo taškai .....	41
<b>2.2pav.</b> Nušlifluotas metalo paviršius pašalinant nelygumus .....	42
<b>2.3pav.</b> Pilnai paruoštas cilindras eksperimentams.....	43
<b>2.4pav.</b> Duomenų kaupiklis „PICO TC-08 Thermocouple Data Logger“ .....	44
<b>2.5pav.</b> Eksperimento filmavimas.....	45
<b>2.6pav.</b> MatLab programoje sukurtas ploto apskaičiavimo principas .....	46
<b>3.1pav.</b> Kūno temperatūros kitimas kai pradinė temperatūra 500°C .....	49
<b>3.2pav.</b> Kūno temperatūros kitimas kai pradinė temperatūra 550°C .....	49
<b>3.3pav.</b> Kūno temperatūros kitimas kai pradinė temperatūra 600°C .....	50
<b>3.4pav.</b> Kūno temperatūros kitimas kai pradinė temperatūra 650°C .....	50
<b>3.5pav.</b> Kūno temperatūros kitimas kai pradinė temperatūra 700°C .....	51
<b>3.6pav.</b> Kūno temperatūros kitimas kai pradinė temperatūra 750°C .....	51
<b>3.7pav.</b> Šilumos perdavimo srautas laike, kai kūno temperatūra 500°C.....	52
<b>3.8pav.</b> Šilumos perdavimo srautas laike, kai kūno temperatūra 550°C.....	53
<b>3.9pav.</b> Šilumos perdavimo srautas laike, kai kūno temperatūra 600°C.....	53
<b>3.10pav.</b> Šilumos perdavimo srautas laike, kai kūno temperatūra 650°C.....	54

<b>3.11pav.</b> Šilumos perdavimo srautas laike, kai kūno temperatūra 700°C.....	54
<b>3.12pav.</b> Šilumos perdavimo srautas laike, kai kūno temperatūra 750°C.....	55
<b>3.13pav.</b> Šilumos perdavimo srauto priklausomybė nuo kūno temperatūros, kai pradinė temperatūra 500°C.....	55
<b>3.14pav.</b> Šilumos perdavimo srauto priklausomybė nuo kūno temperatūros, kai pradinė temperatūra 550°C.....	56
<b>3.15 pav.</b> Šilumos perdavimo srauto priklausomybė nuo kūno temperatūros, kai pradinė temperatūra 600°C.....	56
<b>3.16 pav.</b> Šilumos perdavimo srauto priklausomybė nuo kūno temperatūros, kai pradinė temperatūra 650°C.....	57
<b>3.17pav.</b> Šilumos perdavimo srauto priklausomybė nuo kūno temperatūros, kai pradinė temperatūra 700°C.....	57
<b>3.18pav.</b> Šilumos perdavimo srauto priklausomybė nuo kūno temperatūros, kai pradinė temperatūra 750°C.....	58
<b>3.19pav.</b> Garo plėvelės storis kūno paviršiuje kai pradinė kūno temperatūra 500°C .....	58
<b>3.20pav.</b> Garo plėvelės storis kūno paviršiuje kai pradinė kūno temperatūra 550°C .....	59
<b>3.21pav.</b> Garo plėvelės storis kūno paviršiuje kai pradinė kūno temperatūra 600°C .....	59
<b>3.22pav.</b> Garo plėvelės storis kūno paviršiuje kai pradinė kūno temperatūra 650°C .....	60
<b>3.23pav.</b> Garo plėvelės storis kūno paviršiuje kai pradinė kūno temperatūra 700°C .....	60
<b>3.24pav.</b> Garo plėvelės storis kūno paviršiuje kai pradinė kūno temperatūra 750°C .....	61
<b>3.25pav.</b> Eksperimento metu gauti plėvelės storio rezultatai.....	61
<b>3.26pav.</b> MatLAB plėvelės ploto apskaičiavimo koduotė .....	62
<b>3.27 pav.</b> Įkaitinto kūno aušimo dinamika prie skirtingų pradinių temperatūrų.....	63
<b>3.28pav.</b> Garo plėvelės priklausomybe nuo laiko prie skirtingų pradinių temperatūrų .....	64

## Įvadas

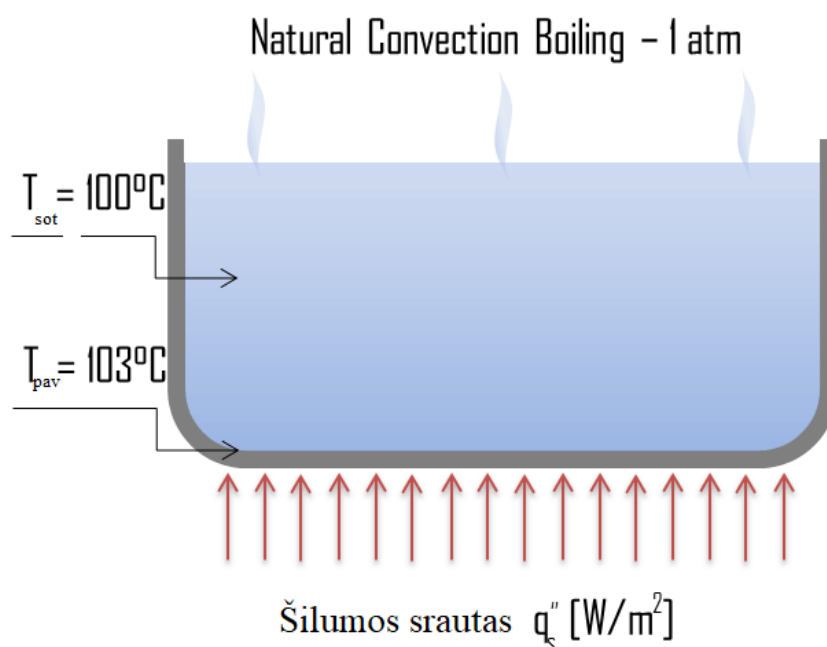
Su plėveliniu virimu susiduriama daugelyje pramonės šakų, tokių kaip: šaldymo technologijos, branduoliniai reaktoriai, metalurgija, garo katilai. Jis pasireiškia, kai pakankamai aukštos temperatūros paviršius panardinamas ar apiplaunamas skysčio, kurio temperatūra yra kelis kartus žemesnė nei kūno temperatūra. Susiformavusi garo plėvelė pilnai apsupa įkaitusį paviršių ir neleidžia jam tiesiogiai liestis su skysčiu. Tai labai pablogina paviršiaus aušinimą dėl mažo vandens garų šiluminio laidumo. Esant blogam paviršiaus aušinimui įrenginys gali perkaisti, sugesti ar mechaniškai deformuotis, pavyzdžiui, energetinio katilo vamzdeliai dėl viršytos darbinės temperatūros gali deformuotis, sutrūkti. Būtent dėl to svarbu ištirti plėvelinį virimą, jį įtakojančius veiksnius, minimalią temperatūrą, prie kurios pradeda formuotis garo plėvelė. Šiame baigiamajame projekte eksperimentiniu būdu ištirtas plėvelinis virimas ir kitos virimo fazės. Sukurtas eksperimentinis standas ir tiriamasis kūnas. Bandymams naudojamas cilindro formos kūnas, leidžiantis kuo tiksliau atkurti energetinių įrenginių vamzdžiuose vykstančius procesus, pvz: garo katilo perkaitintuvuose. Tiriamasis kūnas kaitinamas iki aukštos, 500-750°C temperatūros ir panardinamas į pastovios 99°C temperatūros vandenį. Eksperimento metu nustatyta, kad virimo fazių kaitos, minimalaus šilumos srauto reikiamo palaikyti plėvelinį virimą neįtakoja pradinė kūno temperatūra, tačiau stipriai įtakoja plėvelinio virimo ir viso virimo proceso trukmę. Sukurtas MatLAB programos kodas, kurio pagalba iš vaizdinės medžiagos galima apskaičiuoti garo plėvelės storį kūno paviršiuje.

## 1. Literatūros analizė

Šioje dalyje trumpai aptariami kokie yra virimo režimai, jiems būdingi požymiai, juos įtakojantys veiksniai. Taip pat plačiai apžvelgiamas plėvelinio virimo tyrimas, kurio metu nagrinėjama garo plėvelė ant skirtingų įkaitintų kūnų. Literatūros apžvalga padės labiau susipažinti su virimo ir šilumos perdavimo procesais, leis palyginti gautus eksperimentinius rezultatus su teoriniais skaičiavimais.

### 1.1. Konvekcinis virimas

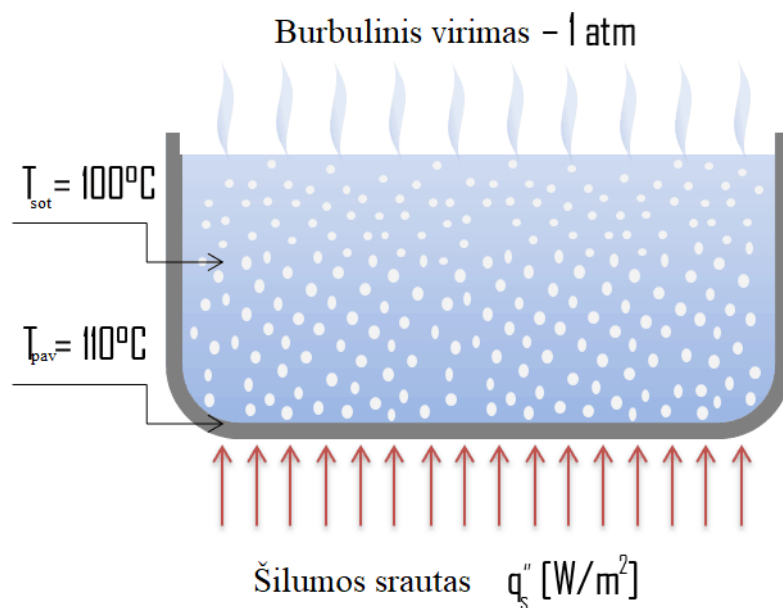
Natūralus konvekcinis virinimas. Termodinamikoje reikalaujama, kad grynos medžiagos virtų reikia, kad  $T_{pav.} = T_{sot.}$  Tačiau realiuose eksperimentuose virimas nevyksta tol, kol skystis neįkaitinamas keliais laipsniais virš soties temperatūros. Norint palaikyti virimą, paviršiaus temperatūra turi būti šiek tiek aukštesnė nei prisotinimo temperatūra. Šiuo virimo režimu garai bus pastebimi tik virš vandens paviršiaus, tačiau paprastai burbuliukų nebus galima pastebėti. Šiek tiek padidinus paviršiaus temperatūrą, galiausiai įvyks burbulų susidarymas, tačiau didžioji jų dalis kondensuosis skystyje vos tik atsiplėšę nuo paviršiaus žr 1.1pav.[31]



1.1pav. Konvekcinis virimas[31]

### 1.2. Burbulinis virimas

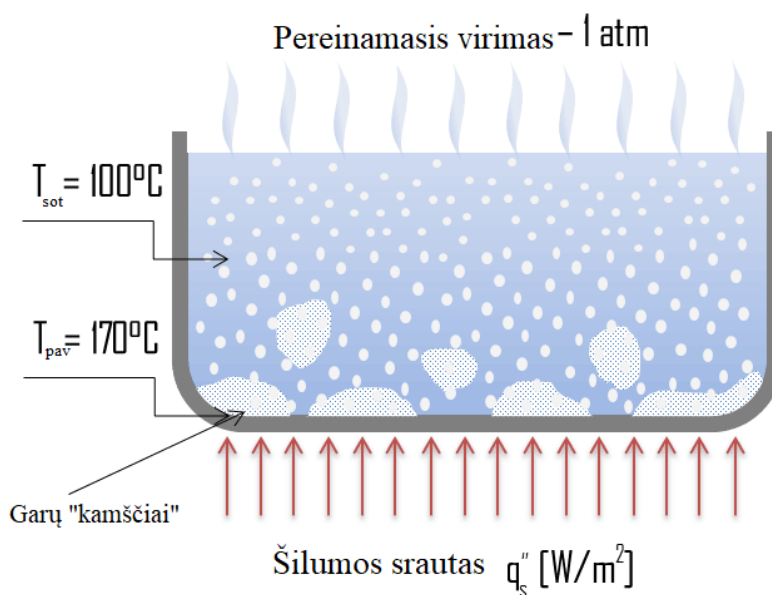
Burbulinio virimo metu, garų burbuliukai susidaro ties šilumos perdavimo paviršiumi, o vėliau nutrūksta ir patenka į pagrindinę skysčio srovę. Toks virimas stipriai padidina šilumos perdavimą, nes prie kaitinamo paviršiaus susidaranti šiluma pernešama į visą skysčio tūrį burbuliuku pagalba. Patekę į pagrindinį skysčio tūrį burbuliukai kondensuojasi, nes skysčio tūrinė temperatūra nėra tokia aukšta kaip šilumos perdavimo paviršiaus temperatūra, kur susidaro garo burbulai. Šis šilumos perdavimo procesas yra pageidautinas, nes šilumos perdavimo paviršiuje sukurta energija greitai ir efektyviai „nunešama“ žr 1.2 pav.[31]



1.2pav. Burbulinis virimas[31]

### 1.3. Pereinamasis virimas

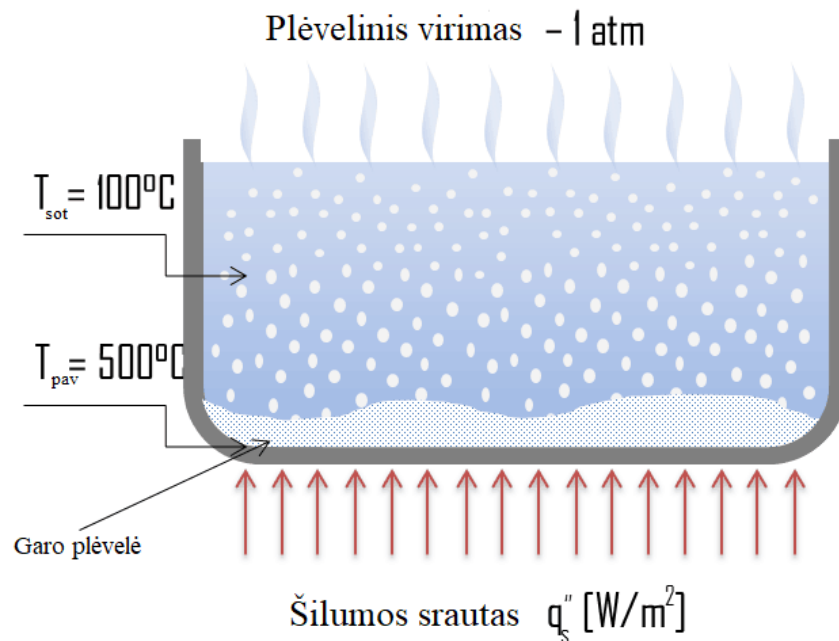
Burbulinio virimo metu šilumos kiekis suteikiamas skysčiui negali būti per didelis, jeigu jis toliau didinamas į tai neatsižvelgiant pasiekiamas šilumos srauto taškas, vadinamas „kritiniu šilumos srautu“ (KŠS). Susidaręs garas gali sudaryti izoliacinę sluoksnį virš paviršiaus, o tai savo ruožtu blogina šilumos perdavimo koeficientą. Taip yra todėl, kad didelę paviršiaus dalį padengia garų plėvelė, kuri veikia kaip šilumos izoliacija dėl mažo garų šilumos laidumo, palyginti su skysčio. Iš karto po to, kai pasiekiamas kritinis šilumos srautas, virimas tampa nestabilus ir vyksta pereinamasis vandens virimas. Virimo perėjimas iš burbulinio į pereinamąjį virimą vadinamas virimo krize. Kadangi už kritinio šilumos srauto taško šilumos perdavimo koeficientas mažėja, perėjimas prie plėvelinio virimo paprastai yra neišvengiamas, žr 1.3 pav.[31]



1.3pav. Pereinamasis virimas[31]

#### 1.4. Plėvelinis virimas

Plėvelinio virimo metu dėl tolesnio šilumos srauto padidėjimo garų plėvelė padengia paviršių. Tai žymiai sumažina konvekcijos koeficientą, nes garų sluoksnis turi žymiai mažesnę šilumos perdavimo gebėjimą. Dėl to kaitinamojo paviršiaus temperatūra labai staigiai išauga. Už šio taško ištisinė garų plėvelė uždengia paviršių ir tarp skysčio fazės ir paviršiaus nebelieka kontakto. Šioje virimo fazėje šiluma perduodama tiek spinduliuojant, tiek šilumos laidumu per garo plėvelę. Šis reiškinys dažnai būna pavojingas pramonėje naudojamiems šilumos perdavimo įrenginiams, kadangi stipriai sumažėjęs šilumos srautui įrenginys gali sugesti, deformuotis jo konstrukcija. Plėvelinis virimas pavaizduotas žr 1.4 pav.[31]



1.4pav. Plėvelinis virimas[31]

## 1.5. Plėvelinio virimo šilumos mainai ir garo plėvelės suirimas sferinio cilindrinio ir plokštelės paviršiuje tyrimas

Pirmą kartą plėvelinis virimas aprašytas prie maždaug 250 m. (Leidenfrost, 1966). Šis reiškinys yra žalingas procesas, kuris gali įvykti katilo vamzdeliuose ar vandeniui aušinamuose branduoliniuose reaktoriuose. Paprastai garo plėvelės susidarymas įvyksta energetiniam įrenginiui veikiant avariniu režimu ar sunkios avarijos metu. Pastebėtas procesas paskatino daug naujų tyrimų, susijusių su šilumos srautu kūnų paviršiuje, tyrimais. Pastebėti ir išskirti tokie virimo etapai kaip: burbulinis, tūrinis, plėvelinis virimas bei kiti. Šiuos procesus išsamiai aprašė Groeneveld ir kt [11].

Bene pirmasis modernus plėvelinio virimo tyrimas, kuriame buvo analizuotas plėvelinis virimas ant paviršiaus, buvo atliktas LeRoy ir kitų [22]. Perkaitinus vamzdelio paviršių buvo stebima lygi garo plėvelė: paviršiaus temperatūrai didėjant, plėvelės storis taip pat didėjo. Atlikta daug fotografuojamųjų tyrimų, vienas iš jų – Stevens ir Witte [26], tokie tyrimai atskleidė daugiau informacijos apie skysčio/garo sąlyčio taško prigimtį ir garo plėvelės irimo charakteristikas.

Kūno paviršiaus, vandens temperatūra bei vandens greičio įtakos buvo analizuotos daugelyje mokslininkų darbų. Lauer ir Hufschmidt [18] pastebėjo, kad temperatūra, prie kurios plėvelė suirdavo, tiesiškai priklauso nuo vandens temperatūros, jie taip pat užfiksavo reikšmingą šilumos perdavimo koeficiento didėjimą, mažėjant pradinei vandens temperatūrai. Dhir ir Purohit [6] atliko eksperimentinį tyrimą, sukoncentruotą į šilumos perdavimo koeficientą prieš pat suyrant garo plėvelei. Maksimalus šilumos perdavimo koeficientas stipriai priklausė nuo vandens temperatūros ir jo greičio, didėjant šiems parametrams, šilumos perdavimo koeficientas taip pat kito. Kaip bebūtų, minimali temperatūra, reikalinga stabiliai plėvelei palaikyti, priklausė tik nuo vandens temperatūros ir tiesiškai didėjo mažinant skysčio temperatūrą. Vijaykumar ir Dhir [28],[27] nustatė, kad vandens temperatūrai artėjant prie nulio, paviršiaus temperatūra šilumos perdavimo koeficientą veikė mažiau.

Vidutinis garo plėvelės storis buvo išmatuotas Fodemski [10] tyrime, naudojant talpos metodą priverstinės konvekcijos plėveliniame virime ant nerūdijančio plieno cilindro su pusrutulio formos cilindro galu. Plėvelės storis didėjo kartu su didėjančia bandinio ir vandens temperatūra ir mažėjo kartu su mažėjančiu vandens greičiu. Tokia pati matavimo technika pritaikyta ir Burns [4], kuris eksperimentiškai pademonstravo, kad garo plėvelės storis gali būti apskaičiuojamas  $\pm 10$  proc. tikslumu, šilumos perdavimą priimančiam vien kaip laidumą per garo plėvelę.

Vandens tekės greičio įtaka šilumos perdavimo koeficientui nėra aiški mokslinėje literatūroje. Aziz ir kt. [2] atrado, kad šilumos perdavimo koeficientas nepriklausomas nuo greičio iki tam tikros jo vertės, jei greičio riba peržengiama, šilumos perdavimo koeficientas didėjo kartu su tolimesniu greičio didėjimu. Kim [15], atlikdamas eksperimentus su sferiškais kūnais, ir Chandler [5], eksperimentuose su cilindrais, stebėjo vandens greičio įtaką, nors ir bandinio temperatūros ir vandens temperatūros įtakos buvo gerokai didesnės. Kim [15] taip pat naudojo lėtaeigę kamerą, kad užfiksuotų plėvelės pokytį ir klasifikavo skysčio/kieto kūno sąlyčio tašką kaip lygų, banguojantį ir turbulentišką, priklausomai nuo vandens temperatūros.

Siekiant teoriškai sumodeliuoti plėvelinio virimo procesą, atlikta daug bandymų, kurių daugelis pritaikė Nusselt [23] laminarinės plėvelės kondensacijos ant vertikalios sienos analizę (išsamesniam

paaiškinimui žr. Jouhara [14]. Atlikti supaprastinimai varijavo priklausomai nuo tyrėjo, bet dažniausiai sutikti buvo tokie: vienoda temperatūra kieto paviršiaus viduje.

1. Pastovios aušinimo skysčio ir garo fizikinės savybės.
2. Lygus garo/vandens sąlyčio taškas.
3. Ribinio sluoksnio prielaidos garui ir skysčiui.
4. Nulinis garo plėvelės storis priekiniame krašte.
5. Paprastos geometrijos bandiniai (pvz. sferos, cilindrai ir vertikali os sienos).

Galimai vienas labiausiai pažengusių iki šių dienų modelių konvektyviam plėveliniam virimui ant vertikalių plokštelių peraušintame skystyje buvo pristatytas Kolev [16]. Modelis gautas pritaikant keletą prielaidų, iš kurių svarbiausios yra:

6. Tiesiniai temperatūros profiliai garo plėvelės ir skysčio ribiniame sluoksnyje.
7. Identiški temperatūros ir greičio ribinio sluoksnio storiai vandenyje – tai implikuoja, kad  $Pr \approx 1$ .
8. Tiesiškas greičio profilis skystame ribiniame sluoksnyje.
9. Pastovus santykis tarp spinduliuojamo šilumos srauto ir laidumo šilumos srauto garo sluoksnyje.
10. Nulinis garo plėvelės storis priekiniame sienos krašte.

Kolev [16] palygino savo šilumos perdavimo ir garo plėvelės storio rezultatus su rezultatais, kai eksperimentuose analizuotas plėvelinis virimas ant 1,3 m ilgio vertikali os sienos prie atmosferinio slėgio ir 487-1236 K temperatūros, bei 3-42 K temperatūros skysčiu. Palyginime išryškėjo 30 proc. skirtumas nuo eksperimentinių verčių. Prielaidos, suformuotos šiame tyrime, aptariam os tolimesniuose skyriuose.

Paskutiniu metu didėjo susidomėjimas plėveliniu virimu kriogeniškuose skysčiuose – ant paviršių (Hama ir Shiotsu, [12]; Zhang ir Murakami, [29]) ar srauto kanaluose (Dreitser, [8]). Honda ir kt. [13] išplėtojo plėvelinio virimo ant sferų teoriją, iš kurios dar prieš pakartotinį drėkinimą galima apskaičiuoti svarbias garo plėvelės storio vertes. Teorija gerai atitiko eksperimentinius duomenis, kai vandens peraušinimas buvo didelis (didesnis nei maždaug 60 K). Esant tipišk esniems peraušinimams (10-20 K), prognozuotas garo storis visada buvo daug mažesnis nei atitinkamai eksperimentinė reikšmė.

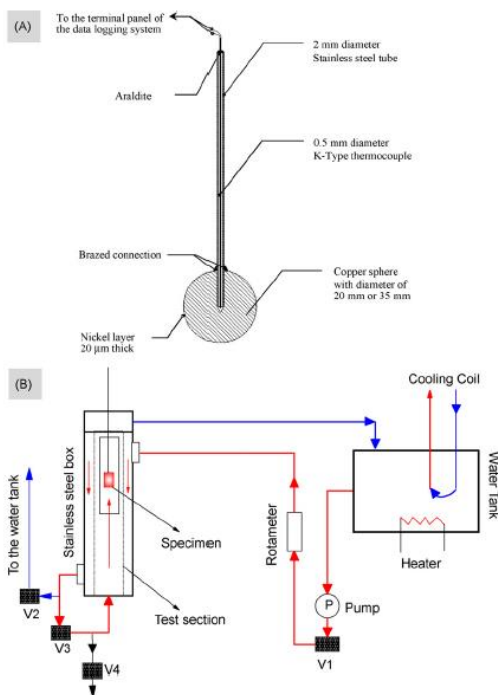
Remiantis apžvalga literatūroje, apibendrinta, kad vis dar yra vietos tolimesniems plėvelinio virimo ir garo plėvelės irimo tyrimams. Nors eksperimentiniai tyrimai buvo atlikti plėveliniam virimui nuo plokščių plokštelių ramybės būsenos skystyje, kaip teigia Bui ir Dhir [3], neatlikta jokių tyrimų su plokščiomis plokštelėmis sraute atliekant tarpinius tyrinėjimus. Kadangi teorinis modeliavimas iki šių dienų rėmėsi daugeliu supaprastinančiųjų prielaidų, išvystytas ir teorinis modelis, iš kurio dažniausiai naudojamos prielaidos buvo eliminuotos.

### **1.5.1. Aparatūra**

Pereinamojo virimo ir pusiausvyros būsenos eksperimentai atlikti naudojant du eksperimentinius stendus. Pereinamojo plėvelinio virimo eksperimentinis aparatas susidėjo iš tiriamųjų kūnų, platformos ir instrumentuotės. Visi bandiniai, naudoti šiame tyrime, buvo pagaminti iš vario ir padengti 20  $\mu\text{m}$  storio nikelio sluoksniu, kad būtų apsaugoti nuo oksidacijos ir nusidėvėjimo kaitinant iki aukštų temperatūrų. Pagaminti septyni skirtingi kūnai, be jokio vidinio šilumos šaltinio, kurių geometrijos buvo sferinės, cilindrinės ir plokštumos. Dviejų sferinių pavyzdžių diametrai buvo 20mm



ir 35 mm. Panaudoti trys: du iš jų buvo pritaikyti aušinimui paraleliniu srautu, kai tuo tarpu, trečiasis buvo pritaikytas aušinimui skersiniu srautu. Dviejų pasrovinio srauto cilindrų diametrai buvo po 20 mm, ilgiai – 60 ir 80 mm, o horizontaliojo cilindro skersiniame sraute diametras buvo 10 mm, ilgis – 35 mm. Visi cilindrai turėjo pusbėnulinis galus. Plokštumų ruošiniai susidėjo iš dviejų plokščių: pirmoji buvo 10 mm storio, 35 mm pločio ir 70 mm aukščio, o antroji – 10 mm storio, 35 mm pločio ir 140 mm aukščio. Į kiekvieną kūną buvo įmontuota viena ar daugiau nerūdijančiu plienu apgaubtų, izoliuotų K-tipo klasės termoporų. Sferinio pavyzdžio išdėstymas pavaizduotas 1.5 pav. A dalyje. [30]



1.5pav. Tipinis sferinis pavyzdys tarpiniams eksperimentams (A) ir vandens ratas (B).[30]

Dvi tiriamosios plokštelės turėjo tris K-tipo termoporas trijuose skirtinguose aukščiuose, kad būtų pamatuota jų temperatūra skirtingose vietose pereinamojo plėvelinio virimo metu.

Pereinamojo plėvelinio virimo tyrimo stendas buvo sudarytas iš trijų dalių: vandens rato, elektrinės krosnies, naudojamos kūnų pašildymui ir bandinio pozicijos kontroliavimo sistemos. Vandens rato schema pateikiama 1.5 pav. B dalyje. Vandens ratas sugeneravo reikalingos temperatūros ir greičio srautus tyrimo srityje, taip priversdamas bandinį ataušti iki kol garo plėvelė, esanti aplink bandinį, suirdavo. Vandens temperatūra buvo kontroliuojama trijų 3kW elektrinių šildytuvų, esančių nerūdijančio plieno talpoje. Vandens srautas, kuris buvo cirkuliuojamas vandens siurblio, galėjo būti nukreipiamas per kūną arba atgal į šildymo indą.

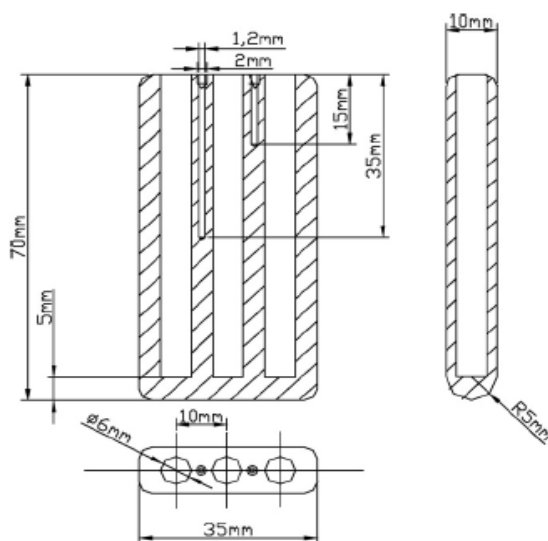
Eksperimento atlikimo sritis buvo stiklinis karščiui atsparus vamzdis, kurio ilgis 1,5 m, o vidinis diametras 80 mm. Jis buvo patalpintas į 1200x140 mm ilgio metalinę dėžę, kuri sukonstruota iš 3 mm storio nerūdijančio plieno. Į dėžę priešingose pusėse buvo įterpti du 70x50 mm stebėjimo langai, pagaminti iš 6 mm armuoto stiklo. Jie leido įrašinėti procesus ir stebėti eksperimentus realiu laiku.

Įrengti du vožtuvai, V2 ir V3 (1.5 pav. B dalis), kurių paskirtis buvo tyrimo metu nukreipti vandenį į tyrimo sritį, kai V2 buvo uždarytas, o V3 buvo atviras, kai vožtuvų pozicijos sukeičiamos vietomis, vanduo nukreipiamas iš tyrimo kolbos į kaitinimo indą. Iš pradžių stabilioms temperatūroms pasiekti karštas srautas buvo paleistas per tyrimo sritį. Srautas toliau buvo nukreiptas, tyrimo sritis buvo drenuota, ir į ją įterptas karštas bandinys. Tuomet srautas paleidžiamas į tyrimo sritį ir pradamas eksperimentas.

Bandiniai buvo kaitinami krosnyje. Kai bandiniai pasiekdavo reikiamą temperatūrą, jie būdavo ištraukiami iš pakuros, pakura patraukiama naudojant pneumatinės kontrolės sistemą ir karštas kūnas nuleidžiamas į tyrimo kolbą. Bandinių temperatūroms užfiksuoti buvo naudojama duomenų suvedimo sistema; siekiant stebėti temperatūras pasiruošimo ir eksperimentinėje stadijose, termoporos iš pakuros ir vandens sistemos buvo prijungtos prie standartinio COMARK skaitmeninio termometro.

Vaizdo įrašymo sistema buvo sudaryta iš skaitmeninės vaizdo kameros, didelio jautrumo mikrofono ir apšvietimo sistemos. Vaizdo įrašo įrašymo greitis buvo 60 kadro per sekundę su 1/125 s užrakto greičiu. Įrašius medžiagą, vaizdo įrašai buvo redaguoti ir rezultatyvi medžiaga analizuota vėliau, kadras po kadro.

Pusiausvyros būsenos eksperimentai buvo naudojami išanalizuoti šilumos perdavimo, plėvelės stabilumo ir suirimo rezultatus. Šiame tyrime naudojami bandiniai buvo identiški prieš tai atliktų tarpinių tyrimų bandiniams. Tačiau šį kartą su vidiniu šildymu, kaip parodyta 1.6 pav.



**1.6pav.** Pusiausvyros būsenos eksperimente naudoto plokštės bandinio skerspjūvis, kuriame vaizduojamos šildytuvų pozicijos, (3x6 mm skylės) ir termoporų pozicijos (2x1,2 mm skylės).[30]

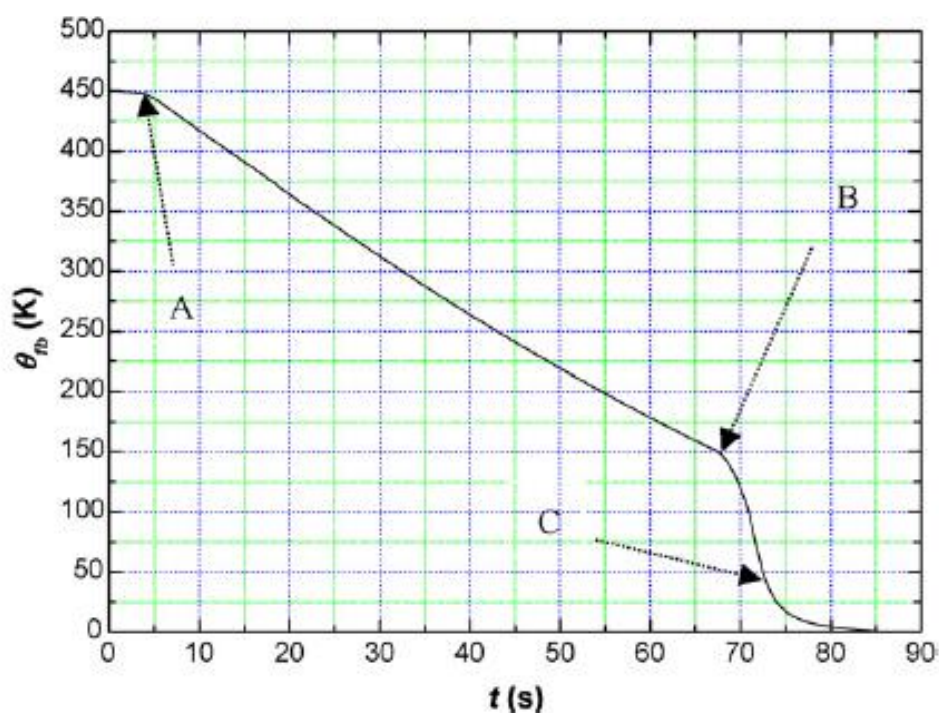
Bandinys buvo 70x335x10 mm plokštė, pagaminta iš vario ir padengta 20 μm nikelio sluoksniu, kad būtų išvengta paviršiaus nusidėvėjimo esant aukštomis temperatūroms. Bandinys buvo kaitinamas trijų įterptų kasetinių šildytuvų iki 600 °C temperatūros ir nuleidžiamas į 300 mm matmenų kvadratinę talpyklą, pilną vandens. Kiekvienas šildytuvas davė maksimaliai 500 W energijos prie 240 V įėjimo įtampos, o plokščių temperatūros buvo matuojamos dviejų termoporų, įtaisytų tarp kasetinių šildytuvų. Vandens temperatūra talpoje iki eksperimentui reikalingos temperatūros buvo pakeliama naudojant 1,5 kW panardintu elektriniu šildytuvu. Siekiant pamatuoti energijos tiekimą kasetiniams šildytuvams bandinio viduje buvo naudojami voltmetras ir ampermetras. Vaizdo įrašai padaryti

naudojant tą pačią metodiką, kaip ir tarpiniuose bandymuose. Penkios K-tipo termoporos – dvi iš bandinių, dvi iš vandens talpos ir viena iš aplinkos buvo prijungtos prie COMARK sistemos tam, kad būtų galima pamatuoti temperatūras prieš ir po eksperimento.

### 1.5.2. Duomenų analizė

Kad būtų galima apskaičiuoti šilumos perdavimo koeficientą, garo plėvelės storį ir šilumos srautą stabilaus garo plėvelės periodu, buvo analizuojami pereinamojo plėvelinio virimo ir pusiausvyros būsenos eksperimentų duomenys. Pereinamųjų eksperimentų metu duomenys, taip pat, buvo surenkami prieš pat plėvelės irimą, kad būtų galima gauti informacijos apie maksimalų šilumos perdavimo koeficientą, minimalų garo plėvelės storį, minimalų šilumos srautą ir minimalų šilumos srautą, reikalingą išlaikyti plėvelinį virimą.

1.7 pav. pavaizduotas tipiškas bandinio perkaitinimo laiko atžvilgiu pereinamojo plėvelinio virimo eksperimento metu.



**1.7 pav** Bandinio perkaitinimo variacijos diagrama priklausomai nuo laiko plėvelinio virimo eksperimento ant cilindro metu.  $D=20$  mm,  $L=60$  mm,  $T_w=95$  °C,  $u_w=2$  cm/s.[30]

Gali būti išskiriamos keturios šios diagramos duomenų sritys: pirmoji sritis prasidėjo kartu su bandiniu ore prie pasirinktos pradinės temperatūros. Antroji sritis prasidėjo A taške, kai vandens srautas buvo paleistas tekėti į talpą kurioje buvo karštas kūnas, aplink jį susiformavo garo plėvelė ir prasidėjo konvekcinių plėvelinio virimo procesas. Ši sritis paveiksle vaizduojama kaip beveik tiesi linija tarp A ir B. Trečioji sritis prasidėjo B taške, kur vanduo pradėjo kontaktuoti su įkaitusiu paviršiumi, prasidėjo burbulinis virimas. Bandinio temperatūra šiame B etape toliau bus vadinama minimalia temperatūra reikalinga išlaikyti plėvelinį virimą. Po B taško prasidėjo staigus kūno vėsimo procesas kartu su energingu garo formavimusi ant bandinio paviršiaus ir staigiu bandinio temperatūros pokyčiu laike. Ši sritis truko iki C taško, kur prasidėjo jau ketvirtoji sritis, vienfazis priverstinis konvekcinis šilumos perdavimas iš palyginti vėsaus bandinio į skystį. Galiausiai skysčio ir kūno temperatūra susivienodina.

Tyrimas buvo sukoncentruotas į antrąją sritį – stabilų plėvelinį virimą. Apskaičiuojant šilumos perdavimo koeficientą, garo plėvelės storį ir šilumos srautą bei priimant vienodą temperatūrą visame kūne.

Šilumos perdavimo koeficientas plėveliniam virimui buvo apskaičiuotas iš surinktų temperatūrinių duomenų naudojantis 1 lygtimi kuri aprašoma [30] literatūros šaltinyje. 1.5 darbo dalyje pateiktos formulės (1-23) aprašytos literatūroje [30].

$$h = \frac{\rho_s V_s C_{ps} dT/dt}{A_s (T_s - T_{sat})} \quad (1)$$

Temperatūros pokyčio greitis (gradientas)  $dT/dt$  apskaičiuotas naudojant diferencines formules, kurios buvo pritaikytos temperatūrinių/laiko duomenų failui kiekvienam testui.  $A_s$  (paviršiaus plotas) apskaičiuotas remiantis pačio bandinio forma. Vario šiluminės savybės paimtos iš Kreith ir Bohn [17]. Jouhara [14] atlikta paklaidų analizė leido nustatyti maksimalią  $\pm 6,5$  proc. šilumos perdavimo koeficiento paklaidą, nors eksperimentinių duomenų tikėtinas neapibrėžtumas, gautas naudojant individualių neapibrėžtumų šaknies-sumos-kvadrato kombinaciją, buvo  $\pm 3,5$  proc. Vidutinis garo plėvelės storis apskaičiuotas iš šilumos perdavimo koeficiento, priimant, kad šilumos perdavimas per plėvelę vyksta laidumo būdu (2 formulė), pavyzdžiui:

$$\delta = \frac{k_v}{h} \quad (2)$$

Pagrindimas tam yra tiek eksperimentinis, tiek teorinis. Burns [4] naudodamasis talpuminiu zonu pamatavo šilumos perdavimo koeficientus ant pakaitinto pusrutulio plėvelinio virimo metu ir plėvelės storį. Jis ištyrė, kad šie du rodikliai gali būti susiję reikšmingai prognozuodami laidumą per plėvelę. Teoriniu lygmeniu tai gali būti ginčytina. Nesudėtinga pademonstruoti, kad šiluminis spinduliavimas per ploną plėvelę nėra reikšmingas ir lemia daugiausia tik už kelias procentines šilumos perdavimo dalis (priedas B). Reikšmingos konvekcijos trūkumas gali būti apskaičiuotas iš energijos lygties (3 formulė), jei yra priimamas kvazi-pusiausvyros procesas:

$$\rho_v u_v C_{pv} \frac{\partial T_v}{\partial x} + \rho_v v_v C_{pv} \frac{\partial T_v}{\partial y} = k_v \frac{\partial^2 T_v}{\partial y^2} \quad (3)$$

Temperatūros gradientas pasroviui šilumos perdavimui tik per plėvelę yra nulis, dėl šios priežasties pirmasis laikas kairėje pusėje yra nulis. Konvekcija per plėvelę, taip pat, bus maža, jei vv bus maža (antrasis laikas kairėje pusėje). Ašiniu temperatūriniu gradientu ilgosios plokštumos bandiniui ir teoriniais uv bei vv apskaičiavimais paremti dydžio tvarkos skaičiavimai patvirtina, kad laikai kairėje formulės pusėje yra antrosios tvarkos.

Plėvelinio virimo šilumos perdavimas buvo apskaičiuotas iš šilumos perdavimo koeficiento ir bandinio temperatūros stabilaus garo plėvelės periodu (4 formulė):

$$q = h(T_s - T_{sat}) \quad (4)$$

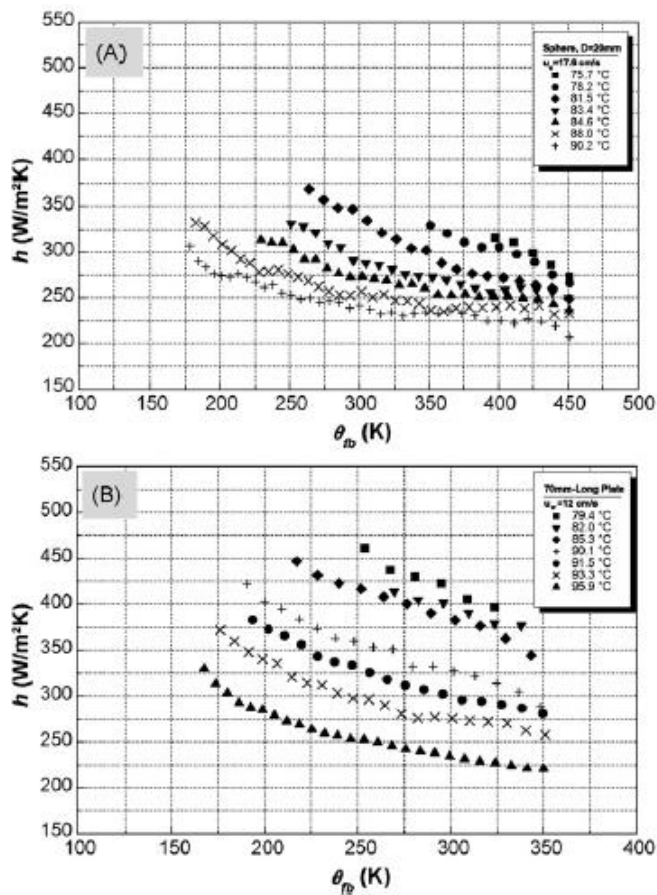
Pusiausvyros būsenos eksperimentuose šilumos perdavimas buvo apskaičiuotas iš energijos sąnaudų, o plėvelinio virimo šilumos perdavimo koeficientas buvo įvertintas naudojant bandinio ir prisotinimo temperatūras. Maksimali stabilios būsenos šilumos perdavimo koeficiento paklaida buvo  $\pm 9$  proc., o tikėtinas neapibrėžtumas buvo  $\pm 6$  proc. Garo plėvelės storis buvo apskaičiuotas iš šilumos perdavimo koeficiento, kaip ir anksčiau.

#### 4. Eksperimentiniai rezultatai

Visų atliktų testų eksperimentiniai rezultatai buvo pristatyti šiame nagrinėtame darbe, rezultatai tiek absoliučiaisiais skaičiais, tiek tendencijomis gerai atitiko ankstesnius rezultatus, aprašytus Lauer ir Hufschmidt [18], Dhir ir Purohit [6], Kim [15] ir Chandler [5], dėl to šis tyrimas bus koncentruojamas į reprezentatyvius duomenis.

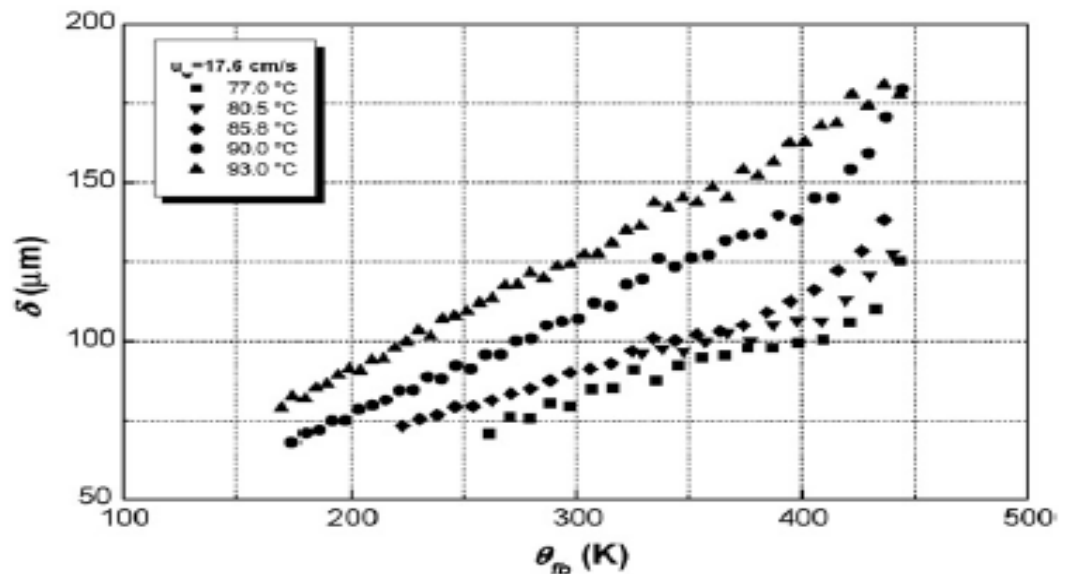
Trumpalaikių eksperimentų metu plėvelinio virimo periodas tarp garo plėvelės formavimosi, prasidedančio nuo iš anksto numatytos pradinės bandinio temperatūros ir plėvelės irimo, didėjo kartu su mažėjančiu vandens peraušnimu visuose naudotuose bandiniuose. Pavyzdžiui, plėvelė ant 20 mm diametro sferos esant apie 33 K vandens perkaitinimui truko apie 23 s, kai tuo tarpu esant apie 7 K perkaitinimui, plėvelė truko apie 55 s. Visi pristatomi duomenys yra apie eksperimentus, kur garo plėvelė tapo stabili prieš prasidedant irimui, kas netinka esant dideliems peraušinimams. Pavyzdžiui, garo plėvelė ant plokštumos bandinio, kurio matmenys 70x35x 10 mm, prieš plėvelei suyrant, nepasiekė stabilios būsenos daugumoje eksperimentų, kur vandens temperatūra buvo žemesnė nei 80 °C, taigi šilumos perdavimo duomenys prie tokių sąlygų negalėjo būti gaunami.

Šilumos perdavimo koeficientas visiems bandiniams laikinai didėjo, kai bandinys aušo ir garo plėvelė tapo plonesnė – 1.8 pav. A dalyje duomenys apie 20 mm sferą 17,6 cm/s greičio vandens sraute, ir 1.8 pav. B dalyje duomenys apie 70x35x10 mm plokštės bandinį.



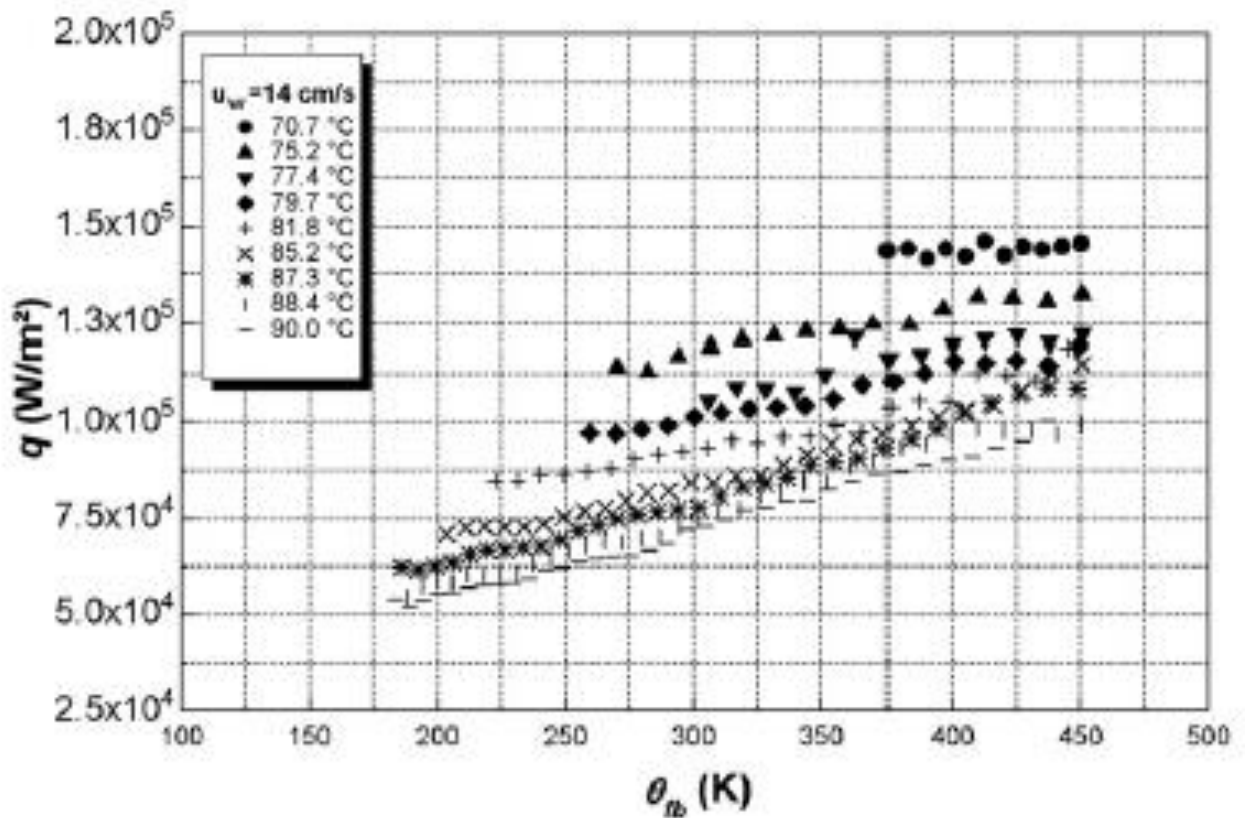
1.8 pav. Šilumos perdavimo koeficiento kitimas priklausomai nuo bandinio perkaitinimo.[30]

Šilumos perdavimo koeficientas taip pat didėjo su vandens peraušimu ir jo pokyčio greitis tapo didesnis su mažėjančiu bandinio perkaitinimu (1.8 pav.). Garo plėvelės storis, apskaičiuotas iš šilumos perdavimo koeficiento, kito tarp 200  $\mu\text{m}$  ir 70  $\mu\text{m}$ ; duomenys 17,6 cm/s srautui, paraleliam 80 mm cilindriui, pateikiami 1.9 pav.



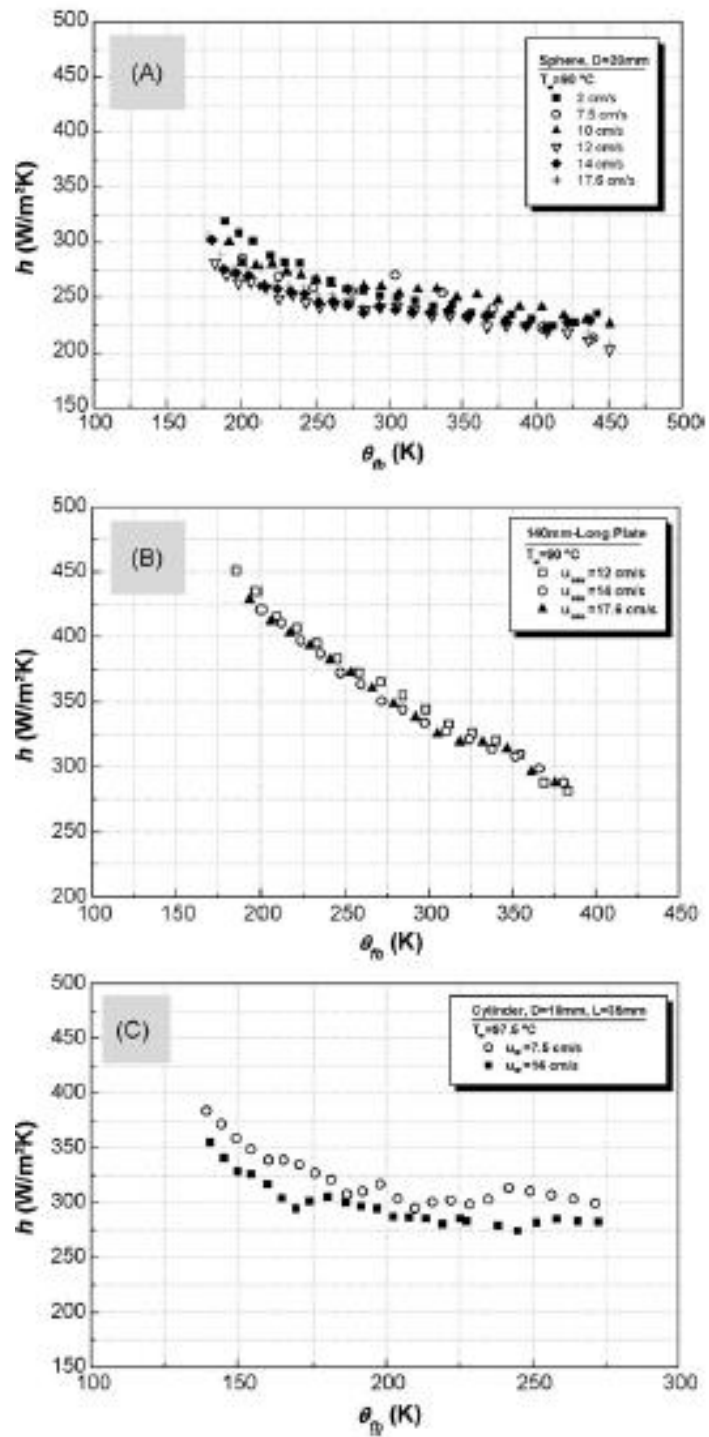
1.9pav. Garo plėvelės storio kitimas pagal cilindrinio bandinio perkaitinimą,  $D=20$  mm,  $L=80$  mm,  $u_b=17,6$  cm/s.[30]

Šilumos srautas plėvelinio virimo periodu, kuriam buvo numatytas  $100 \text{ kW/m}^2$  šilumos srautas, sumažėjo, kai bandinys aušo, nepaisant to, kad šilumos perdavimo koeficientas reikšmingai didėjo (1.10 pav. duomenys 20 mm sferai):



1.10 pav. Šilumos srauto kitimas pagal bandinio perkaitinimą 20 mm sferos bandinyje,  $D=20 \text{ mm}$ . [30]

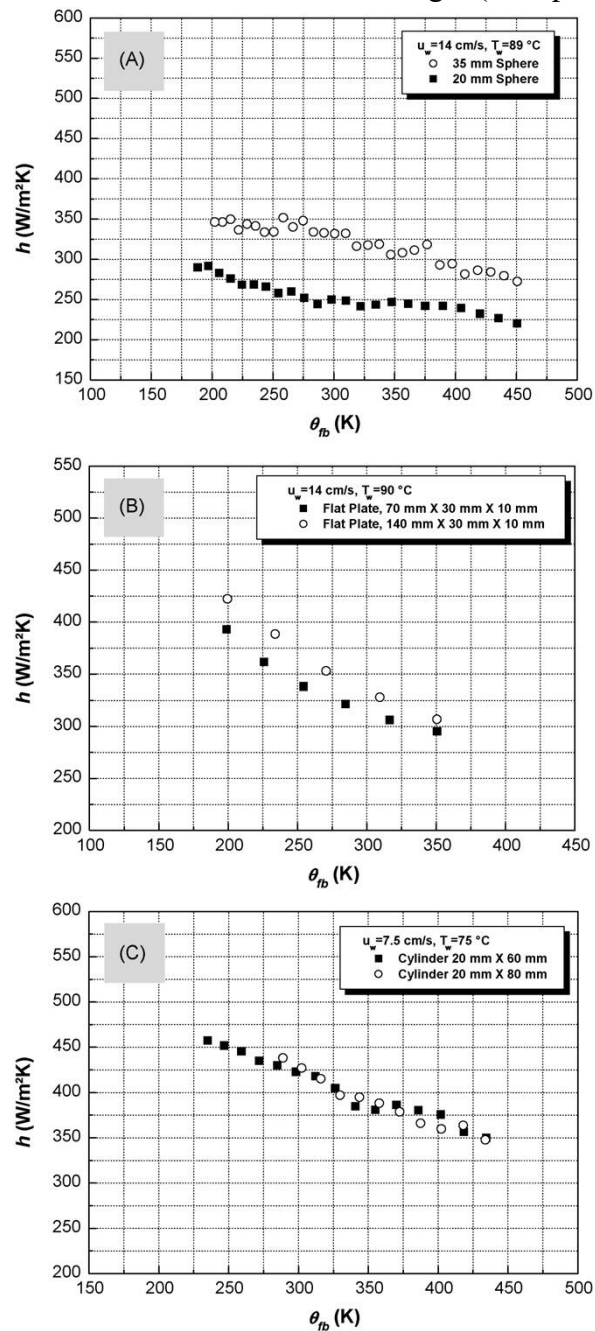
Neskaitant trumpo cilindro priešpriešiniame sraute, vandens greitis neturėjo didelio poveikio šilumos perdavimo koeficientams (1.11 pav. A-C).



1.11 pav. Vandens greičio poveikis šilumos perdavimo koeficiento kitimui.[30]

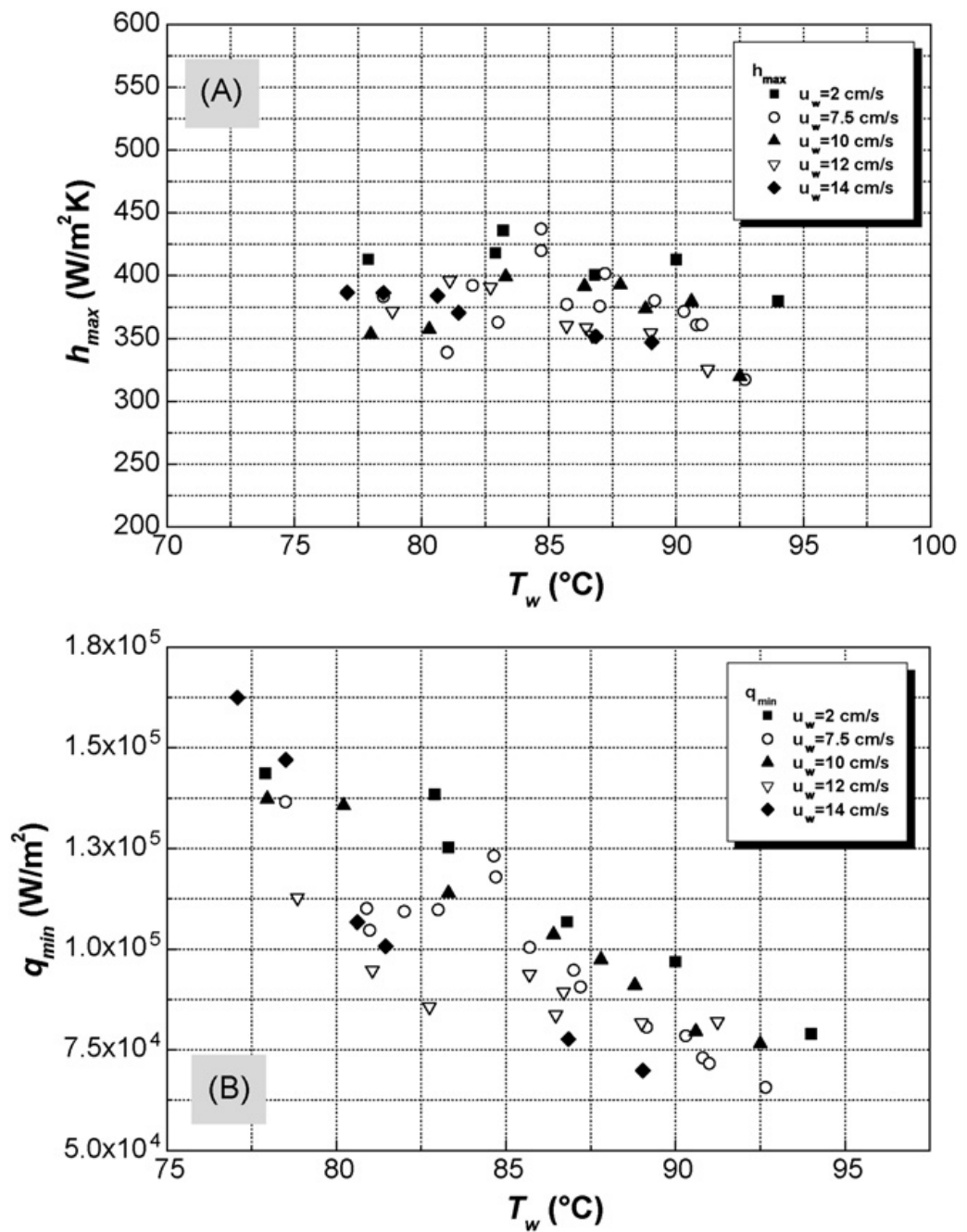


Šilumos perdavimo koeficientas buvo veikiamas sferos diametro (1.12 pav. A dalis) ir plokštelės ilgio (1.12 paveikslo B dalis), bet buvo mažiau veikiami cilindro ilgio (1.12 pav. C dalis).



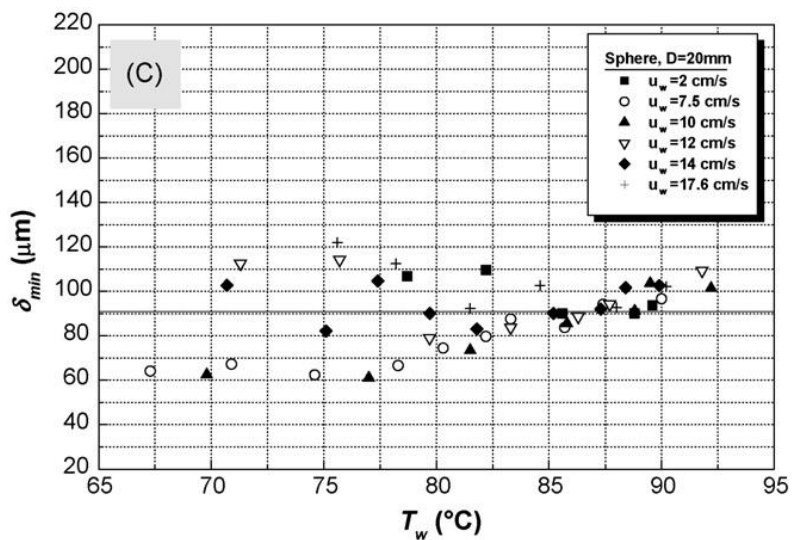
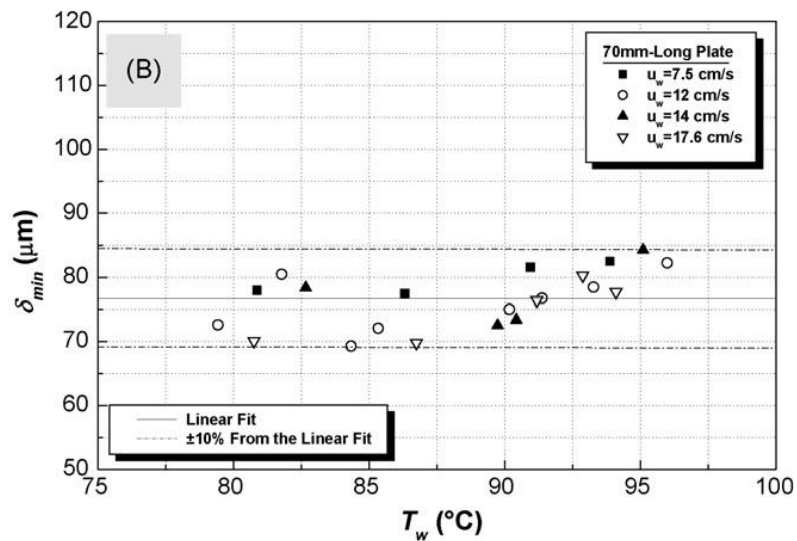
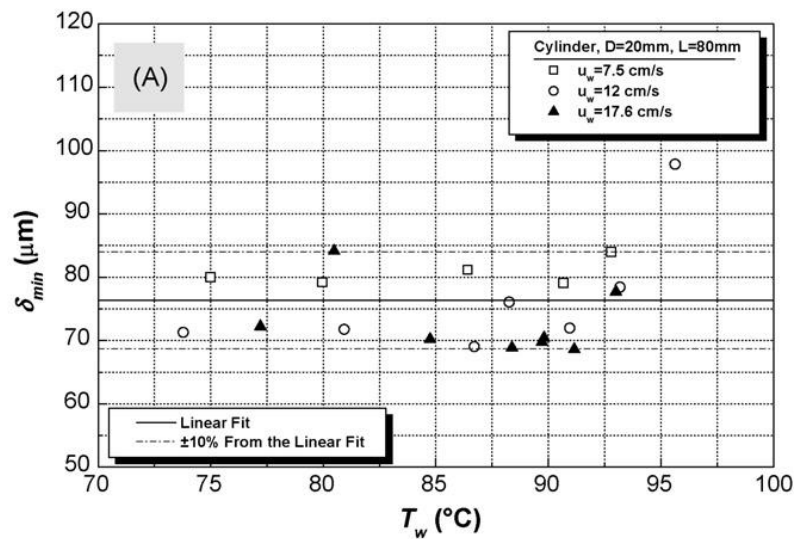
1.12pav. Bandinio matmenų (ilgio ir diametro) poveikis šilumos perdavimo koeficientui.[30]

Šilumos perdavimo kiekyje buvo matyti reikšmingas išsibarstymas prieš pat garo plėvelės suirimą. Vertinant bendrai, maksimalus šilumos perdavimo koeficientas ir minimalus šilumos srautas buvo linkę didėti kartu su mažėjančia vandens temperatūra (atitinkamai 1.13 pav. A ir B dalys 35 mm sferai).



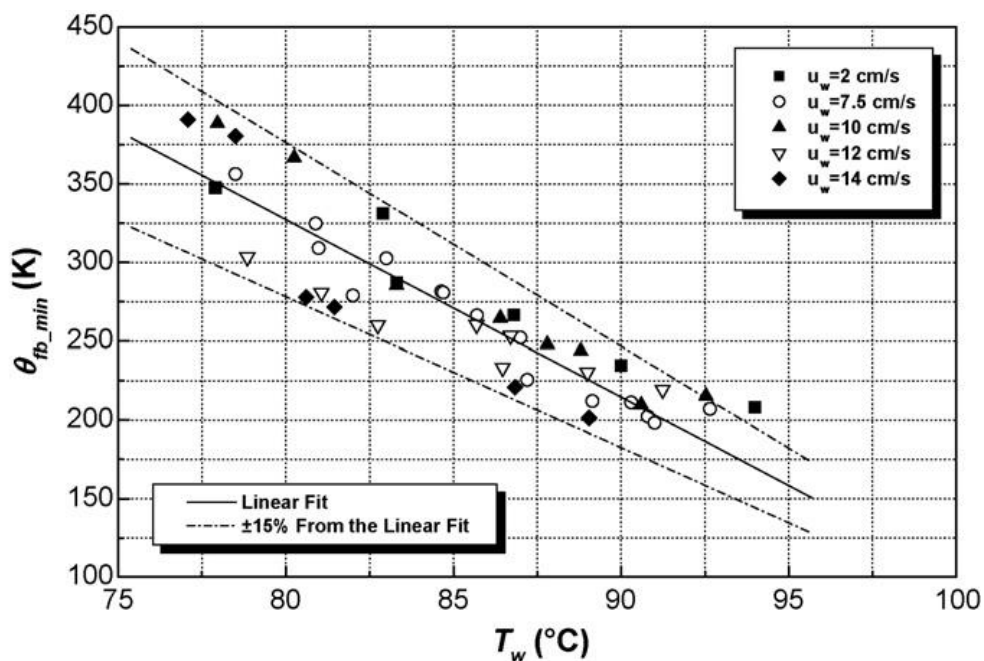
**1.13pav.** Maksimalaus šilumos perdavimo koeficiento (A) ir minimalaus šilumos srauto (B) kitimas priklausomai nuo vandens temperatūros, sferai  $D=35$  mm [30]

Priešingai, minimalus garo storis (80  $\mu$ m cilindrams ir plokštėms bei šiek tiek didesnis sferoms) nebuvo stipri vandens temperatūros funkcija (1.14 pav. A-C).



**1.14pav.** Minimalaus garo plėvelės storio kitimas priklausomai nuo vandens temperatūros.[30]

Kaip bebūtų, minimalus šilumos srautas reikalingas plėvelei išsilaikyti didėjo kartu su vandens temperatūros kitimu (1.15 pav. 35 mm sferai).



**1.15pav.** Minimalaus šilumos srauto kiekis reikalingas palaikyti plėvelinį virimą priklausomai nuo vandens temperatūros, sferai  $D=35$  mm.[30]

Padidėjusi kūno temperatūra atsakinga už minimalaus šilumos srauto padidėjimą, o jo poveikis vidutiniam garo laidumui paaiškina maksimalaus šilumos perdavimo koeficiento padidėjimą.

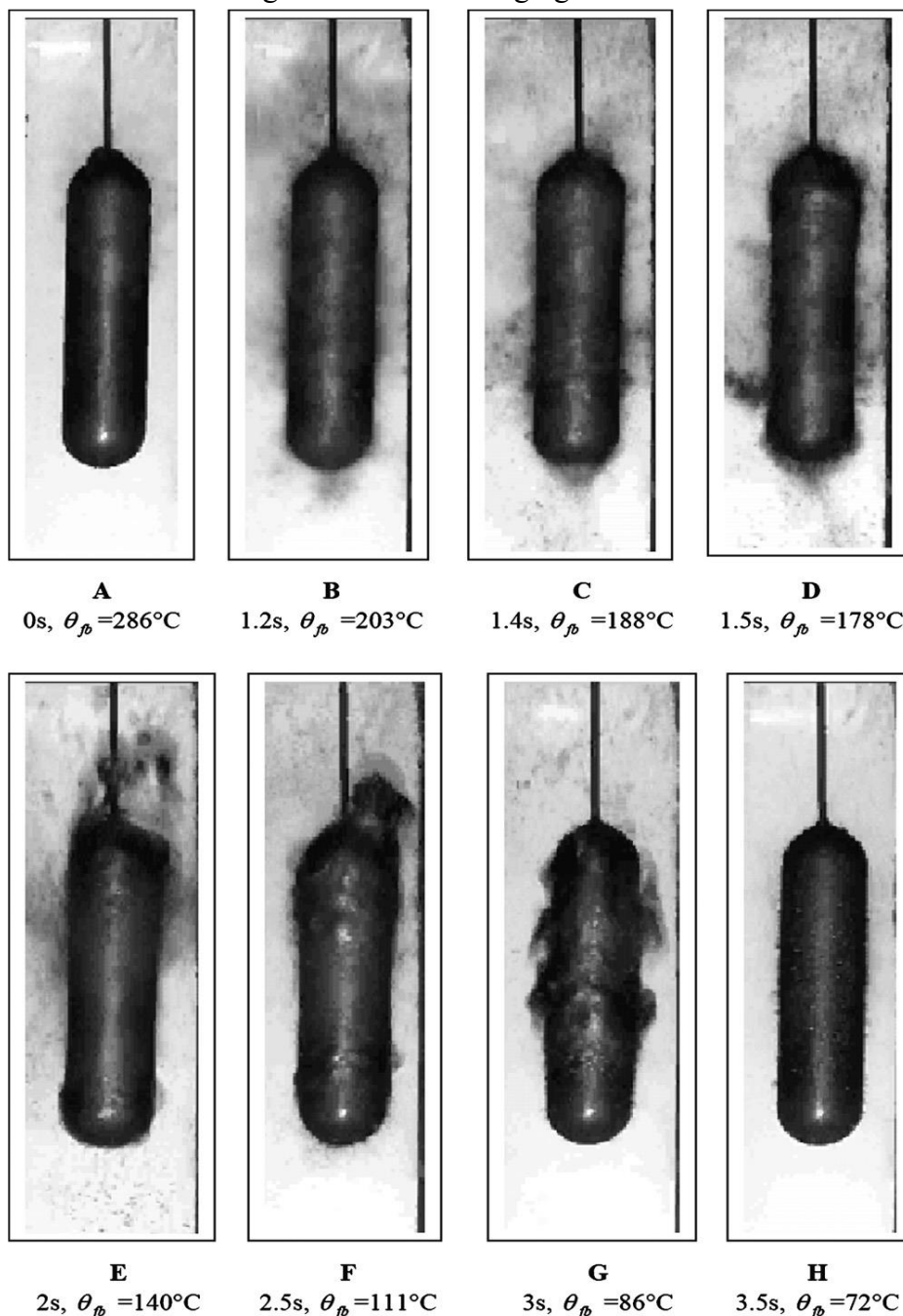
Tam, kad būtų galima išnagrinėti garo/skysčio sąlygtį ir irimo mechanizmus, daugeliui eksperimentų buvo įrašinėjama vaizdo medžiaga. Aplink sferinius bandinius buvo stebimi trijų tipų skysčio/garo sąlyčiai: turbulentiškas, banguojantis ir lygus. Tam tikras sąlyčio tipas didele dalimi priklausė nuo vandens ir bandinio temperatūrų. Pirmieji du tipai taip pat buvo pastebimi ant cilindrų, su pasroviniu srautu ir plokščių bandinių, o trečiasis tipas – lygusis sąlytis – nagrinėjamos eksperimentinėmis sąlygomis nestebėtas dengiantis viso cilindrinio ar plokščio bandinio paviršių. Vietoje to, jis pastebėtas dengiantis apatinę bandinio dalį, kai tuo tarpu viršutinę bandinio dalį dengė banguojančio tipo sąlytis. Svarbu paminėti, kad prie tam tikrų temperatūrų, reliatyvus greitis tarp bandinio bei vandens ir sąlyčio apie sferinius ir cilindrinus bandinius sąlygos buvo panašios į tas, kurios užfiksuotos, kai bandiniai buvo nuleidžiami tiesiai į indą su vandeniu be srauto, kaip kad Kim [15] ir Chandler [5]. Tai verčia manyti, kad šiame tyrime turbulencija, esanti vandens sraute per tyrimo sritį, neturėjo didelio vaidmens, nepaisant to, kad srauto Reinoldso skaičius tyrimo srityje buvo 4000-40000 ribose iš perėjimo srities į pilnai turbulentišką sritį. Svarbu paminėti, kad patiems bandiniams Reinoldso skaičius visada buvo mažesnis nei 100000 ir dėl to ribiniai sluoksniai būtų iš esmės buvę laminariniai, net jei ir laisvoji srovė būtų buvusi turbulentiška.

Kai vidutinis šilumos srautas iš bandinio į sąlygtį pasiekė kritinę reikšmę, prie kurios garo generavimas buvo nepakankamas garo plėvelei palaikyti, garo plėvelė pradėjo irti. Stebint video medžiagą, išryškėjo trys plėvelės irimo modeliai:

### 1.5.3. Sprogusis plėvelės irimas

Šis irimo modelis buvo pastebėtas vykstantis kai sferų, plokščių ir cilindrų peraušinimas pasroviniame sraute buvo 20-25 K.

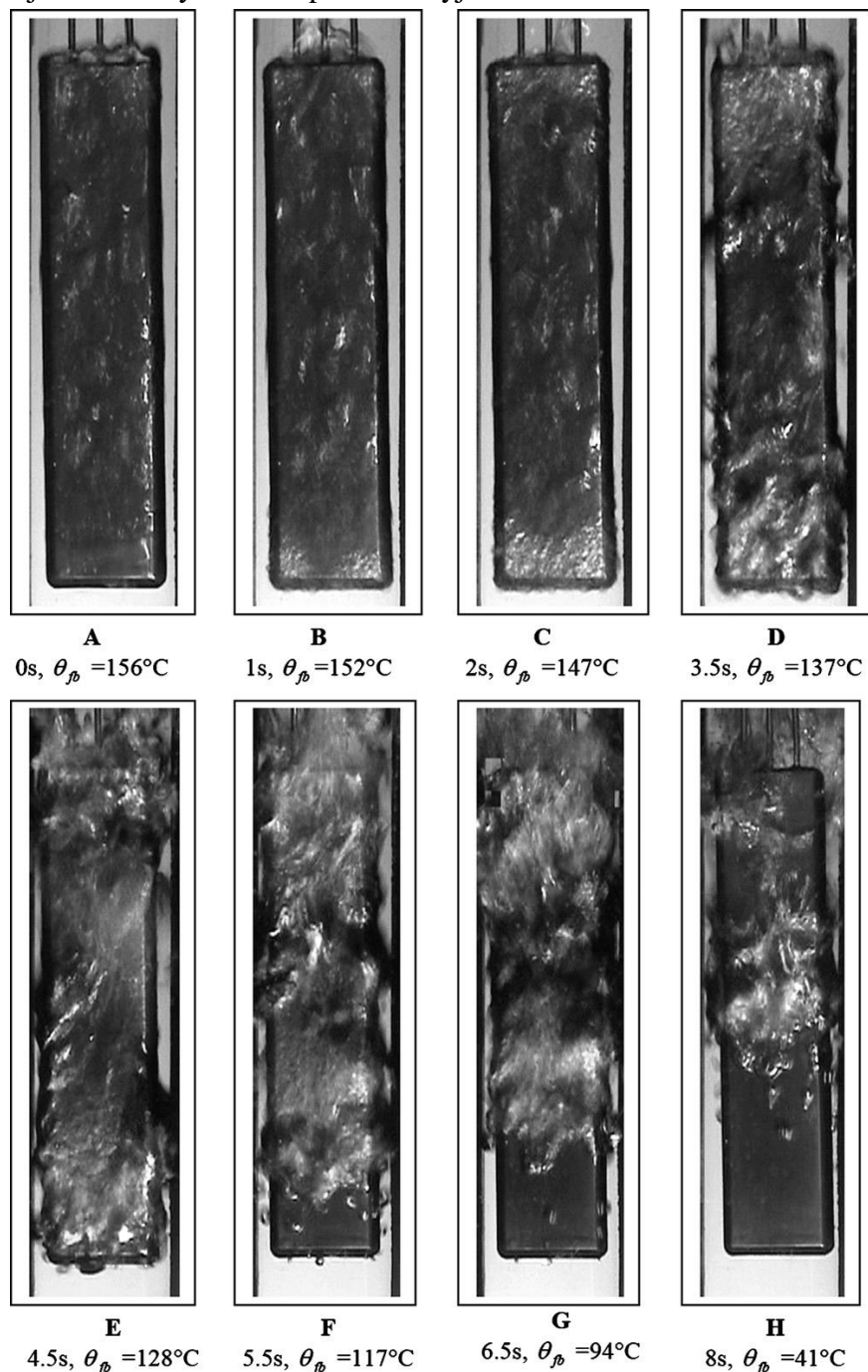
1.16 pav. pavaizduota 80 mm cilindro virimo režimų seka. Paviršius buvo sudrėkintas prie didelio paviršiaus peraušinimo tam, kad garo generavimo greitis taip pat būtų labai didelis ir užkertantis kelią pakartotiniam plėvelės formavimuisi. Garo burbulai, susiformavę pirmajame kontakte, buvo maži, mažesnio nei 0,5 mm diametro ir jie lėkė nuo paviršiaus į skystį dideliu greičiu, vėliau vandenyje kondensuodamiesi. Visas bandinio paviršius buvo sparčiai pakartotinai drėkinamas, tipiškai kas 1-4 sekundes, ir visi bandiniai buvo staigiai ataušinami energingo burbulinio virimo.



1.16pav. Sprogus irimo modelis 20x80 mm cilindru,  $T_w=75^{\circ}\text{C}$ ,  $u_w=7,5\text{ cm/s}$ . [30]

#### 1.5.4. Progresyvus plėvelės irimas

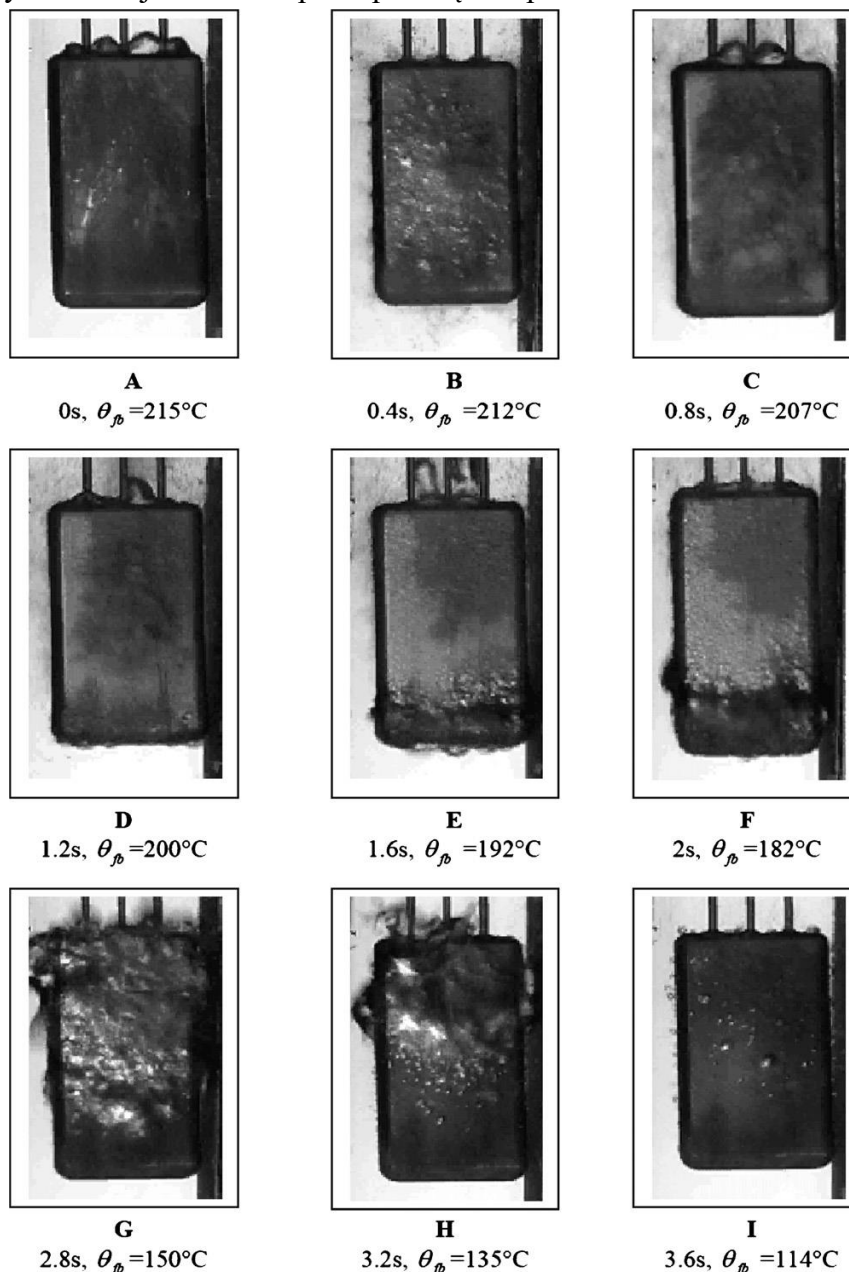
Šis irimo modelis vykdavo prie mažesnių nei 10-15 K vandens peraušinimų, priklausomai nuo bandinio, aušinimo zona (ar kai kuriais atvejais – dviem zonomis), stabiliai judančiomis virš bandinio paviršiaus. Sferų ir plokščių paviršius pirmiausia buvo sudrėkinamas, dažniausiai apačioje, kur buvo generuojami apie 1 mm diametro garo burbulai, ir toliau drėkinimo riba kildavo aukštyn. Drėkinimo riba judėdavo žemyn cilindru pasroviniame sraute atvejais arba judėdavo iš šalių link vidurio cilindro priešpriešiniame sraute atvejais. 1.17 pav. pavaizduota seka ilgajai plokštei. Kai perkaitinimas trumpam sumažėdavo, viršutinė garo plėvelės dalis tapdavo ypač turbulentiška, ir nuo plokštės apačios susidarydavo aušinimo zona. Netrukus po to plokštės viršuje formuodavosi antroji aušinimo zona, kuri matoma judanti žemyn ir 1.16 pav. H dalyje.



1.17pav. Progresyvusis irimo modelis 140x35x10 mm plokštei,  $T_w=96,5^\circ\text{C}$ ,  $u_w=12\text{ cm/s}$ . [30]

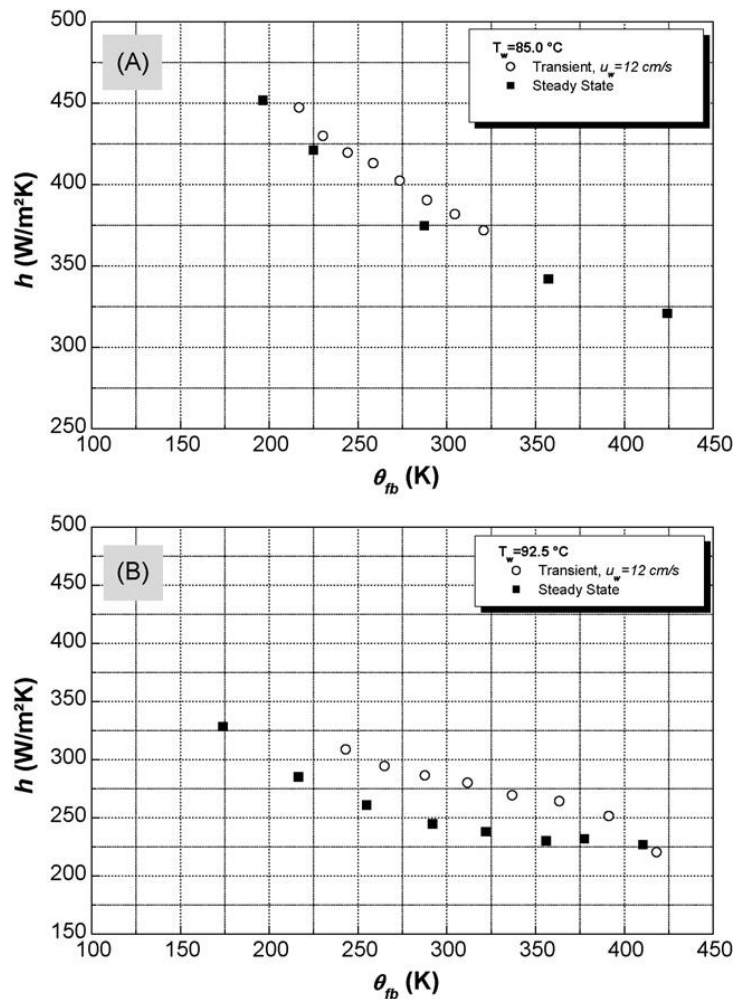
### 1.5.5. Sprogus-progresyvusis plėvelės irimas

Iki šiol dar nebuvęs apibūdintas irimo modelis buvo matomas vidutiniuose temperatūrose, tipiška 10-20 K. Paviršius buvo drėkinamas prie žemesnio paviršiaus perkaitinimo nei, kad sprogiajame modelyje. Po pirmojo įkaitusio kūno sąlyčio su aušinimo agentu ant viso paviršiaus (išskyrus 140 mm ilgio plokštelės atvejį, kur kontaktas vyko tik apačioje) ir sprogo garso, plėvelė pakartotinai susiformavo maždaug pusei sekundės, tada vėl suiro tyliai ir lėtai, panašiai kaip progresyviame modelyje, su prasidedančiu burbuliniu virimu. 1.18 pav. patektas šis modelis 70 mm plokštei. Garo plėvelė yra baigta 1.18 pav. A dalyje, B dalyje parodomas pradinis sprogo garo formavimasis, C dalyje matyti pakartotinai susiformavusi plėvelė, D dalyje galima matyti aušinimo zoną bandinio apačioje ir E-I dalys vaizduoja aušinimo ploto plitimą virš paviršiaus.



1.18pav. Sprogus-progresyvus irimo modelis 70x35x10 mm plokštei,  $T_w=85^\circ\text{C}$ ,  $u_w=12\text{ cm/s}$

Sprogus ir progresyvus modeliai buvo pirmiausiai apžvelgti aplink sferas Stevens ir Witte [25] bei stebėti tyrėjų, kurie atliko tolimesnius tyrimus, bet tarpinis modelis nebuvo pastebėtas, tai galėjo nutikti dėl to, kad jis buvo laikomas labai skubotu ar progresyviu, priklausomai nuo to, kuris buvo artimesnis. Pusiausvyros būsenos eksperimento, atlikto ant 70x35x10 mm dydžio plokštelės, rezultatai parodo labai panašų šilumos perdavimo koeficiento ir garo plėvelės storio santykį su bandinio ir vandens temperatūra, kaip ir tarpiniame eksperimente. Šilumos perdavimo koeficientai buvo šiek tiek didesni tarpiniuose eksperimentuose su priverstiniu srautu, lyginant su pusiausvyros būsenos eksperimentais su stovinčiu vandeniu, galimai dėl labiau sutrikdyto garo/skysčio sąlyčio tarpiniuose eksperimentuose. Šilumos perdavimo koeficientų palyginimas pateikiamas 1.19 pav. A ir B dalyse.



**1.19pav.** Šilumos perdavimo koeficiento kitimas priklausomai nuo bandinio temperatūros tarpiniuose ir pusiausvyros būsenos eksperimentuose,  $T_w$  atitinkamai 85 °C ir 92,5 °C. [30]

Garų/skysčio sąlyčio elgsena taip pat buvo labai panaši į tą, kuri vyko tarpinių eksperimentų metu priverstiniame sraute. Jokių garo plėvelės irimo duomenų nesurinkta pusiausvyros būsenos tyrimuose. Kaip bebūtų, vaizdo medžiaga buvo įrašoma plėvelės irimo modeliams, kurie įvykdavo, kai energija buvo išjungžiama ir bandinys buvo paliekamas ataušti. Įdomu tai, kad sprogusis-progresyvusis modelis buvo pastebėtas prie 86 °C vandens temperatūros, kas leidžia manyti, kad šis modelis nepriklausė nuo naudojamojo stendo.



### 1.5.6. Teoriniai tyrimai

Sukurtas teorinis modelis plėveliniam virimui tirti ant plokštelės, panašios į naudotas eksperimentuose. Plokštelės aukštis buvo  $L$ , plotis –  $W$ , o storis  $2rs$  ( $rs$  – plokštelės apačios kreivumo spindulys). Modelis pasrovinio vandens ir garo srautų prasme rėmėsi Kolev [16] požiūriu, bet priėmė šias prielaidas:

- Bandinio temperatūra yra vientisa
- Garo srautas atsiranda iš garavimo garo/skysčio sąlytyje.
- Garo plėvelė yra laminarinė, stabili ir pilnai susiformavusi x kryptimi. Ši prielaida buvo daroma visuose iki šiol atliktuose tyrimuose, bet natūraliai yra apytikslė.
- Šiluma yra perduodama iš bandinio į garo/skysčio sąlytį laidumo būdu, kas atitinka Burns [4] tyrimo rezultatus.
- Kai greičio ir temperatūros variacijos tyrimo srities centre yra nedidelės, priimama, kad vandens srautai virš bandinio yra tolygaus greičio ir temperatūros.
- Greičio ir temperatūriniai profiliai vandenyje yra antros eilės  $y^2$  funkcijos, nors tai yra apytiksliai, manoma, kad tai yra tiksliau, nei tiesiniai modeliai, priimti ankstesniuose tyrimuose (Kolev, [16]).
- Vandens savybės įvertinamos pagal sąlyčio ir laisvojo srauto temperatūras.
- Garo savybės įvertinamos pagal bandinio ir sąlyčio temperatūras.
- Vandens ribinio sluoksnio ir garo sluoksnio storio santykis ant bandinio yra pastovus. Ši prielaida yra reikalinga, kad būtų galima formules padaryti išsprendžiamas, tačiau tai tikslu yra tik atvejais, kuomet vandens greičio įtaka yra maža.

Tuomet garo srauto formulė yra tokia (5 formulė):

$$\mu_v \frac{\partial^2 u_v}{\partial y_1^2} = \frac{dP}{dx} + \rho_v g \quad (5)$$

kur  $y_1$  yra  $y$  koordinatė garo plėvelėje,  $\mu_v$  yra dinaminis garo klampumas,  $u_v$  yra vertikalus garo greitis,  $\rho_v$  yra garo tankis ir  $P$  yra slėgis (apskaičiuojamas pagal slėgį vandenyje). Kai  $dP/dx = -\rho_w g$  ir  $\Delta = ((\rho_w - \rho_v)g / 2\mu_v)$ , garo greičio pasiskirstymas su sąlyčio greičiu  $u_i$  prie  $y_1 = \delta_y$  yra išreikšta 6 formule:

$$u_v = u_i \frac{y_1}{\delta_v} - \Delta \left( \frac{y_1^2}{\delta_v^2} - \frac{y_1}{\delta_v} \right) \delta_v^2 \quad (6)$$

Greičio profilis vandenyje buvo priimtas kaip kvadratinė funkcija (7 formulė):

$$u_w = u_i - (u_i - u_\infty) \left( 2 \frac{y_2}{\delta_w} - \frac{y_2^2}{\delta_w^2} \right) \quad (7)$$

Sąlyčio greitis  $u_i$  yra apskaičiuojamas iš sąlygos, kad šlyties įtempis turi būti toks pats abiejose pusėse (8 formulė):

$$\tau_i = \left[ \mu_v \frac{\partial u_v}{\partial y_1} \right]_{y_1=\delta_v} = \left[ \mu_w \frac{\partial u_w}{\partial y_2} \right]_{y_2=0} \quad (8)$$

Užrašant  $\psi = \mu_w / \mu_v$  ir  $\Lambda = \delta_w / \delta_v$ , randame sąlyčio greitį (9 formulė):

$$u_i = \frac{2\psi u_\infty + \Delta \delta_v \delta_w}{\Lambda + 2\psi} \quad (9)$$

Šiluma, perėjusi iš karšto bandinio per garo plėvelę, yra sunaudojama trimis skirtingais būdais: garinant vandenį sąlytyje, kad būtų galima palaikyti plėvelę aplink bandinį, perkaitinant iš garo/skysčio sąlyčio einantį garą ir šilumos perdavimui konvekcijos būdu į supantį peraušintą vandens srautą.

Atsižvelgiant į diferencines kontrolės apimtis garo plėvelėje, kurios matmenys  $dx \times \delta_v \times W$ , energijos balansas šiai kontrolės apimčiai randamas iš 10 formulės:

$$dQ_t = dQ_{ev} + dQ_{sh} + dQ_w \quad (10)$$

$dQ_t$  yra šilumos praradimo iš karšto bandinio greitis, apskaičiuojamas 11 formulės:

$$dQ_t = \frac{k_v}{\delta_v} dA_s \theta_{fb} \quad (11)$$

čia  $dA_s = W dx$ ,  $k_v$  yra garo šilumos laidumas prie atmosferinio slėgio, ir  $\theta_{fb} = (T_s - T_{sat})$ ;  $T_s$  ir  $T_{sat}$  yra atitinkamai bandinio ir prisotinimo temperatūros.

$dQ_{ev}$  yra šiluma, sunaudota garavimui garo/skysčio sąlytyje (12 formulė):

$$dQ_{ev} = \frac{d\dot{m}_v}{dx} h_{fg} dx \quad (12)$$

čia  $h_{fg}$  yra garavimo latentinė šiluma prie atmosferinio slėgio,  $\dot{m}_v$  yra garo masės srauto greitis plėvelės viduje,  $x$  pozicijoje.

$dQ_{sh}$  yra šiluma, sunaudota pakaitinant garą nuo prisotinimo temperatūros iki vidutinės garo temperatūros garo plėvelėje, ji duota 13 formulėje:

$$dQ_{sh} = \frac{d\dot{m}_v}{dx} C_{pv} \theta_{av} dx \quad (13)$$

čia  $\theta_{av} = (T_{av} - T_{sat})$ ;  $T_{av}$  yra vidutinė garo temperatūra.

$dQ_w$  yra šilumos perdavimo į peraušintą vandens srautą greitis, jis duotas 14 formulėje:

$$dQ_w = -dA_s k_w \frac{\partial T_w}{\partial y} |_{y_2} = 0 \quad (14)$$

10 formulės pildymas, kai atsižvelgiama į 11-14 formules, pateiktas 15 formulėje:

$$\frac{k_v}{\delta_v} dA_s \theta_{fb} = \frac{d\dot{m}_v}{dx} (h_{fg} + C_{pv} \theta_{av}) dx + \left( -dA_s k_w \frac{\partial T_w}{\partial y} |_{y_2} = 0 \right) \quad (15)$$

Garo masės srauto greitis prie X atstumo palei bandinį yra parodomas 16 formulėje:

$$\dot{m}_v = \int_0^{\delta_v} (\rho_v u_v W) dy_1 \quad (16)$$

Įterpiant garo greičio išraišką iš 6 formulės į 16 formulę, po keleto manipuliacijų gaunama 17 formulė:

$$\dot{m}_v = \rho_v W \left( \frac{2\Lambda + \psi}{3(\Lambda + 2\psi)} \Delta \delta_v^3 + \frac{\psi u_\infty}{\Lambda + 2\psi} \delta_v \right) \quad (17)$$

Kad būtų galima apskaičiuoti masės srauto greičio padidėjimą pagal kontrolės apimtį, kurios aukštis yra dx, 17 formulė diferencijuojama, kad būtų gaunama 18 formulė:

$$\frac{d\dot{m}_v}{dx} dx = \rho_v W \left( \frac{2\Lambda + \psi}{(\Lambda + 2\psi)} \Delta \delta_v^2 + \frac{\psi u_\infty}{\Lambda + 2\psi} \right) d\delta_v \quad (18)$$

Temperatūrinis profilis vandenyje taip pat laikomas kvadratine funkcija, kalbant apie atstumą nuo sąlyčio ir šiluminio ribinio sluoksnio storį (19 formulė):

$$T_w = T_{sat} - \theta_w \left( 2 \frac{y_2}{\delta_{w\_th}} - \frac{y_2^2}{\delta_{w\_th}^2} \right) \quad (19)$$

čia vandens šiluminio ribinio sluoksnio storis  $\delta_{w\_th}$ , remiantis Pohlhausen (Kreith ir Bohn, [17]), yra susijęs su momentiniu ribiniu sluoksniu laminariniuose srautuose (20 formulė):

$$\delta_{w\_th} = \frac{\delta_w}{Pr^{1/3}} \quad (20)$$

$\theta_w = (T_{sat} - T_\infty)$ ;  $T_\infty$  yra vandens srauto temperatūra laisvajame sraute. Pakeičiant  $T_w$  iš 19 formulės į 14 formulę, gaunama 21 formulė:

$$dQ_w = dA_s \frac{2Pr^{1/3} k_w}{\delta_w} \theta_w \quad (21)$$

Pakeičiant 21 ir 18 formules į 15 formulę, parašant, kad  $\Lambda = \delta w / \delta v$ , ir pertvarkant dvi formulės puses, gaunama 22 formulė:

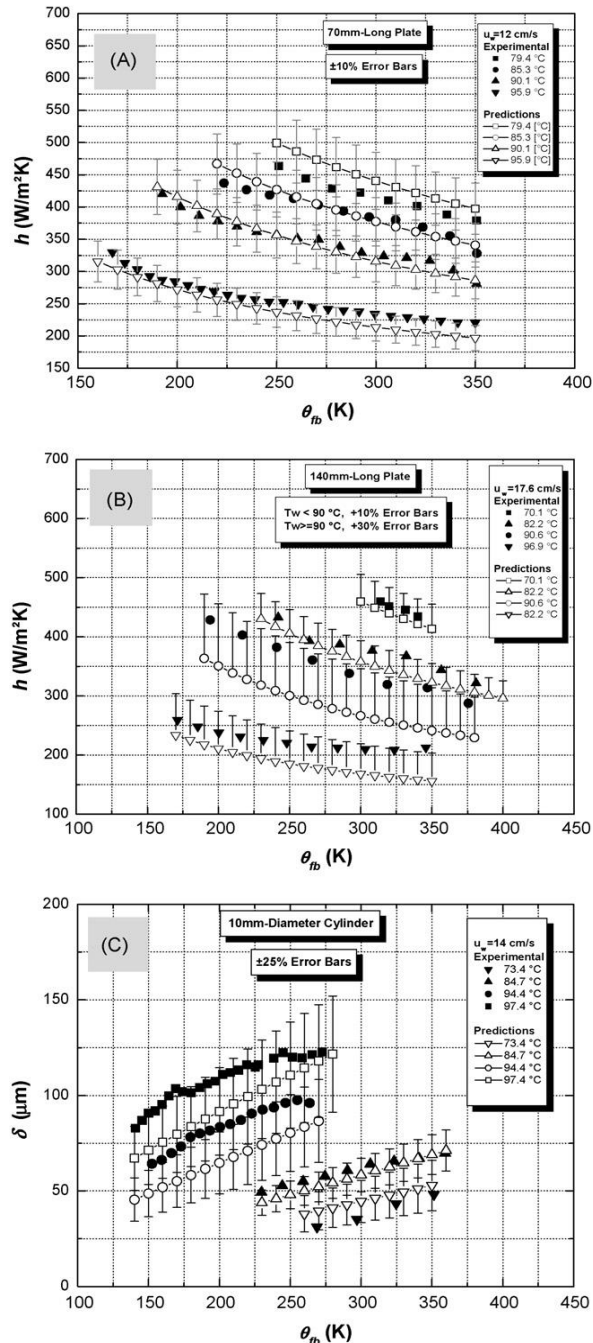
$$dx = \frac{\rho_v (h_{fg} + C_{pv} \theta_{av})}{k_v \theta_{fb} - (2Pr^{1/3} k_w / \Lambda) \theta_w} \left( \frac{2\Lambda + \psi}{(\Lambda + 2\psi)} \Delta \delta_v^3 + \frac{\psi u_\infty}{\Lambda + 2\psi} \delta_v \right) d\delta_v \quad (22)$$

Integravus  $x=0 \rightarrow x=X$  ir  $\delta v = \delta v_0 \rightarrow \delta v = \delta v_x$ , kur  $\delta v_0$  yra garo plėvelės storis taške  $x=0$ , gaunama 23 lygtis:

$$X = \frac{\rho_v (h_{fg} + C_{pv} \theta_{av})}{k_v \theta_{fb} - (2Pr^{1/3} k_w / \Lambda) \theta_w} \cdot \left( \frac{(2\Lambda + \psi) \Delta}{4(\Lambda + 2\psi)} (\delta_{vx}^4 - \delta_{v0}^4) + \frac{\psi u_\infty}{2(\Lambda + 2\psi)} (\delta_{vx}^2 - \delta_{v0}^2) \right) \quad (23)$$

Kuri gali būti sprendžiama taip, kad leistų apskaičiuoti garo sluoksnio storį, kalbant apie atstumą  $X$  ir kitus parametrus. Ribinio sluoksnio storio santykis  $\Lambda$  buvo apskaičiuojamas priimant nulinį vandens greitį laisvajame sraute  $\mu_\infty = 0$ . Ši prielaida gali būti pagrindžiama atsižvelgiant į mažą vandens greičio poveikį šilumos perdavimo rezultatams eksperimentuose ant plokščių plokštelių šio tyrimo metu. Svarbu žinoti garo sluoksnio storį  $\delta v_0$  prie  $x=0$ , plokštelės plokščiosios dalies pradžioje ir puscilindrio viršuje. Ši reikšmė buvo apskaičiuojama priimant tolygų garo sluoksnį ant puscilindrinio paviršiaus ir pusiausvyrą tarp šilumos laidumo per garo sluoksnį ir garo garavimo, garo perkaitinimo ir konvekcijos į skystį.

C++ programavimo kalba buvo parašytas kompiuterinis kodas, skirtas išspręsti aukščiau esančias formules, pateikti vietinius ir vidutinius garo plėvelės storio, šilumos perdavimo koeficiento ir šilumos srauto rezultatus. Duomenys palyginami su eksperimentiniais duomenimis su 70 mm ir 140 mm ilgio plokštelėmis iš atitinkamai 1.20 pav. A ir B dalių. Be to, kai apatinė plokščių plokštelių dalis yra panaši į 10 mm diametro cilindro priešpriešiniame sraute apatinę pusę, garo plėvelės storio prie  $x=0$  duomenys, apskaičiuoti kodu, 1.20 pav. C dalyje yra palyginami su cilindro priešpriešiniame sraute eksperimento, vykusio panašiomis sąlygomis, duomenimis.



1.20 pav. Eksperimentinių rezultatų palyginimas ir prognozės plokštelėms (A ir B), ir 10 mm diametro cilindru priešpriešiniame sraute (C).[30]

Teoriniai rezultatai 70 mm ilgio plokštei turėjo maksimalų  $\pm 10$  proc. neatitikimą su eksperimentiniais rezultatais. Kalbant apie 140 mm ilgio plokštelę, kodas pateikia 10 proc. mažesnius, nei buvo eksperimentiniai, rezultatus, kai vandens temperatūros buvo žemiau 90 °C. Kai vandens temperatūros buvo virš 90 °C, paklaida buvo didesnė, ir teoriniai rezultatai buvo 30 proc. mažesni nei eksperimentiniai rezultatai. Kai dvi reikšmės plokščiai plokštei palyginamos su vidutiniais garo plėvelės storiais 10 mm diametro cilindrai priešpriešiniame sraute, maksimalus neatitikimas yra  $\pm 25$  proc.

### 1.5.7. Tyrimo apibendrinimas

Bandinio ar vandens temperatūros sumažinimas padidino šilumos perdavimo koeficientus visoms analizuotoms geometrijoms dėl garo storio, kaip pavaizduota 4 paveiksle. Priešingai, vandens greičio keitimas turėjo mažai įtakos šilumos perdavimo greičiui, išskyrus cilindrai priešpriešiniame sraute (7 paveikslas). To priežastis greičiausiai – santykiniai garo ir vandens greičių dydžiai. Dėl techninių priežasčių dabartinė platforma neleistų didesnių nei 17,6 cm/s vandens greičių į tyrimo sritį. Priešingai, garo, esančio virš didesnių bandinių, greičiai veikiausiai būtų buvę 50-200 cm/s. Tik ant trumpojo cilindro priešpriešiniame sraute garo sluoksnis ir garo greitis būtų buvęs pakankamai mažas, kad šilumos perdavimas būtų paveiktas padidėjusių sąlyčio greičių. Kad būtų galima eksperimentiškai ištirti greičio įtaką plėvelinio virimo šilumos perdavimui, būtų reikalingas palyginti didelis vandens greičio diapazonas.

Bandinio dydžio poveikis buvo didžiausias sferinėms formoms (8 paveikslo A dalis). 35 mm sfera turėjo nuosekliai didesnius plėvelinio virimo šilumos perdavimo koeficientus, nei kad 20 mm diametro sfera ir tai galėjo nutikti dėl labiau turbulentiško garo/skysčio sąlyčio. Kuo turbulentiškesnis garo/skysčio sąlytis, tuo didesnė šilumos perdavimo sritis konvekcijai į peraušinto vandens srautą. Toks pats efektas, tik mažesnis dydžiu, taip pat gali būti matomas su plokštumos paviršiais (8 paveikslo B dalis). Su didėjančiais cilindrais, esančiais paraleliniame sraute, skysčio/garo santykio sutrikimai buvo didžiaja dalimi sustabdyti dėl storesnio garo sluoksnio poveikio (8 paveikslo C dalis).

Minimalus šilumos srautas reikalingas išlaikyti plėvelę ant paviršius didėjo kartu su vandens peraušimu visose analizuotose geometrijose, daugiausiai – didėjo linijiškai, kaip, pavyzdžiui, pateikiama 11 paveiksle. Kaip bebūtų, minimalus garo storis daugumai bandinių pasirodė didele dalimi priklausomas nuo vandens temperatūros (10 paveikslas), ir tipinės jo reikšmės buvo 70-80  $\mu\text{m}$  ilgiesiems cilindrams ir plokštelėms. Maksimalus šilumos perdavimo koeficientas ir minimalus šilumos srautas didėjo kartu su peraušimu dėl minimalaus plėvelinio virimo perkaitinimo padidėjimo ir iš to sekančio vidutinio šiluminio laidumo garo sluoksnyje padidėjimo (9 paveikslas).

Garos/skysčio sąlyčio stebėjimai buvo informatyvūs. Priklausomai nuo garo plėvelės storio buvo išskirtos trys sąlyčio sąlygos – turbulentiška, banguojanti ir lygi. Turbulentiškas sąlytis įvykdavo prie žemų vandens peraušimų, tipškai – mažesnių nei 10 K, jis vystėsi į labai turbulentiškas sąlygas prie vandens peraušimų, mažesnių nei 5 K, ypatingai plokštelių atveju. Šis turbulentiškas sąlytis sukeldavo keletą pavienių kieto kūno - skysčio kontaktų, ypač analizuotos 14 mm ilgio plokštelės atveju. Šie kontaktai įvykdavo gana tyliai, plėvelei nedelsiant pačiai pakartotinai susiformuojant kontakto vietoje. Kontaktai buvo didelio dažnio prie didesnių paviršiaus ir vandens temperatūrų. Kieto kūno - skysčio kontaktai buvo užfiksuoti ir viršutinėse sferų dalyse, ypač 35 mm diametro sferos atveju, taip pat – cilindro viršutinėse dalyse, sužadinimo srityse. Šios išvados atitinka Dhuga ir Winterton [7] ir Orozco bei Francisco [24] rezultatus.

Banguojantis sąlytis buvo dominuojantis prie protarpinių vandens peraušinimų, tipiškai – apie 15 K temperatūros su bangavimų grupėmis, judančiomis į viršų link paviršiaus. Paminėta, kad bangavimų greitis padidėdavo ir vienos bangelės amplitudė sumažėdavo kartu su vandens temperatūros ar bandinio temperatūros sumažėjimu. Garo plėvelė buvo stabilesnė nei turbulentiškuoju atveju ir turėjo daug mažesnį kieto kūno - skysčio sąlyčių dažnį. Bangelių atsiradimas, kaip manoma, yra Kelvin-Helmholtz nestabilumų rezultatas, panašus aiškinimas buvo pateiktas Naylor [22], Kim [15] ir Chandler [5].

Lygusis sąlytis buvo dominuojantis esant dideliems vandens peraušinimams, tipiškai – virš 25 K. Tai gali būti vertinama kaip progresija nuo banguojančio sąlyčio, kada bangelės, mažėjant vandens temperatūrai ar bandinio perkaitinimui, mažėja amplitudė, bet didėja dažniu, iki kol pasiekama stadija, kur bangelės yra nebepastebimos. Remiantis vaizdo įrašais ir stebėjimais realiu laiku, garo plėvelės su lygiu sąlyčiu buvo stabilesnės nei plėvelės su kitų dviejų tipų sąlyčiais. Kaip bebūtų, prie žemų bandinių perkaitinimų pasitaikė ir protarpinių kieto kūno - skysčio kontaktų, ypač 20 mm diametro sferos atveju, vandens temperatūroms esant mažesnėms nei 75 °C. Manoma, kad taip atsitiko dėl sužadinto vandens srauto aplink mikro daleles ant bandinio paviršiaus. Kieto kūno - skysčio kontaktai šiuo atveju buvo lydimi sprogo garso. Lygusis sąlytis taip pat buvo užfiksuotas ir ant žemutinių plokštelių ar cilindų dalių, bet sąlytis palei bandinį išsivystydavo į banguojančio ar kartais net ir turbulentiško sąlyčio sąlygas dėl padidėjusio garo plėvelės storio. Mažasis cilindras priešpriešiniame sraute visomis sąlygomis pasižymėjo, palyginti lygiu sąlyčiu, galimai dėl to, kad garo plėvelė laikėsi per trumpą laiką kitoms sąlyčio rūšims išsivystyti.

Garų plėvelės irimo tipas buvo didele dalimi priklausomas nuo vandens temperatūros. Pastebėta, kad nepastovus plėvelės irimas įvykdavo prie palyginti didelio vandens peraušinimo ir buvo lydymas didelio sprogo garso, dideliame plote vykstant sparčiai garo generacijai. Garo plėvelė pasiekė kritinę plėvelės storio reikšmę prie didelio paviršiaus perkaitinimo.

Progresyvus plėvelės irimas pasireiškėdavo prie palyginti mažų vandens perkaitinimų. Garo plėvelė buvo palyginti stora prie tokių sąlygų. Kai garo plėvelė pasiekė kritinį storį ir įvyko pirmasis kieto kūno - skysčio kontaktas, susidariusio garo kiekis toje vietoje buvo sąlyginai menkas. Tai privertė aušinimo zoną lėtai slinkti, iki kol visas paviršiaus plotas buvo visiškai sudrėkintas. Aušinimo riba prasidėjo nuo cilindro paraleliniame sraute viršaus: sferų ir plokštelių atveju, plėvelės irimo riba judėjo nuo apačios link viršaus. Trumpojo cilindro priešpriešiniame sraute atveju, aušinimo zona judėjo nuo kraštų link centro. Sprogusis - progresyvusis irimo modelis įvykdavo prie pavienių vandens peraušinimų, apjungdamas abiejų atskirų mechanizmų bruožus. Pastebėta, kad šis irimo modelis pakartotinai drėkino visą bandinio paviršių dviem etapais. Kai garo plėvelės storis pasiekė savo kritinę reikšmę, įvykdavo pirmasis kieto kūno - skysčio kontaktas, lydymas sprogo garso ir tas kontaktas buvo per visą paviršių. Plėvelė mažiau nei praėjus 0,5 s laiko tarpui susiformuodavo pakartotinai, iki kol per paviršių atsirado aušinimo zona. Tokios elgsenos priežastis, kaip manoma, buvo pradinis bandinio perkaitinimo pakartotinis drėkinimas, jis buvo mažesnis, nei sprogojo modelio atveju, bet vis tiek pakankamai didelis. Dėl to plėvelė susiformavo pakartotinai, bet kadangi buvo ataušinta pradinio kontakto, paviršius dabar buvo pakankamai atvėsęs, kad prasidėtų progresyvusis plėvelės irimas ir aušinimo zona.

Stabilios būsenos plėvelinio virimo tyrimas buvo paskutinė šios eksperimentinės analizės stadija. Buvo rastas panašus elgesio modelis į tą, kuris užfiksuotas trumpalaikiuose eksperimentuose su 70 mm ilgio plokšte, tik pirmuoju atveju šilumos perdavimo koeficientas buvo šiek tiek mažesnis.

Pastebėta, kad garo/skysčio sąlytis buvo labiau sutrikdytas trumpalaikiuose eksperimentuose, nei stabilios būsenos sąlygomis, galimai dėl trikdžių, kylančių iš išorinio srauto. Šilumos perdavimo koeficiento reikšmių skirtumas buvo didžiausias prie didelių vandens temperatūrų, kai garo plėvelė buvo storčiausia, o bet kokių išorinių veiksnių poveikis sąlyčiui būtų buvęs didžiausias. [30]

Skysčio/garo sąlyčio prigimties stebėjimai taip pat iš dalies paaiškina neatitikimus tarp eksperimentinių rezultatų ir prognozių iš teorinių modelių, kurie priėmė plokščią sąlytį. Kodas pateikia geriausius rezultatus, kai vandens temperatūra 85-90 °C: garo plėvelė šiomis sąlygomis buvo stabili, lyginant su didelės temperatūros atvejais, kai sąlytis buvo turbulentiškas. Labai turbulentiškas sąlytis gali sukelti garo greičio svyravimus, normalius bandiniui, taip sukuriant konvekciją ar turbulentišką difuziją garo plėvelėje ir kieto kūno - skysčio kontaktą, kas veda prie šilumos perdavimo iš kieto paviršiaus pagerinimo ir konvekcijos į skystį greičio padidėjimo. Bangelių skysčio/garo sąlytyje įtraukimas į modelį pagerintų kodo tikslumą prie žemų vandens peraušinimų.

### **1.5.8. Tyrimo išvados**

Plėvelinio virimo metu šilumos perdavimo koeficientai padidėjo ir šilumos srautai bei apskaičiuoti garo plėvelės storiai sumažėjo, mažėjant paviršiaus perkaitinimui, tai galioja visiems analizuotiems bandiniams. Šilumos perdavimo rezultatai buvo labai priklausomi nuo vandens temperatūros: vandens temperatūrai mažėjant, šilumos perdavimo koeficientas ir šilumos srautas padidėjo, o garo plėvelės storis sumažėjo.

Vandens greitis turėjo nedaug įtakos šilumos perdavimo rezultatams, galimai dėl to, kad naudotas greičio diapazonas buvo palyginti mažesnis, nei tikėtini garo plėvelės greičiai.

Maksimalus šilumos perdavimo koeficientas, minimalus šilumos srautas prieš pat garo plėvelės suirimą padidėjo, kai tuo tarpu vandens temperatūra mažėjo visų bandinių atvejais. Minimalus garo plėvelės storis buvo gana nepaveikus vandens temperatūros įtakos prasme. Buvo stebimi trys garo/skysčio sąlyčio modeliai: turbulentinis, banguojantis ir lygus. Konkretus sąlyčio tipas labai priklausė nuo bandinio perkaitinimo ir vandens temperatūros. Bandiniui atvėsus arba sumažinus vandens temperatūrą, sąlytis pasikeitė iš turbulentiško į banguojantį ir tada į lygų.

Apibrėžti trys garo plėvelės irimo mechanizmai, kurie didele dalimi priklausė nuo vandens temperatūros: sprogusis, sprogusis-progresyvusis ir progresyvusis. Antrasis mechanizmas iki šio tyrimo dar nebuvo pristatytas ar paaiškintas.

Išvystytas plėvelinio virimo ant plokštumos plokštelių teorinis modelis, kuris pateikė prognozes, kurios nuo eksperimentinių rezultatų apie vandens peraušinimą prie 10 K skiriasi 10 proc. Esant mažesniems peraušinimams, kai sutrikdomas skysčio/garo sąlytis, plokštumos sąlyčio prielaida vedė prie 30 proc. mažesnio šilumos perdavimo koeficiento.[30]

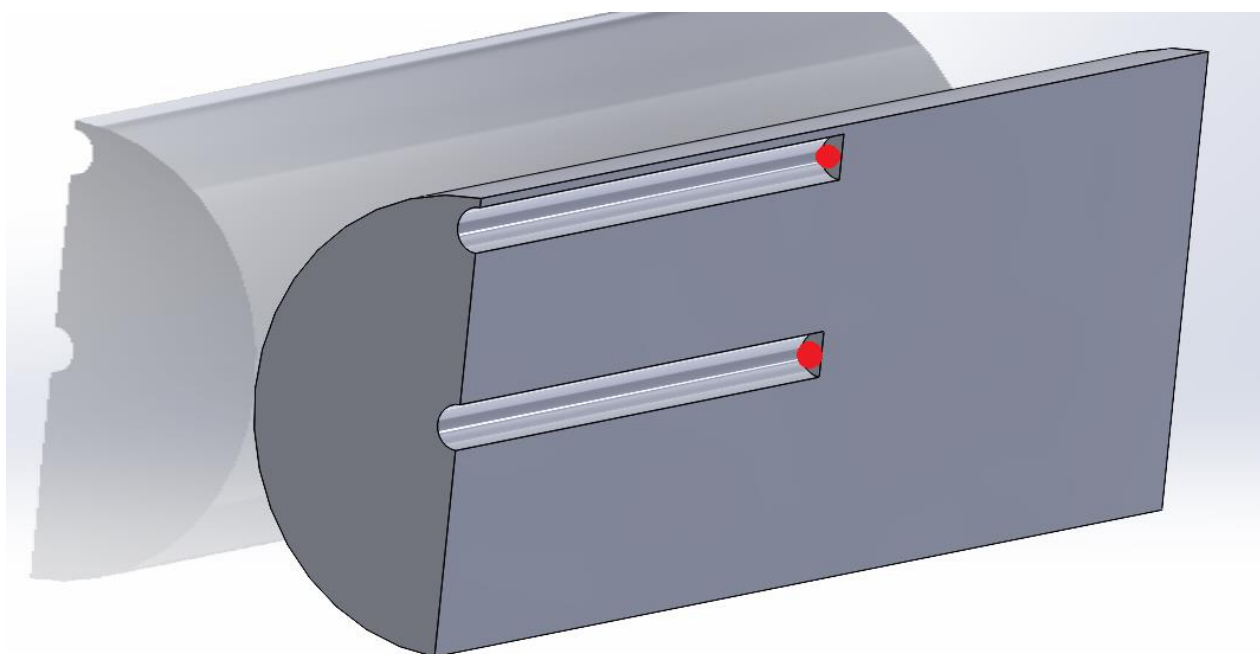


## 2. Eksperimentinis stendas ir tyrimo metodika

Šioje dalyje pateikiama eksperimento metodika, aprašomas eksperimentinis stendas, naudojama įranga, tiriamasis kūnas.

### 2.1. Eksperimentinė įranga ir darbo eiga

Eksperimento metu buvo stebima įkaitinto kūno temperatūros kitimas panardinant jį į vandenį. Tyrimo metu stebima kaip formuojasi skirtingi vandens virimo režimai, bei kokią įtaką šie režimai turi kūno temperatūrai. Eksperimentams atlikti buvo pasirinktas cilindrinis kūnas pagamintas iš plieno, kurio matmenys 25x80mm. Norint pamatuoti kaip kinta kūno temperatūra buvo įmontuotos dvi termoporos. Šiuo atveju pasirinkta K tipo termoporos kurių matavimo ribos yra nuo -200 iki 1200°C. Stengiantis kuo tiksliau suprasti vykstančius procesus ir išmatuoti temperatūras, viena iš termoporų pragrežus bandinį, įmontuota pačiame centre ir užsandarinta, kad į skylę nepatektų vandens. Sekantis matavimo taškas yra metalo paviršius, kadangi kūnas yra kaitinamas iki aukštos, 500-750°C temperatūros, buvo sunku rasti termoporą, kurios laidų izoliacinė medžiaga atlaikytų pakartotinius kaitinimus ir sąlyčius su vandeniu nesuirusi. Taip pat, laikant termoporą kūno išorėje galimos didelės paklaidos, kadangi bus matuojama ne tik įkaitusio metalo paviršius, bet ir garo plėvelės temperatūra. Todėl nuspręsta, kad šis matavimo taškas taip pat bus metalinio kūno viduje, taip išvengiant tiesioginio kontakto su liepsna ar kaitinimo elementu ir tiesioginio kontakto su vandeniu ar vandens garais. Išgręžta dar viena 2,5x40mm skylė matavimams, tačiau prie pat metalo paviršiaus, stengiantis išlaikyti kuo plonesnį metalo sluoksnį skiriantį termoporą ir išorinį kūno paviršių. Gautas apie 1mm sienelės storis tarp paviršiaus ir matavimo taško. Skylės matavimams ir matavimo taškai pavaizduoti 2.1 pav.



2.1pav. Temperatūros matavimo taškai

Prieš pradėdant eksperimentą, metalo paviršius nutekintas ir nušlifuotas, taip sumažinant paviršiaus nelygumus kurie gali įtakoti vandens virimą bei plėvelės susidarymą 2.2 pav.



**2.2pav.** Nušlifuotas metalo paviršius pašalinant nelygumus

Taip pat, prie ruošinio buvo pritvirtintas metalinis 8mm skersmens strypas. Nors šiuo strypu yra prarandamas dalis šilumos ir gaunamos minimalios matavimo paklaidos, tačiau be jo būtų sudėtinga atlikti eksperimentą, laikyti įkaitusį metalą. Tolimesniuose eksperimentuose ruošinys bus tobulinamas siekiant gauti tikslesnius ir tolygesnius rezultatus. Metalinis cilindras pilnai paruoštas bandymams pavaizduotas 2.3 pav. Pagrindiniai fiziniai kūno parametrai surašyti 2.1 lentelėje.



**2.3 pav.** Pilnai paruoštas cilindras eksperimentams

**2.1 lentelė.** Plieninio cilindro fizikiniai duomenys

Kūno masė, kg	Savitoji šiluma $c_p$ , J/(kgK)	Tankis $\rho$ , kg/m <sup>3</sup>	Medžiagos šilumos laidumo koeficientas $\lambda$ , W/(mK)	Thermal diffusivity, mm <sup>2</sup> /s
0,308	460	7850	50	11.72

Kadangi šiame eksperimente matuojama temperatūra K tipo termoporumis, kurios temperatūros pokyčiai paverčia į elektros signalą, reikalingas prietaisas galintis šį signalą apdoroti ir pateikti temperatūros vienetais. Bandymo metu buvo naudojamas „PICO TC-08 Thermocouple Data Logger“ duomenų kaupiklis galintis realiu laiku atvaizduoti vėstančio kūno temperatūros pokyčius ir perduoti informaciją į kompiuterį 2.4 pav. Pagrindiniai įrenginio parametrai pateikiami 2.2 lentelėje.



**2.4 pav.** Duomenų kaupiklis „PICO TC-08 Thermocouple Data Logger“

**2.2 lentelė.** Pagrindiniai „PICO TC-08 Thermocouple Data Logger“ parametrai

Įvesties kanalų skaičius	8
Konvertavimo laiko	100 ms vienam termoporos kanalui
Temperatūros matavimo tikslumas	±0,2%
Skiriamoji geba	20 bit
Palaikomieji termoporų tipai	B, E, J, K, N, R, S, T

Atliekant tokio tipo eksperimentus, taip pat, labai svarbu vaizdinė medžiaga. Tai padeda lengviau atskirti vandens virimo ant kūno paviršiaus režimus, jų pasikeitimą, susidariusios garo plėvelės storį. Tam buvo naudojama greitaieigė vaizdo kamera „PHANTOM V711“, kuri leidžia sulėtintai peržiūrėti nufilmuotą medžiagą ir įvertinti bandymus.

## 2.2. Darbo eiga

Prieš pradėdant tyrimą, pirmiausia reikia išsitikinti ar visa matavimo ir bandymo stebėjimo įranga veikia ir yra taisyklingai sujungta su naudojamais prietaisais. Cilindrinis kūnas, kuriame įmontuotos termoporos įdedamas į elektrinę kaitinimo krosnį arba yra kaitinamas litavimo lempa ant tiesioginės liepsnos. Siekiant gauti tolygesnį metalo išilimą buvo naudojama kaitinimo krosnis, kurios vidaus temperatūra 1000 laipsnių. Kūno šilimas stebimas termoporų pagalba ir kaitinamas tol, kol vidinė bei metalo paviršiaus temperatūra pasiekia reikiama temperatūrą. Laukiant kol bandinys įkais, į cilindro formos skaidrų indą pripilama distiliuoto vandens, įjungiamas kaitinimo elementas ir vanduo šildomas iki 99 laipsnių temperatūros. Tai atliekama tam, kad įkaitintas kūnas ilgiau išlaikytų savo šilumą ir virimo procesas tęstųsi ilgiau. Pastovi 99°C vandens temperatūra palaikoma specialiu prietaisu, kuris matuodamas skysčio temperatūrą reguliuoja kaitinimo elemento darbą. Cilindrinio indo charakteristikos pateiktos 2.3 lentelėje. Distiliuotas vanduo naudojamas, nes jame nėra druskų ir kitų priemaišų, kurios gali įtakoti vandens virimo temperatūrą ir skaidrumą, taip pat, išvengiant kalkių susidarymo ant metalo paviršiaus.

### 2.3 lentelė Cilindrinio indo duomenys

Išorinis skersmuo diš, m	Vidinis skersmuo dvid, m	Sienelės storis, m	Aukštis, m
0,122	0,0116	0,003	0,276

Įkaitinus cilindrą iki reikiamos temperatūros, jis ištraukiamas iš krosnies ir pilnai panardinamas į indą su 99°C vandeniu, įjungiamą vaizdo kamera. Kūnas nardinamas taip, kad vaizdo kameros objektyvas fokusuotų visą kūną ir jo paviršių. Reikiama kameros ir cilindro padėtis gauta atliekant pakartotinius bandymus ir matavimus. Eksperimento filmavimas pavaizduotas 2.5pav. Kad eksperimento metu vykstantys procesai būtų geriau matomi visas vandens indas yra apšviečiamas.



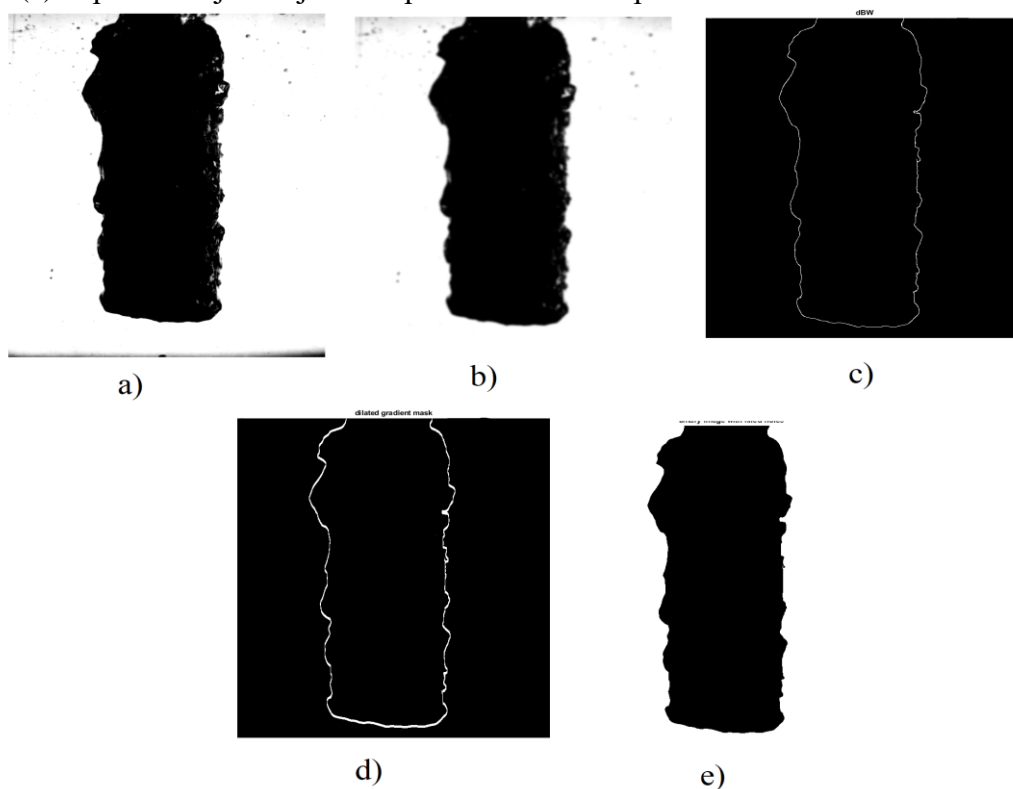
2.5pav. Eksperimento filmavimas

Bandymo metu stebima, kaip keičiasi kūno temperatūra abiejuose matavimo taškuose, vandens virimo fazės, plėvelės susidarymas, bei pereinamieji procesai tarp fazių. Termoporų parodymai įrašomi 1 sekundės intervalu. Viso eksperimento metu skaitiniai, temperatūros pokyčiai bei virimo fazių vaizdinė medžiaga kaupiama kompiuteryje. Bandymas ir informacijos kaupimas nutraukiamas tik tada, kai tiriamojo kūno ir vandens temperatūra susivienodina, nebepastebimi virimo procesai. Bandymas atliekamas kaitinant kūną iki 500; 550; 600; 650; 700; 750°C. Kiekvienas bandymas pakartojamas 3 kartus. Siekiant gauti tolygius rezultatus, visų eksperimentų eigoje buvo naudojama ta pati įranga bei darbo metodika.

### 2.3. Garo plėvelės ploto apskaičiavimo metodika

Susidariusio garo ploto nustatymui panaudojama programa, kuri buvo sukurta vandens lašo faziniams virsmams ištirti.

Faziniams virsmams ištirti svarbus jo geometrinio parametro kitimo nustatymas. Šiuo tikslu sukurta programa atpažįstanti ir analizuojant optinį vaizdą ir nustatanti cilindrinio kūno su garo plėvele kitimą kiekviename vaizdo kadre. Kaip tokios programos veikimo principo pavyzdys pateiktas vandens lašo uždaviniui spręsti sukurta programa. Gautas skerspjūvio plotas perskaičiuojamas į ekvivalentinį skersmenį. 2.6pav. parodytas MatLAB aplinkoje sukurtos programos vaizdų analizės principas. Pirmiausiai neapdorotas vaizdas (a) nuskaitomas programos, tuomet panaudojant Gauso filtrus vaizdas apdorojamas, siekiant sumažinti pilkos spalvos ribos atpažinimo paklaidą (b), po filtravimo gaunamas juodai baltas vaizdas (c), kuriame balta linija žymimas, šiuo atveju, garo plėvelės kraštas. Panaudojant atkūrimo programą sujungiamos baltos linijos į vientisą liniją, kuri žymi visą vandens garo plėvelės perimetrą (d). Vaizdas invertuojamas iš juodo į baltą užpildant garo užimamą plotą juoda spalva (e). Apskaičiuojamas juodos spalvos užimamas plotas.



2.6pav. MatLab programoje sukurtas ploto apskaičiavimo principas

Naudojantis šios programos skaičiavimo principais, sudaryta programa, kurios pagalba nustatysime susidariusios garo plėvelės skersmenį. Gautus duomenis grafiškai apipavidalinsime ir palyginsime su duomenimis, gautais matuojant kūno temperatūrinį pokytį, ko pasėkoje galėsime tiksliau nustatyti visų vandens virimo režimų intervalus.

#### 2.4. Rezultatų analizės metodika

Šiame skyriuje apžvelgiama skaičiavimo metodika, naudojama ieškant atiduodamo šilumos srauto nuo kūno paviršiaus.

Atliekant eksperimentą buvo priimtos prielaidos, kad 8mm strypas pritvirtintas prie tiriamojo kūno neturį įtakos vykstantiems procesams.

Šilumos srautas, praleidžiamas per kūną, yra lygus šilumos srautui, kurį kūnas atiduoda aplinkai. Auštančio kūno paviršiaus atiduodamas šilumos srautas, W:

$$Q = c_k \times m_k \times \sum (\Delta T_k / \tau)$$

Q – šilumos srautas (W),

$c_k$  – savitoji kūno šiluma (J/kg-K),

$m_k$  – kūno masė (kg),

$\Delta T_k$  – kūno temperatūros skirtumas (°C),

$\tau$  – matavimo laikas (s).

Kūno temperatūros skirtumas (°C) apskaičiuojamas pagal du duomenų kaupiklio rodmenis, kur  $T_k^k$  yra aukštesnė kūno temperatūra, o  $T_k^s$  – mažesnė kūno temperatūra:

$$\Delta T_k = T_k^k - T_k^s.$$

Laiko skirtumas (s) apskaičiuojamas pagal du duomenų kaupiklio rodmenis, kur  $\tau_s$  yra matavimo laikas, kai kūno temperatūra  $T_k^s$ , o  $\tau_k$  – matavimo laikas, kai kūno temperatūra  $T_k^k$ :

$$\Delta \tau = \frac{\tau_s - \tau_k}{1000}.$$

Nuo kūno paviršiaus aplinkai pernešamas šilumos srautas (per garo plėvelę, jei ji tuo metu yra), W:

$$Q_2 = \alpha \times A \times \sum (\Delta T_V).$$

Aplinkos ir kūno paviršiaus temperatūros skirtumas, °C:

$$\Delta T_V = T_k^k - T_{vand}^*.$$

Galima parašyti šią balanso lygtį:

$$Q_1 = Q_2 \text{ arba } c_k \times m_k \times \sum (\Delta T_k / \Delta \tau) = \alpha \times A \times \sum (\Delta T_V).$$

Cilindrinio kūno masė, kg:

$$m_k = \rho_k \times V_k.$$

Kūno tūris, m<sup>3</sup>:

$$V_k = \pi r^2 h.$$

Kūno paviršiaus plotas, m<sup>2</sup>:

$$A = 2\pi r(r + h).$$

Šilumos srautas, pernešamas nuo auštančio kūno paviršiaus, W/m<sup>2</sup>:

$$q = \frac{c_k \times m_k \times \Delta T_k / \Delta \tau}{A}.$$

$\lambda$  – medžiagos šilumos laidumo koeficientas, W/mK;

$T_c$  – kūno centro temperatūra, °C;

$T_p$  – kūno paviršiaus temperatūra, °C.

Plėvelės storis -  $R_p - R_c$

$R_p$  – cilindro spindulys kartu su plėvele,

$R_c$  – cilindro spindulys

Taip pat, apskaičiavus plėvelės stori galima apskaičiuoti ir plėvelės plotą bei tūrį, pasinaudojus cilindrinio kūno tūrio ir paviršiaus ploto formulėmis.

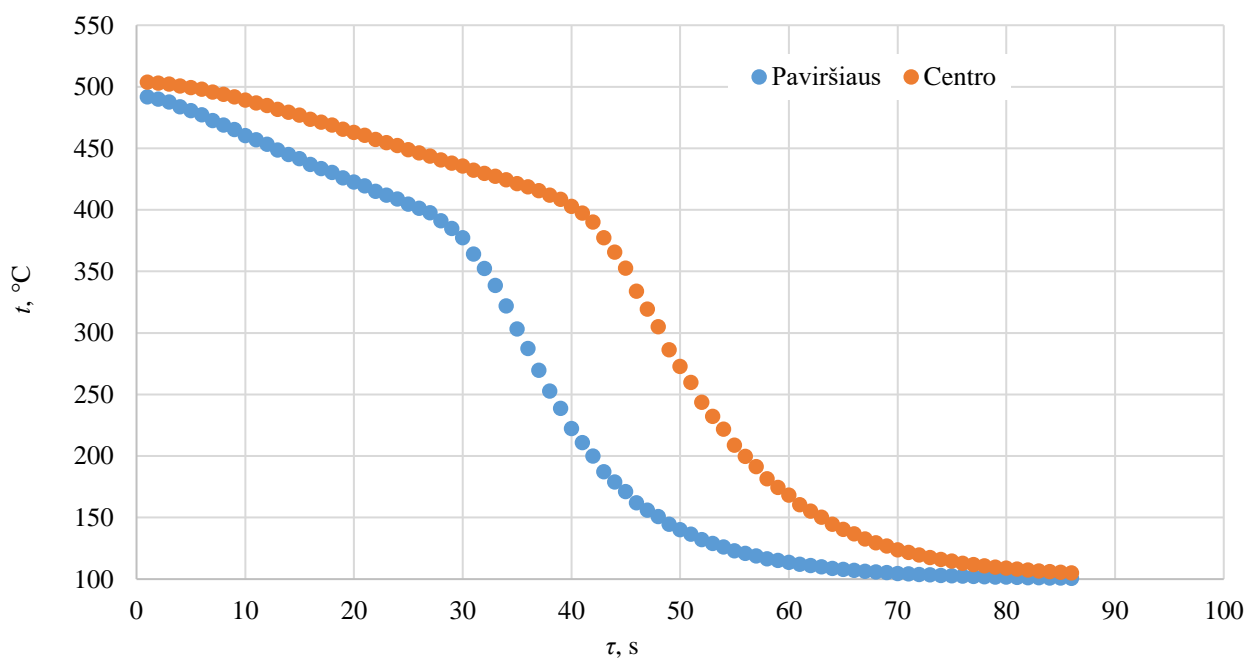
Pagal aprašytąją metodiką atliktų eksperimento bandymų tyrimų rezultatai pateikiami 3 skyriuje.



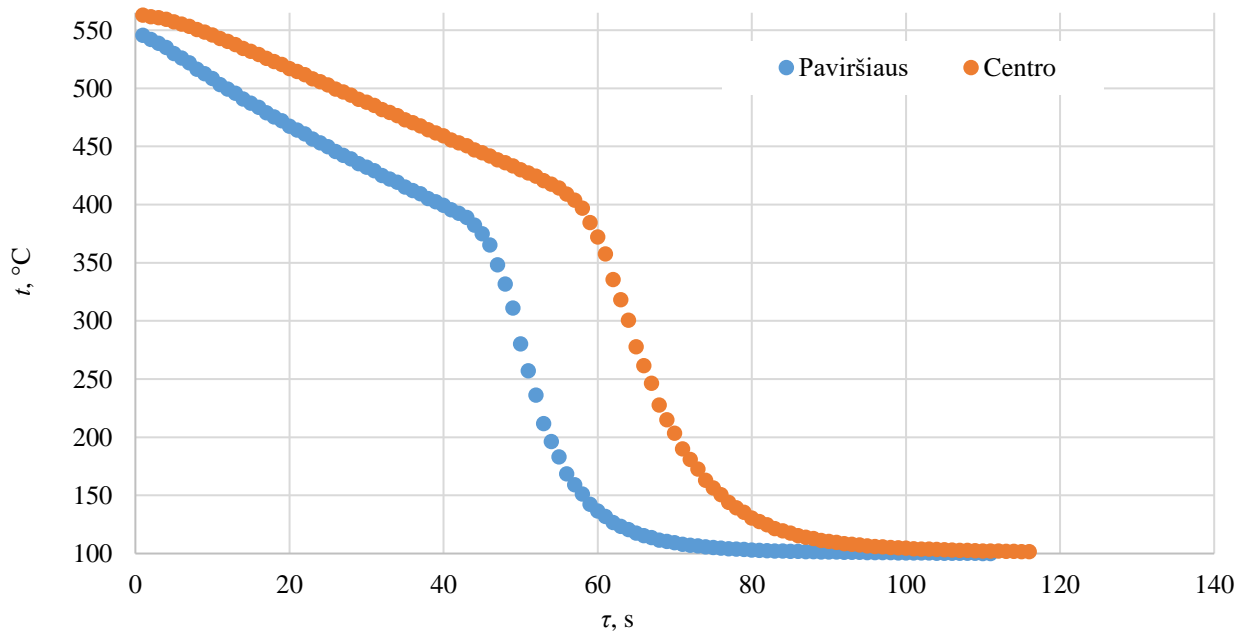
### 3. Eksperimentinių tyrimų rezultatai

#### 3.1. Temperatūros kitimo laike rezultatai

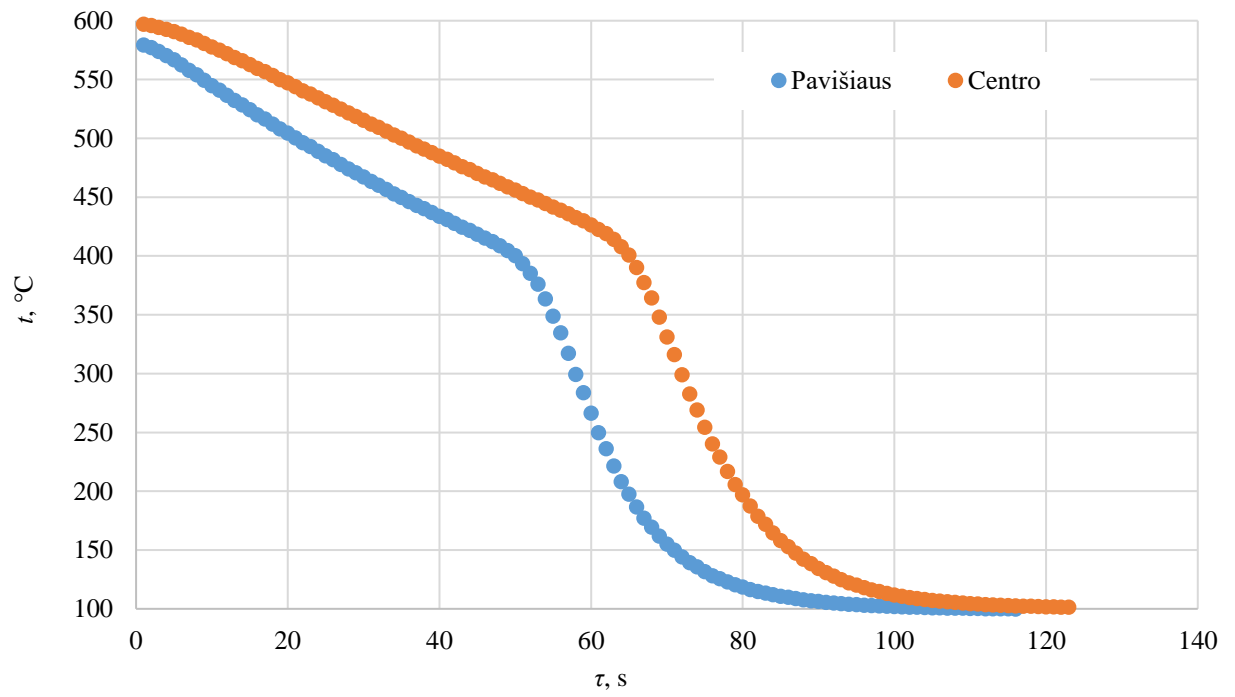
Šioje dalyje pateikiami tyrimo rezultatai, kurie gauti atliekant bandymus ir stebint kaip kinta kūno vidinė bei išorinė temperatūra. Aprašomi visų bandymo rezultatai, kai kūnas kaitinamas iki 500, 550, 600, 650, 700 ir 750 laipsnių temperatūros ir panardinamas į vandenį kurio pradinė temperatūra 99°C.



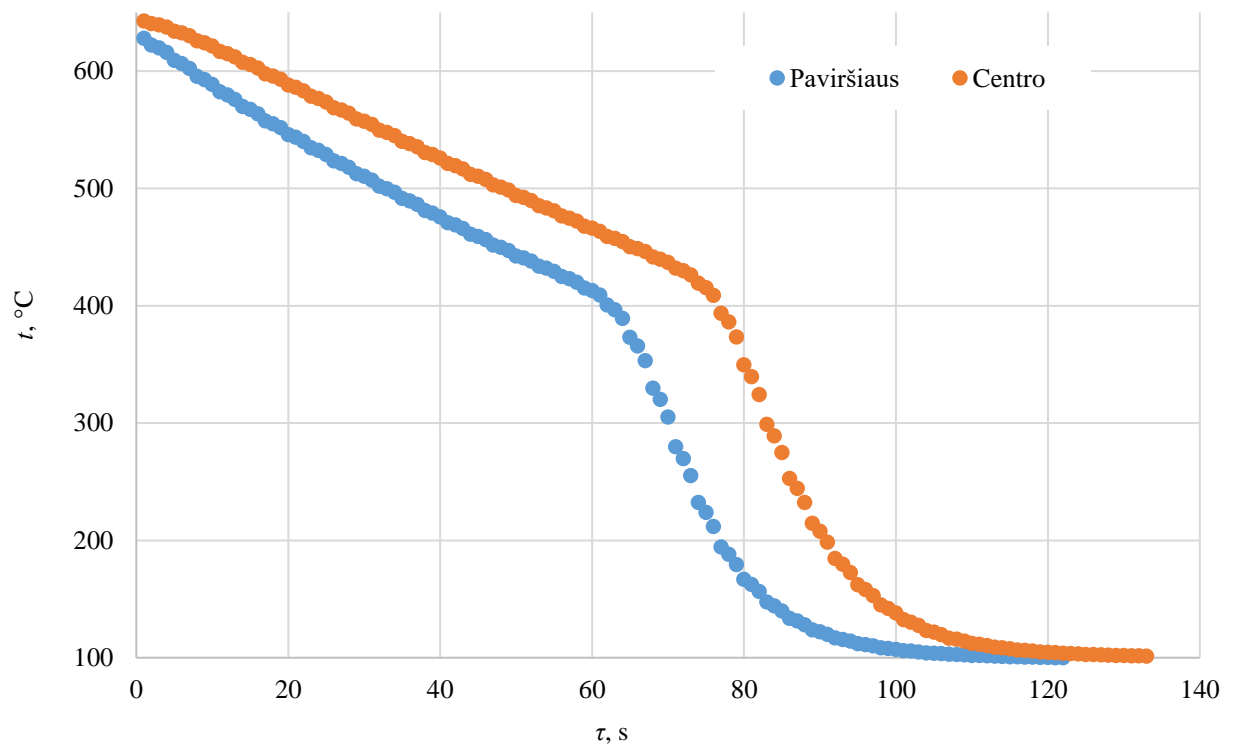
3.1pav. Kūno temperatūros kitimas kai pradinė temperatūra 500°C



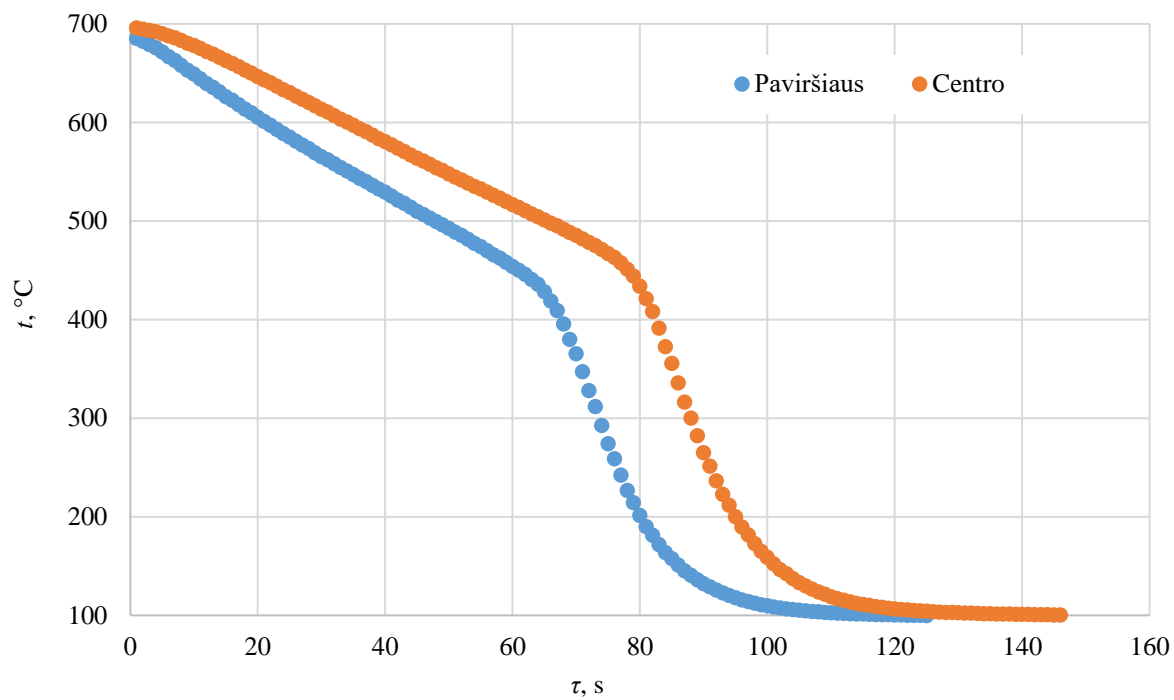
3.2pav. Kūno temperatūros kitimas kai pradinė temperatūra 550°C



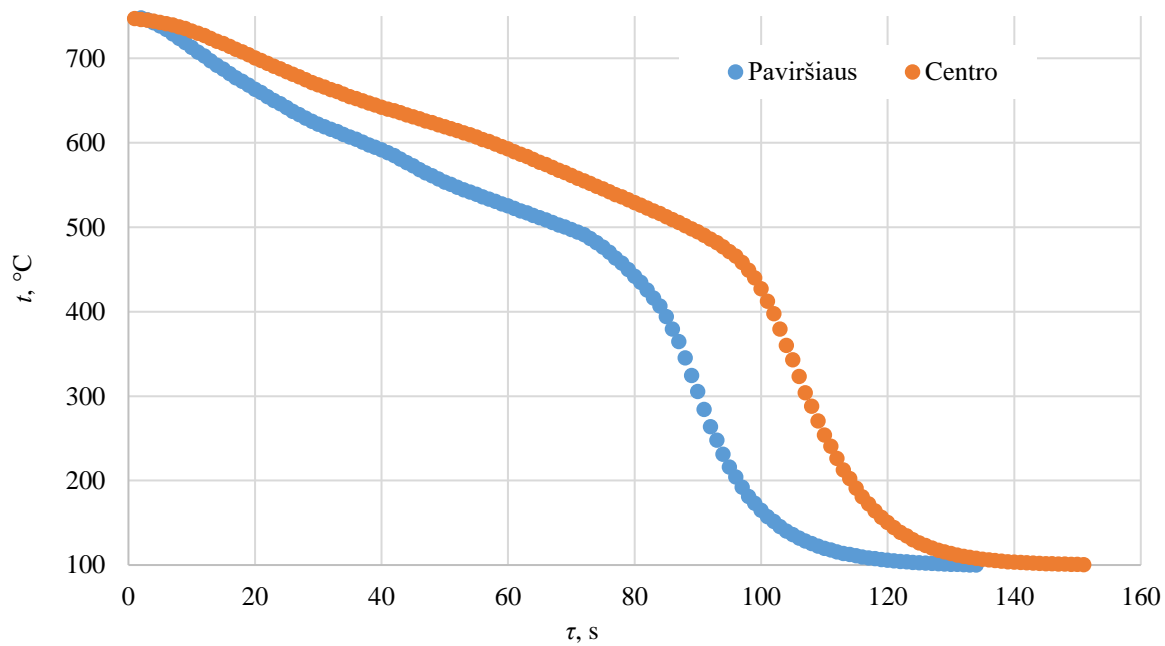
3.3pav. Kūno temperatūros kitimas kai pradinė temperatūra 600°C



3.4pav. Kūno temperatūros kitimas kai pradinė temperatūra 650°C



**3.5pav.** Kūno temperatūros kitimas kai pradinė temperatūra 700°C



**3.6pav.** Kūno temperatūros kitimas kai pradinė temperatūra 750°C

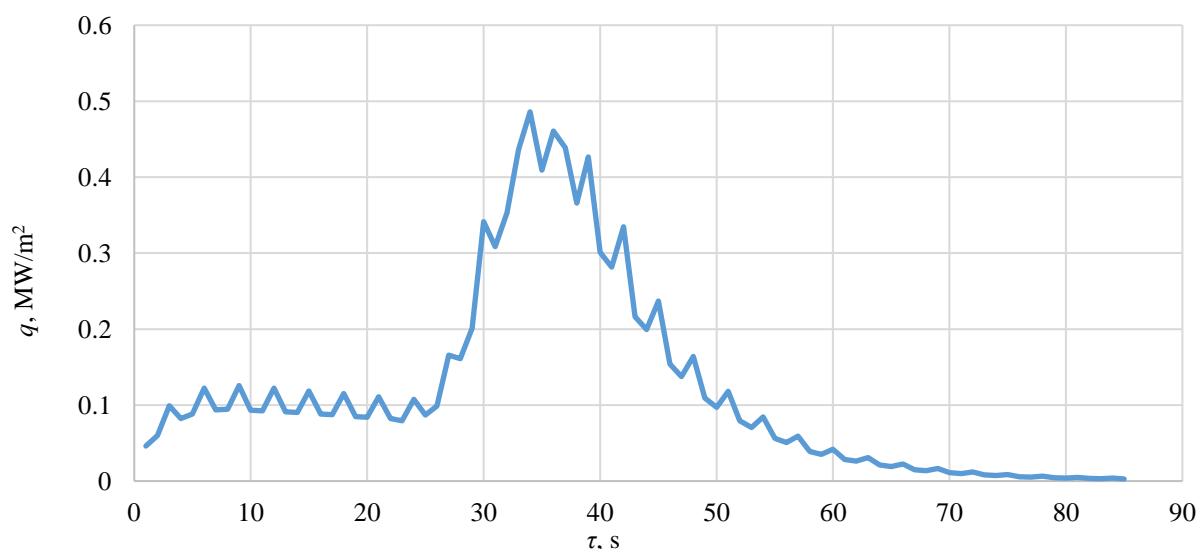
Pateiktuose 3.1 – 3.6 pav. grafikuose matome, kaip vyksta įkaitinto kūno aušimas vandenyje. Remiantis šiais grafikais, galima nustatyti, kiek laiko vyko plėvelinis virimas, kada buvo pasiektas pereinamasis ir burbulinis režimai. Kai kūnas įkaitintas iki 500°C ir vandens pradinė temperatūra yra 99°C, matome, kad plėvelinis virimas trunka apie 30 s, kol pasiekama 360°C kūno paviršiaus temperatūra. Šį procesą galima atpažinti iš tolygaus temperatūros mažėjimo kūno paviršiuje bei centre. Po tolygaus temperatūros kitimo, matomas staigus kritimas, kūno paviršiaus temperatūra nukrenta žemiau minimalios temperatūros reikalingos palaikyti plėvelinį virimą, pasiekama Leidenfrosto riba. Pereinama prie burbulinio virimo, kuris atpažįstamas iš staigaus kūno temperatūros kritimo ir tęsiasi apie 20 s. Galiausiai kūnas atvėsta iki ~150°C, pasiekama riba, kai intensyvus burbulinis virimas silpnėja, kūno temperatūra artėja prie vandens temperatūros. Visas virimo procesas nuo 500°C įkaitinto kūno iki 99°C trunka 85 s.

Tokius pačius temperatūrų ir virimo pokyčius matome ir kitų bandymų rezultatuose, tačiau skiriasi virimo režimų laikas. Kai kūnas įkaitintas iki 550°C, plėvelinis virimas trunka apie 45 s, Leidenfrosto riba yra ties 365°C. Burbulinis virimas trunka 16 s. Kūnui esant 600°C pradinės temperatūros, plėvelė ant jo paviršiaus išsilaiko apie 53 s. Minimali temperatūra palaikyti plėvelinį virimą yra ~365°C. Burbulinis virimas tęsiasi apie 18 s. Cilindrą įkaitinus iki 650°C, plėvelinis virimas tęsiasi 64 sekundes, plėvelė subliūkšta kūno paviršiu pasiekus ~370°C, burbulinio virimo režimas trunka ~20 s. Kai kūnas įkaitintas iki 700°C, ant kūno paviršiaus susiformavusi plėvelė subliūkšta po 68 sekundžių nuo bandymo pradžios, pasiekus 380°C, burbulinis virimas tęsiasi apie 21 s. Kaitinant kūną iki didžiausios, 750°C temperatūros, plėvelinis virimas trunka ilgiausiai, apie 84 s, Leidenfrosto riba 380°C, burbulinis virimas užima apie 20 s viso bandymo laiko.

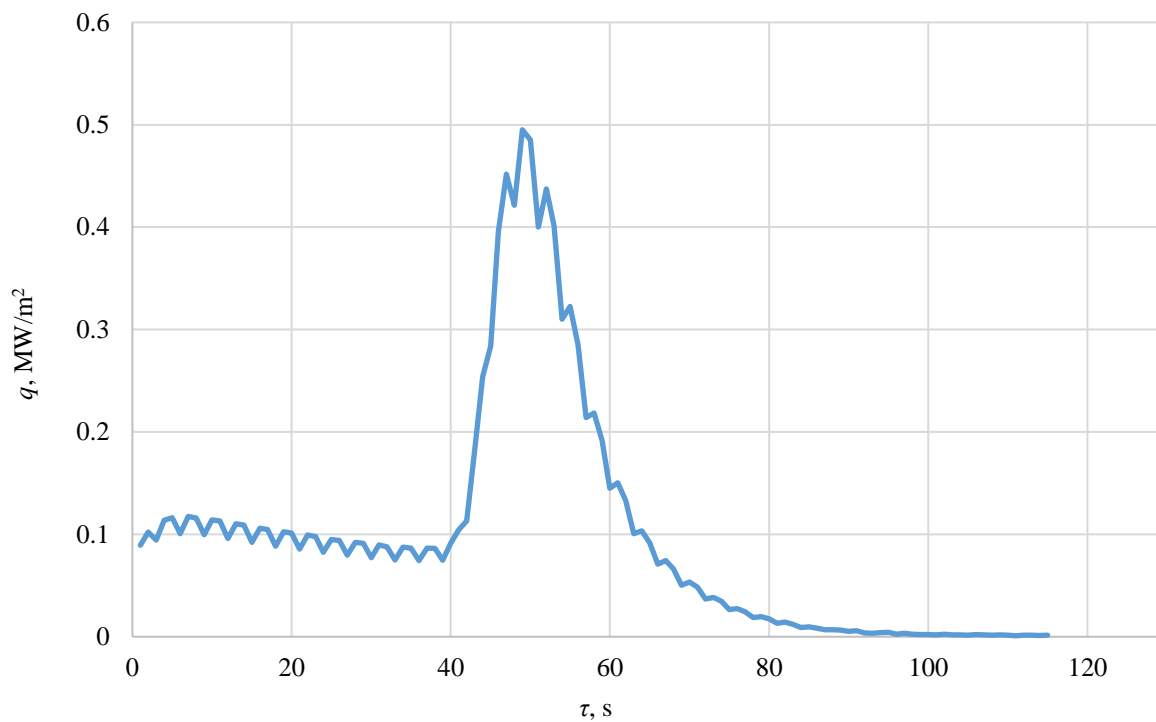
Remiantis gautais rezultatais, matome, kad didėjanti pradinė kūno temperatūra didžiausią įtaką turi plėveliniui virimui. Visų bandymų metu mažiausia temperatūra, reikalinga palaikyti plėvelinį virimą išliko panaši, 360-380°C, taip pat, nesikeitė ir burbulinio virimo laikas, kuris vidutiniškai yra apie 20 s.

### 3.2. Šilumos perdavimo srautas

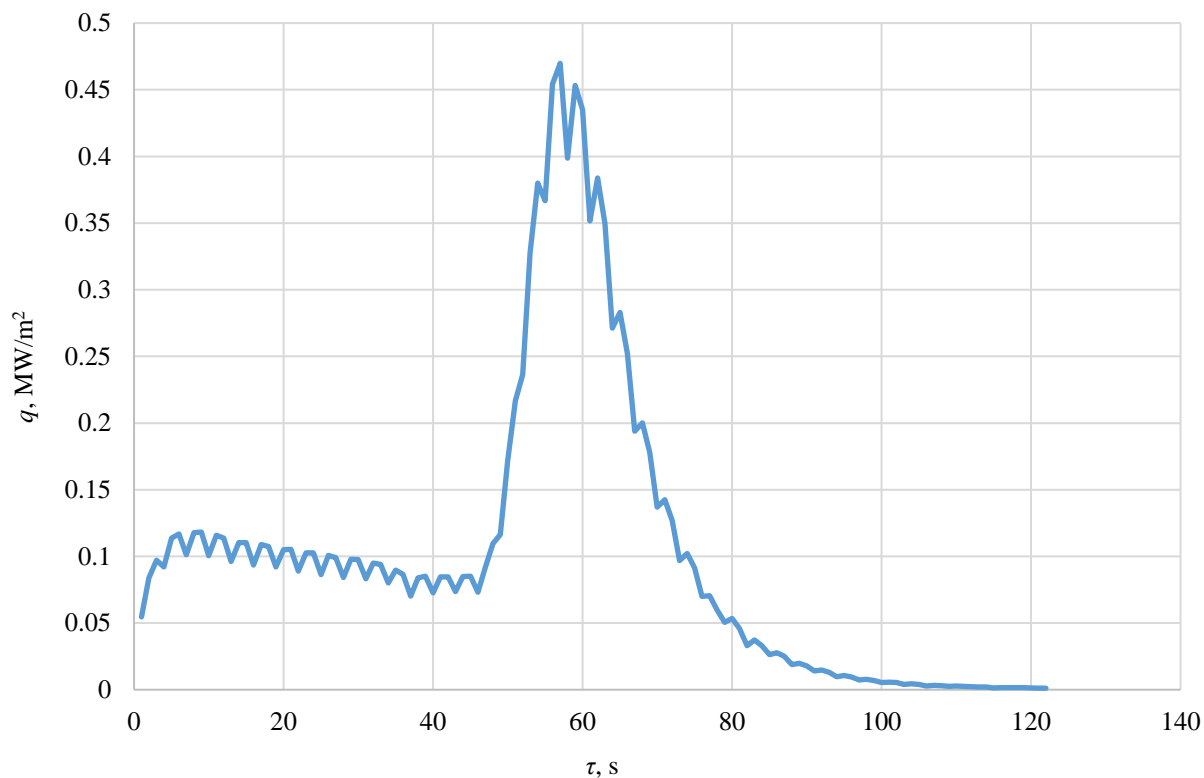
Šioje dalyje aprašomi rezultatai, gauti apskaičiuavus šilumos perdavimo srautą laike ir jo priklausomybę nuo kūno temperatūros. Rezultatai pateikiami grafiškai.



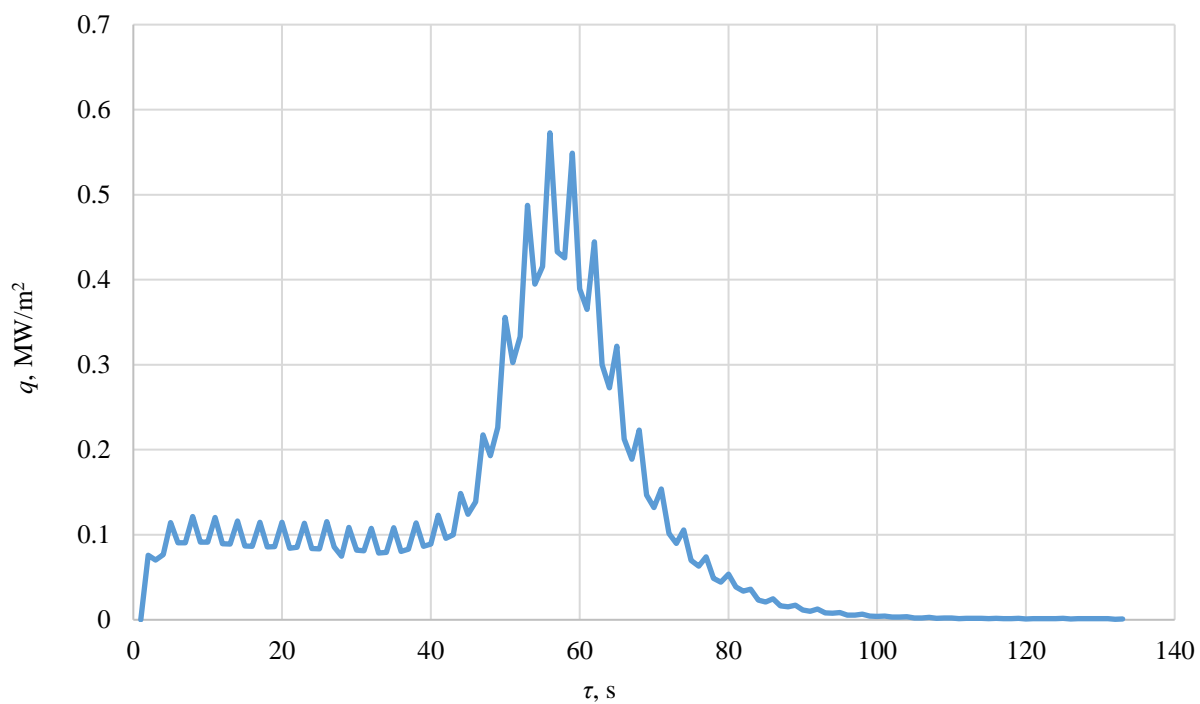
3.7 pav. Šilumos perdavimo srautas laike, kai kūno temperatūra 500°C



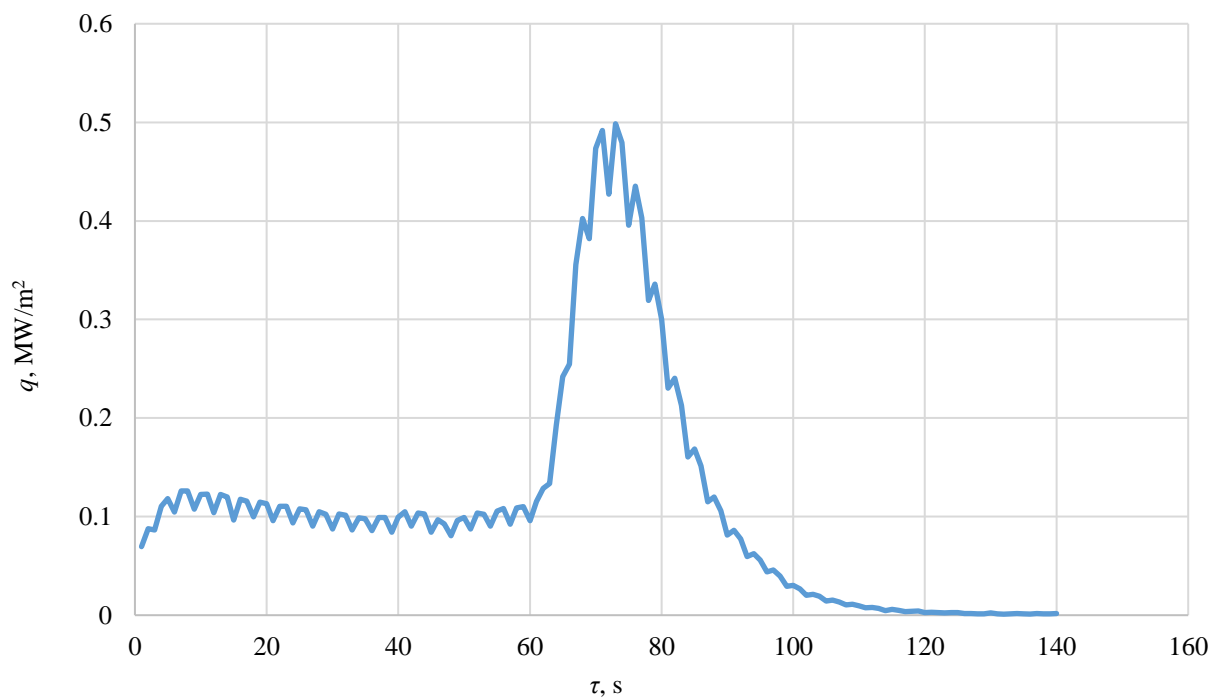
**3.8pav.** Šilumos perdavimo srautas laike, kai kūno temperatūra 550°C



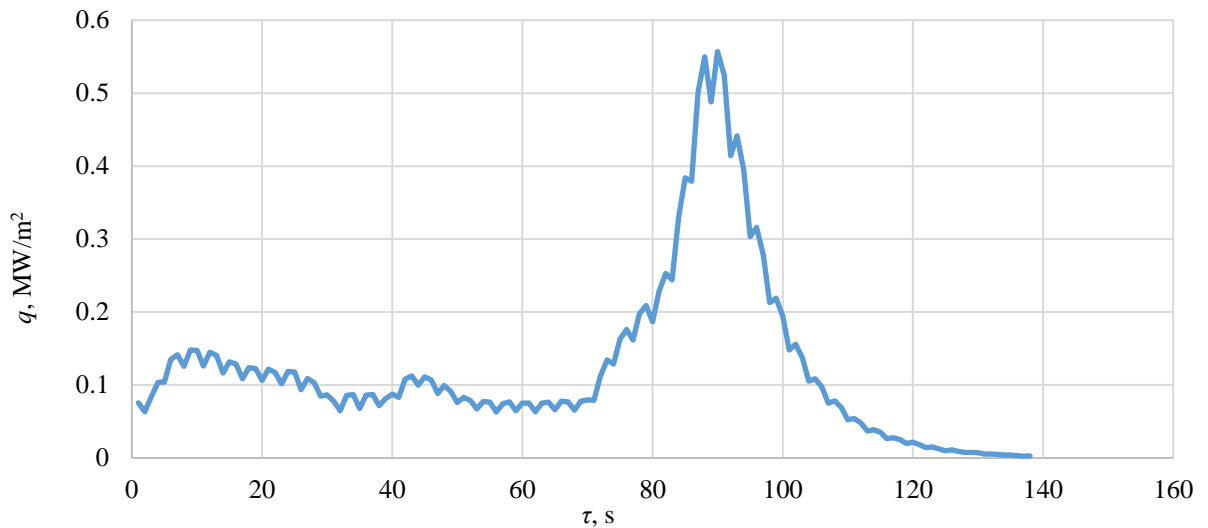
**3.9pav.** Šilumos perdavimo srautas laike, kai kūno temperatūra 600°C



**3.10pav.** Šilumos perdavimo srautas laike, kai kūno temperatūra 650°C



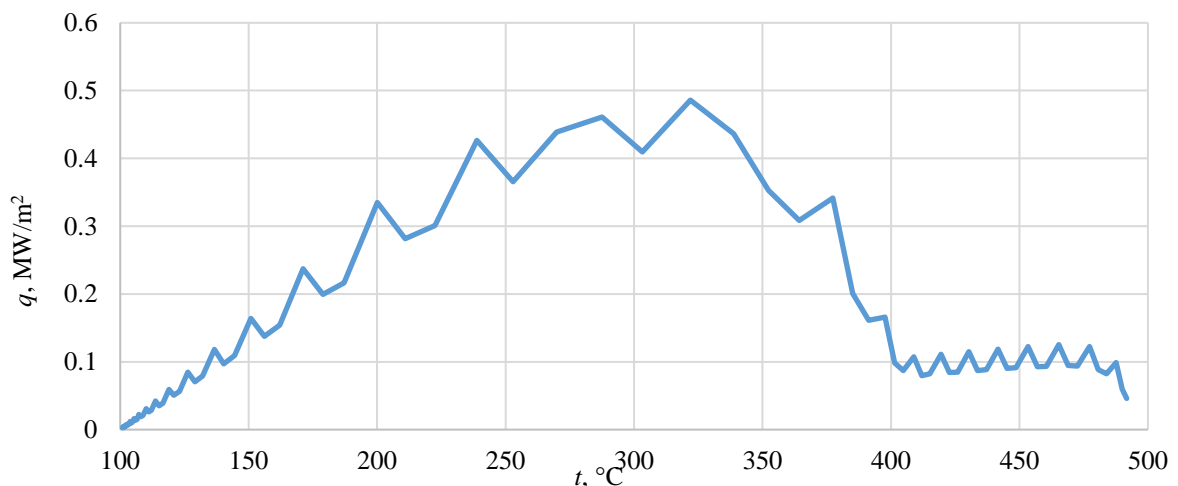
**3.11pav.** Šilumos perdavimo srautas laike, kai kūno temperatūra 700°C



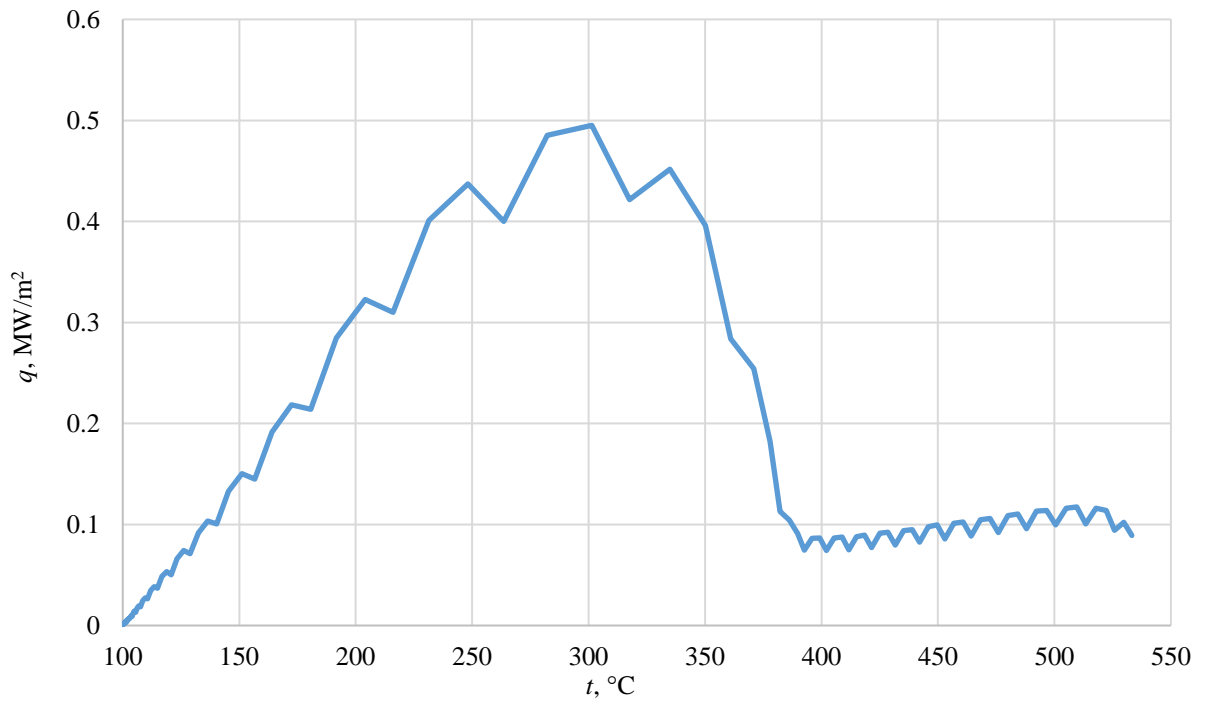
**3.12pav.** Šilumos perdavimo srautas laike, kai kūno temperatūra 750°C

Paveiksluose 3.7 – 3.12pav. Pateikti šilumos srauto perdavimo iš įkaitinto kūno į vandenį rezultatai. Matome, kad plėvelinio virimo metu, šilumos perdavimo srautas yra nedidelis ir svyruoja nuo 0,06 iki 0,12 MW/m<sup>2</sup>. Tai vyksta dėl to, kad plėvelinio virimo metu įkaitintą paviršių dengia plona garo plėvelė, kuri vandeniui neleidžia tiesiogiai sąveikauti su kūno paviršiumi. Toks svyravimas matomas visuose bandymuose, prie skirtingų temperatūrų esant plėveliniam virimui. Nuo plėvelinio virimo trukmės tiesiogiai priklauso ir laiko tarpas, kurio metu atiduodamas pastovus, tačiau sąlyginai mažas šilumos srautas. Laikas svyruoja maždaug nuo 30 s esant 500°C (žr. 3.7pav) iki 85 s esant 750°C (žr. 3.12pav.)

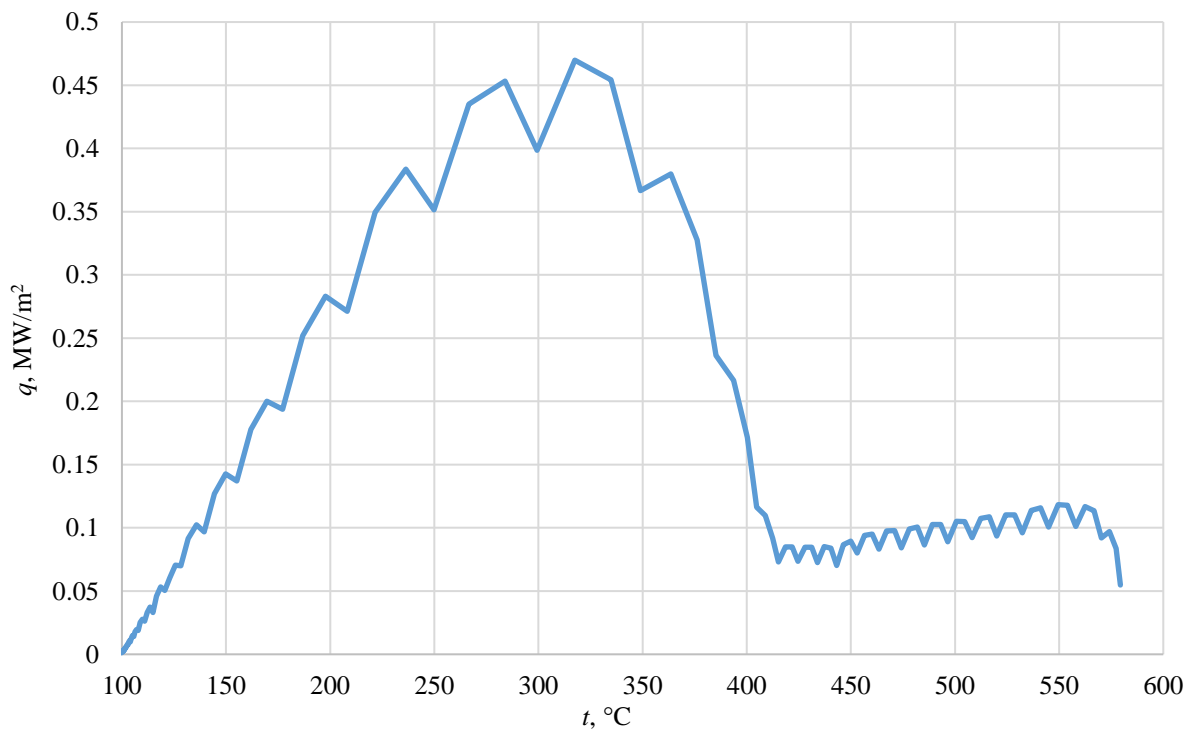
Subliūškus plėvelei ir perėjus prie burbulinio virimo, matomas labai staigus šilumos srauto padidėjimas. Nuo pastovaus 0,06 - 0,12 MW/m<sup>2</sup> iki 0,4 – 0,57 MW/m<sup>2</sup>. Toks šuolis įvyksta dėl to, kad burbulinio virimo metu vanduo pilnai aušina visą kūno paviršių, susidaro dideli garo burbulai, kamščiai, vyksta didžiausias šilumos atidavimas į skystį. Tačiau, šis intensyvaus šilumos atidavimo procesas vyksta daug trumpiau nei esant plėveliniam virimui, apie 20 – 25s. Kūnui vėstant, tolygiai mažėja ir šilumos mainai, kol galiausiai pasiekia temperatūra artima skysčio temperatūrai ir šilumos mainai nebevyksta,  $q=0$ .



**3.13pav.** Šilumos perdavimo srauto priklausomybė nuo kūno temperatūros, kai pradinė temperatūra 500°C

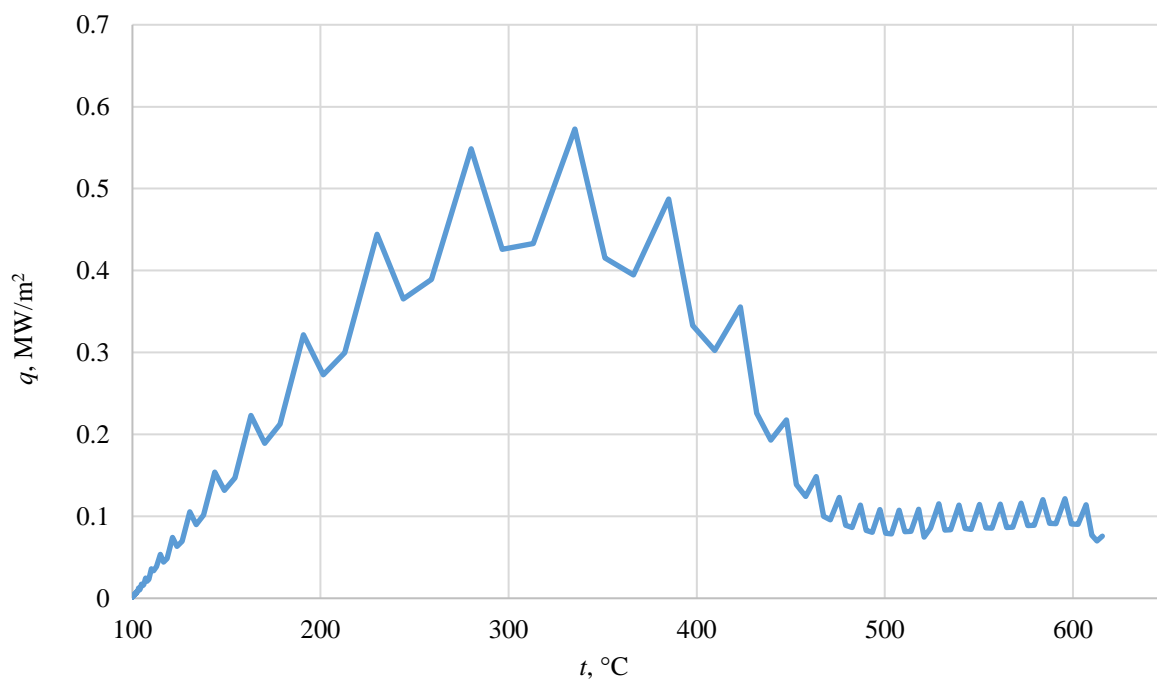


**3.14 pav.** Šilumos perdavimo srauto priklausomybė nuo kūno temperatūros, kai pradinė temperatūra 550°C

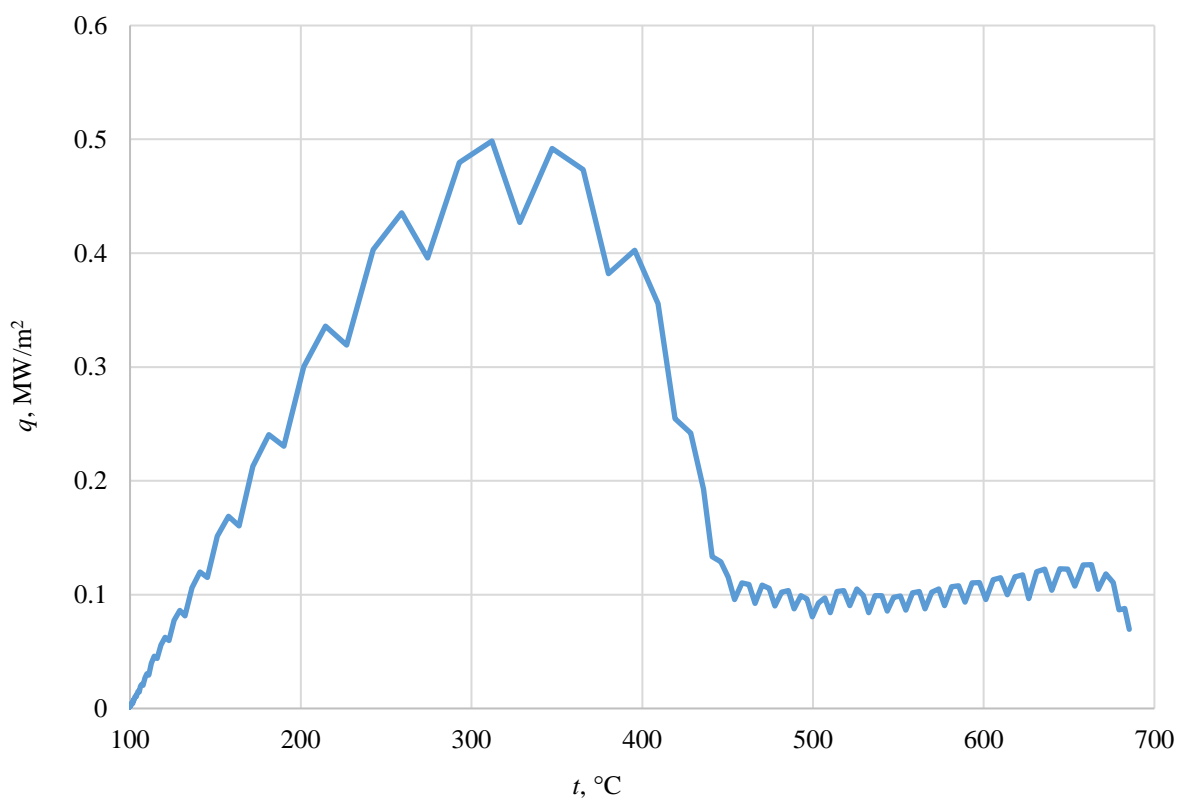


**3.15 pav.** Šilumos perdavimo srauto priklausomybė nuo kūno temperatūros, kai pradinė temperatūra 600°C

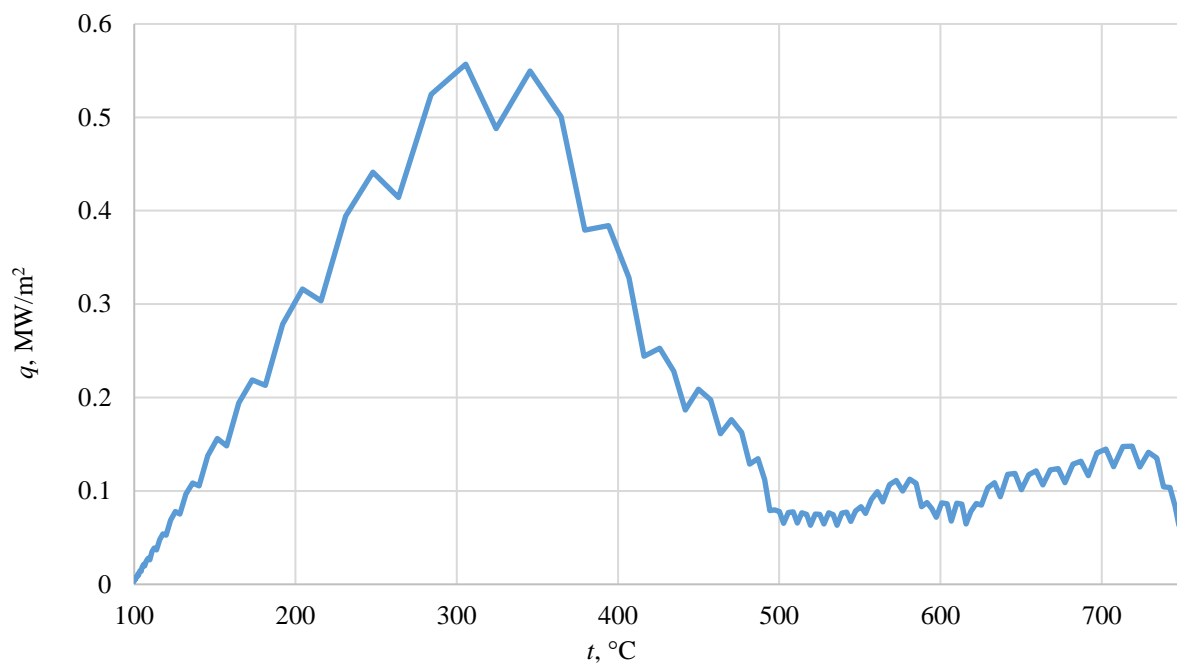




**3.16 pav.** Šilumos perdavimo srauto priklausomybė nuo kūno temperatūros, kai pradinė temperatūra 650°C



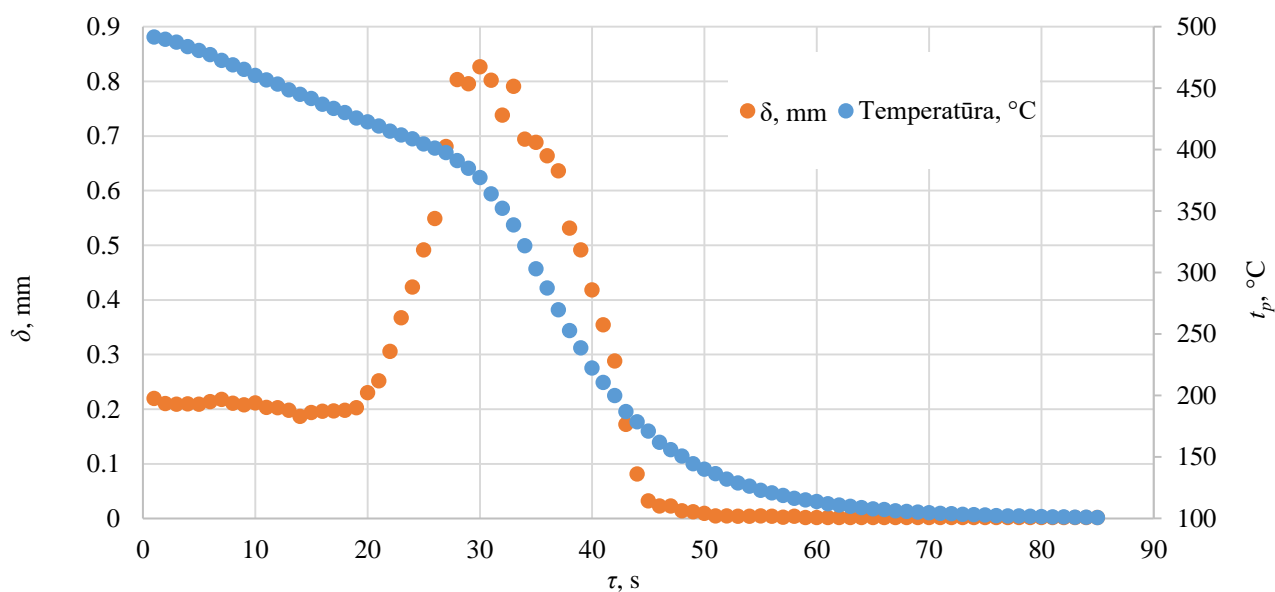
**3.17 pav.** Šilumos perdavimo srauto priklausomybė nuo kūno temperatūros, kai pradinė temperatūra 700°C



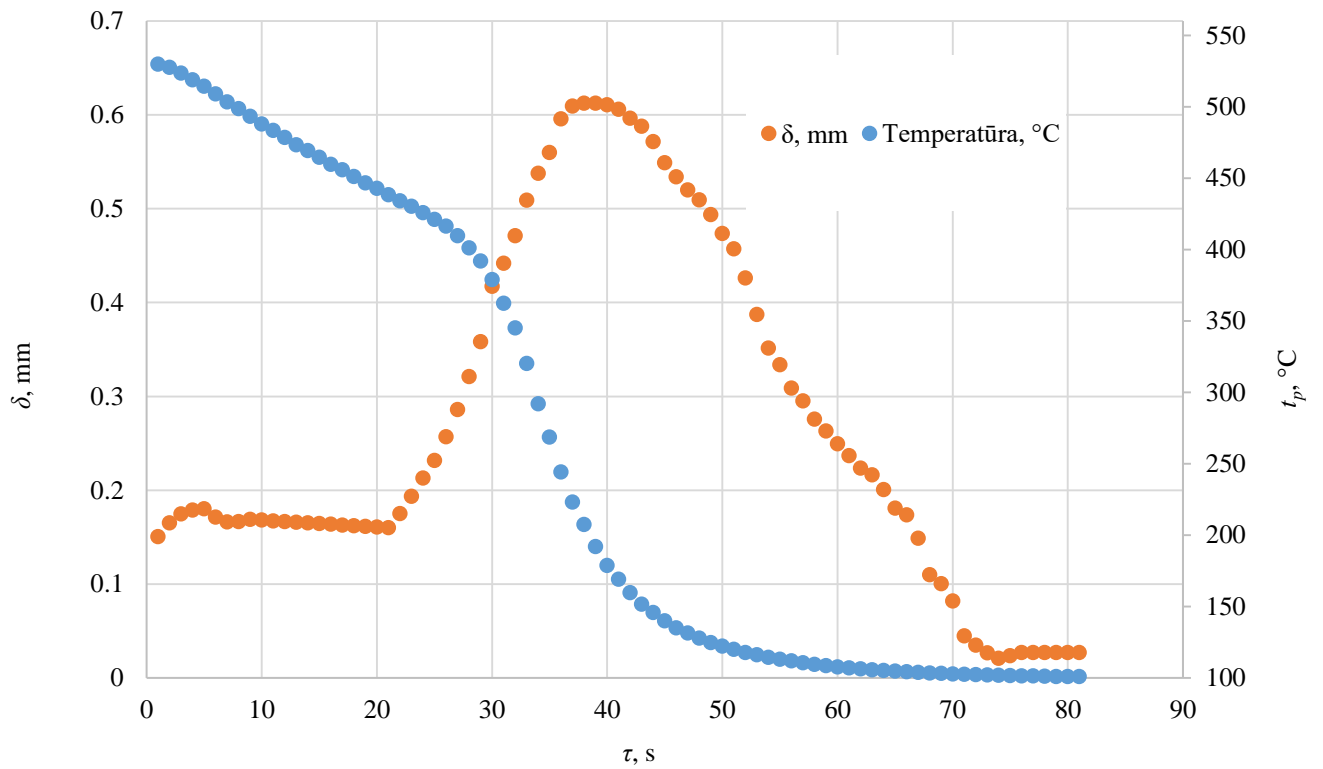
**3.18pav.** Šilumos perdavimo srauto priklausomybė nuo kūno temperatūros, kai pradinė temperatūra 750°C

Aukščiau pateiktuose grafikuose 3.13 – 3.18pav. pavaizduotas šilumos mainų srauto priklausomybė nuo kūno temperatūros. Matoma tokia pati kitimo tendencija, kaip ir prieš tai aptartuose šilumos srauto pokyčio laike rezultatuose, žr. 3.7 - 3.12pav. Vykstant plėveliniam virimui šilumos srautas kinta nežymiai, laikosi apie 0,1 MW/m<sup>2</sup>. Plėvelei suirus, pastebimas staigus mainų padidėjimas, siekiantis iki 0,57 MW/m<sup>2</sup>, vykstant burbuliniam virimui prie pradinės 650°C kūno temperatūros (žr. 3.16pav.). Kūnui vėstant, šilumos perdavimo srautas tiesiškai mažėja, kol priartėjama prie vandens temperatūros ir pasiekiamas nulinis šilumos perdavimo srautas iš kūno į skystį.

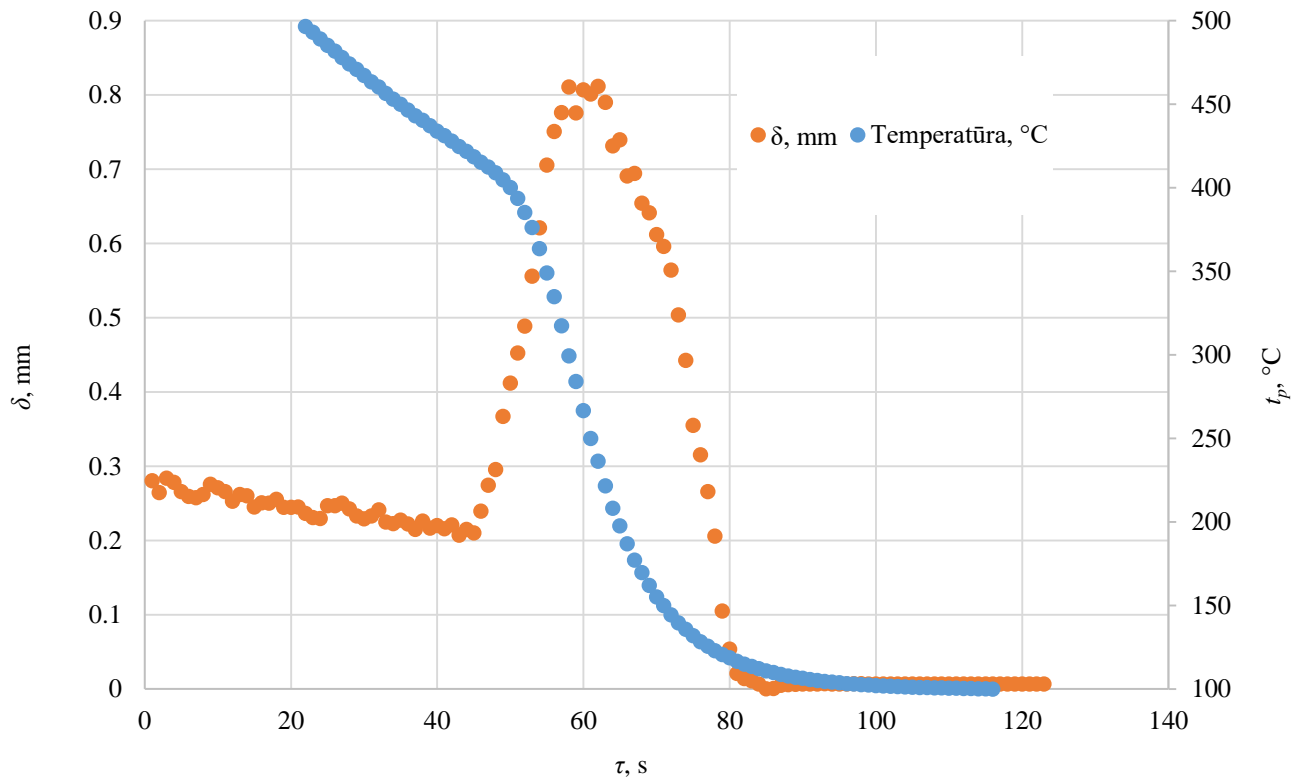
### 3.3. Garo plėvelės storis kūno paviršiuje



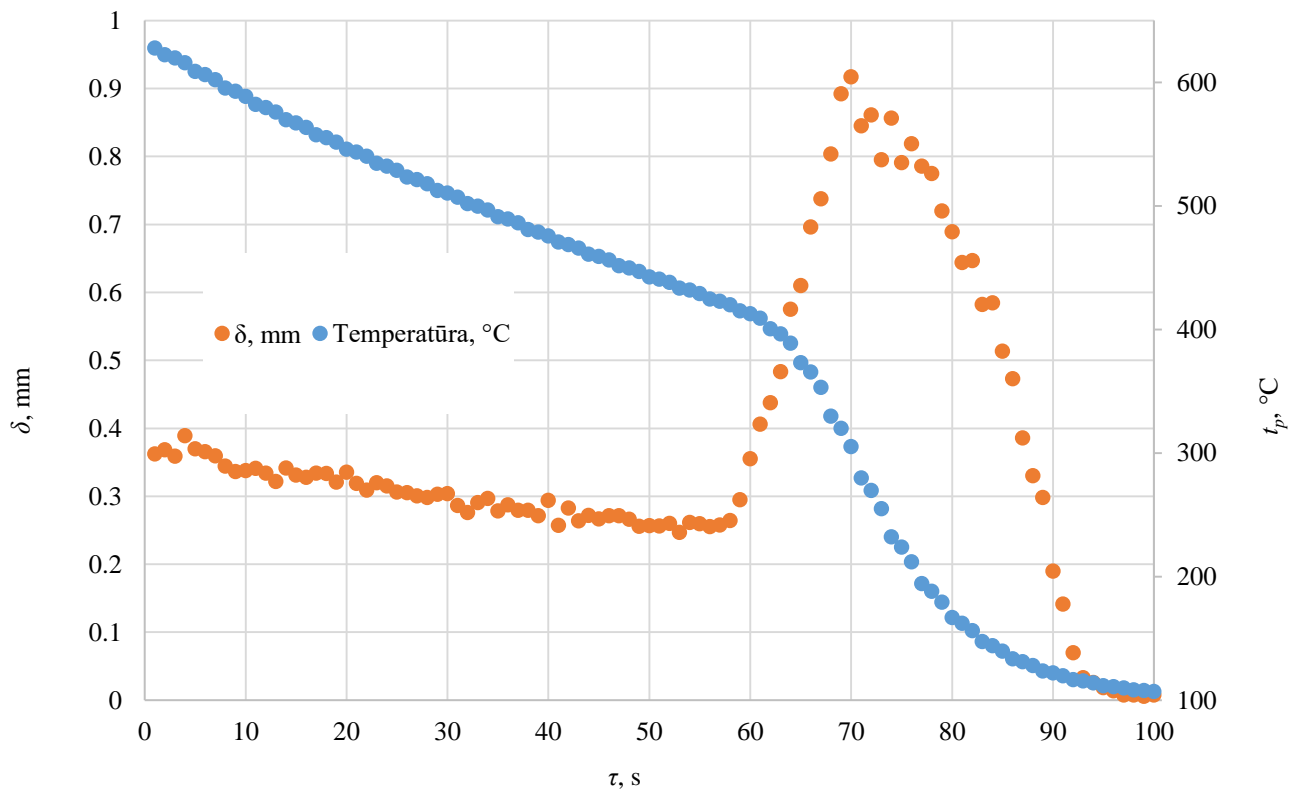
**3.19pav.** Garo plėvelės storis kūno paviršiuje kai pradinė kūno temperatūra 500°C



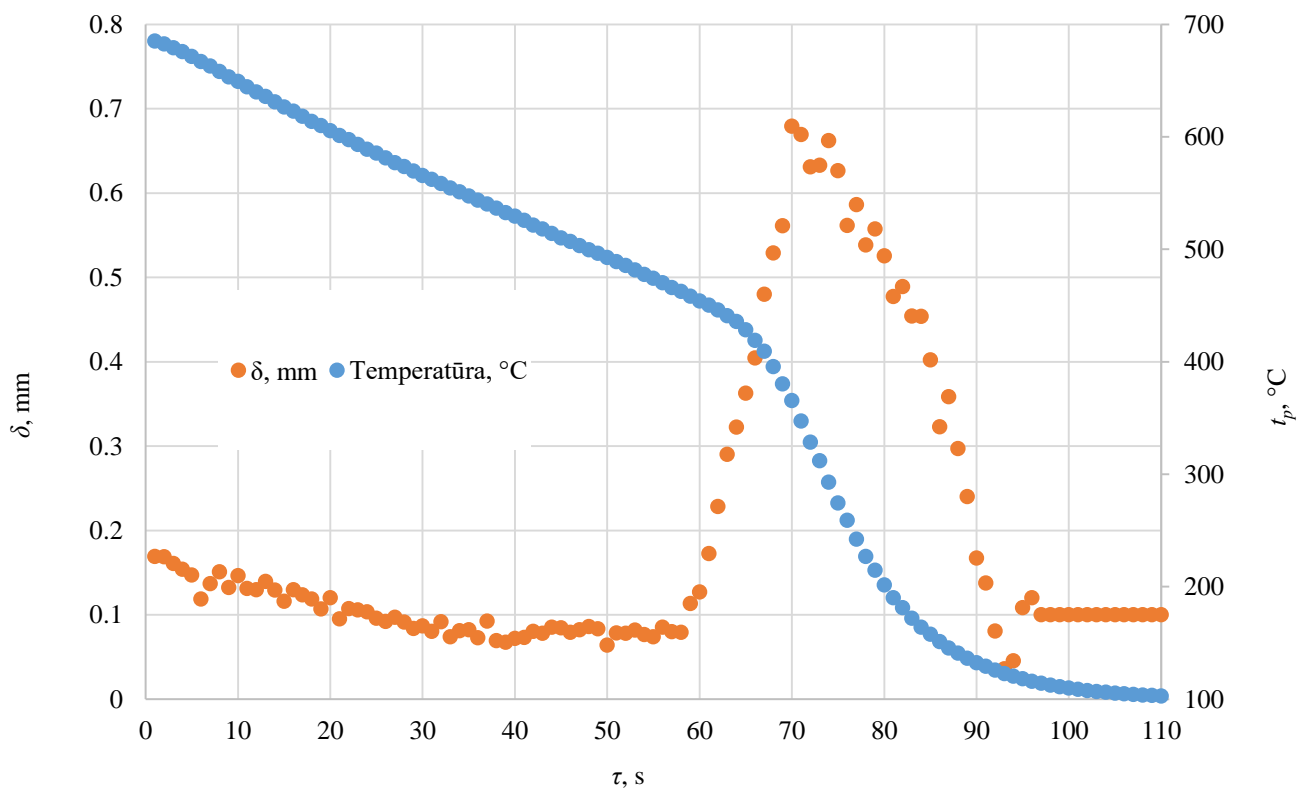
**3.20pav.** Garo plēvelēs storsis kūno paviršiuje kai pradinė kūno temperatūra 550°C



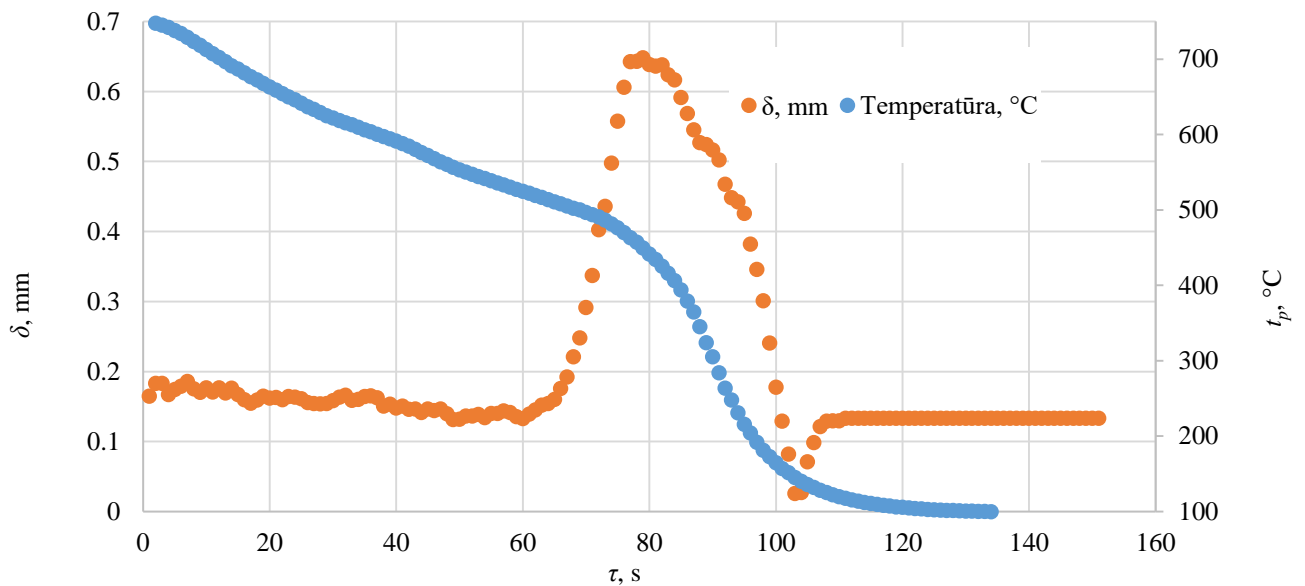
**3.21pav.** Garo plēvelēs storsis kūno paviršiuje kai pradinė kūno temperatūra 600°C



3.22pav. Garo plēvelēs storsis kūno paviršiuje kai pradinė kūno temperatūra 650°C

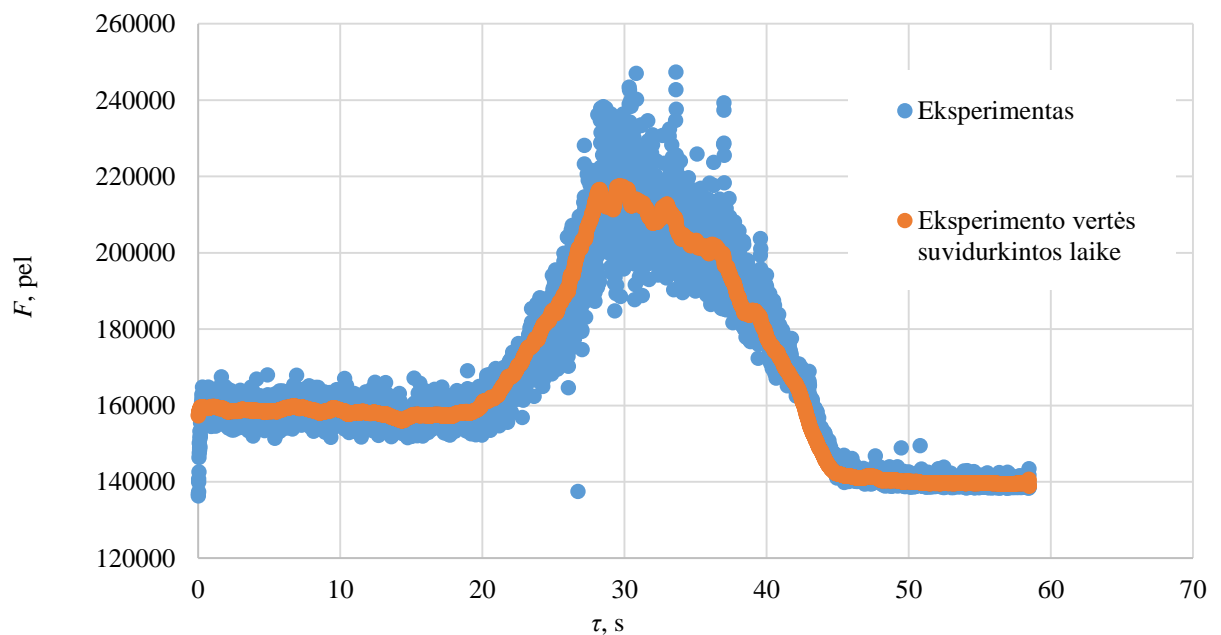


3.23pav. Garo plēvelēs storsis kūno paviršiuje kai pradinė kūno temperatūra 700°C



**3.24pav.** Garo plėvelės storis kūno paviršiuje kai pradinė kūno temperatūra 750°C

Pateiktuose 3.19-3.24pav. grafikuose matome plėvelės storį, įkaitinto kūno paviršiuje, jam auštant. Rezultatai gauti nagrinėjant vaizdinę eksperimento medžiagą, apskaičiuojant plėvelės parametrus. Pateikiama MatLAB programos koduotė (žr. 3.26pav), kurios pagalba apskaičiuotas garo plėvelės plotas, iš kurio apskaičiuotas vidutinis plėvelės storis, gaubiantis kūno paviršį. Programos veikimo principas aprašytas 2.3 darbo dalyje. Naudojantis MatLAB programa, apskaičiuojamas garo plėvelės plotas vienos sekundės intervalu, eksperimentiškai gauti duomenys esant 500°C pradinei kūno temperatūrai pateikiami 3.25pav. Kaip matome 3.25pav. eksperimento metu gautos vertės stipriai svyruoja laike dėl nuolatos kintančio plėvelės storio, ypač burbulinio virimo metu. Norint gauti tikslesnius rezultatus, eksperimentinės vertės suvidurkintos laike. Tokia pati vidutinių reikšmių metodika taikoma visiems rezultatais. Paveiksluose 3.19-3.24pav. pateiktos jau suvidurkintos vertės.



**3.25pav.** Eksperimento metu gauti plėvelės storio rezultatai

```

format long g
pic=imread('C:\Users\Linas\Desktop\Be pleves\Img000003(2).tif');
figure,imshow(pic);
pic=imcrop(pic,[0 0 800 800]);
pic = imgaussfilt(pic,11);
figure,imshow(pic);
[~,threshold]=graythresh(pic);
fudgeFactor=0.2;
BWsl=edge(pic,'prewitt',threshold*fudgeFactor);
BWsl2=edge(pic,'canny',threshold*fudgeFactor);
BWs=BWsl+BWsl2;
BWs = bwareaopen(BWs, 100);
figure, imshow(BWs), title('dBW');
se90=strel('line',3,100);
se0=strel('line',3,1);
seD=strel('disk',1);
BWsdil=imdilate(BWs, [se0 se90]);
figure, imshow(BWsdil), title('dilated gradient mask');
BWdfill=imfill(BWsdil,26);
figure, imshow(BWdfill), title('binary image with filled holes');
%BWnboard=imclearborder(BWdfill,1);
%figure, imshow(BWnboard), title('cleared border image');
[m,n]=size(pic);
S=bwarea(BWdfill);
Sd=(m*n)-S
D=2*sqrt(Sd/pi)*1.36/224.5

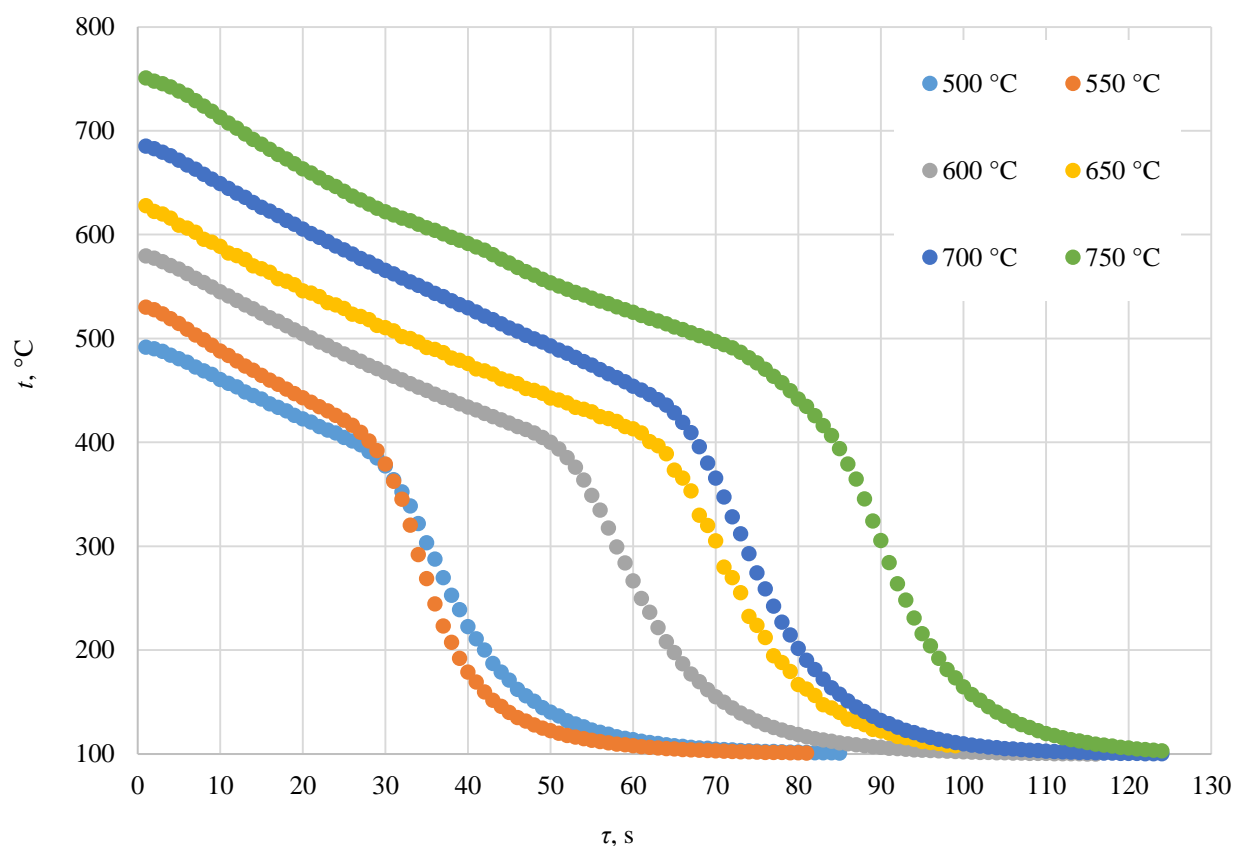
```

### 3.26pav. MatLAB plėvelės ploto apskaičiavimo koduotė

Remiantis 3.19-3.24pav. rezultatais matome, kad įkaitintą kūną panardinus į 99°C jis iškart yra apgaubiamas garo plėvelės, prasideda plėvelinis virimas. Tai geriausiai parodo ganėtinais stabilus ir mažai kintantis plėvelės storis, kuris priklausomai nuo pradinės kūno temperatūros išsilaiko nuo 20 s įkaitintam kūnui iki 500°C ir iki 65 sekundžių, kai kūno temperatūra 750°C. Grafike pavaizduoti susidariusio garo plėvelės skersmens staigūs padidėjimai parodo, kada baigiasi plėvelinis virimas ir pereinamas prie pereinamojo ir burbulinio virimo režimų. Tarp skirtingų pradinių kūno temperatūrų pastebėtas ir garo plėvelės storio skirtumas. Iš gautų suvidurkintų reikšmių matome, kad prie 500°C pradinės temperatūros garo plėvelės storis plėvelinio virimo metu svyruoja nuo 0,187 iki 0,210mm, o burbulinio virimo metu pasiekia 0,827mm. Kūną įkaitinus iki 550°C plėvelinio virimo metu, matome 0,150-0,171mm svyravimą, burbulinio virimo didžiausias vidurkis 0,611mm. Kūnui esant 600°C plėvelinio virimo metu plėvelės storis kito nuo 0,210 iki 0,284mm, burbulinio virimo pikas 0,811mm. Prie 650°C plėvelinio režimo metu 0,247-0,365mm, o burbulinio iki 0,917mm. Įkaitinus kūną iki 700°C eksperimento pradžioje plėvelės storis kito nuo 0,079mm iki 0,169mm, didžiausias storis pasiektas burbulinio virimo metu 0,669mm. Esant aukščiausiai temperatūrai, 750°C, plėvelinio virimo metu garo plėvelės storis svyravo nuo 0,133mm iki 0,185mm, didžiausia vidutinė reikšmė pasiekta 0,648mm burbulinio virimo metu.

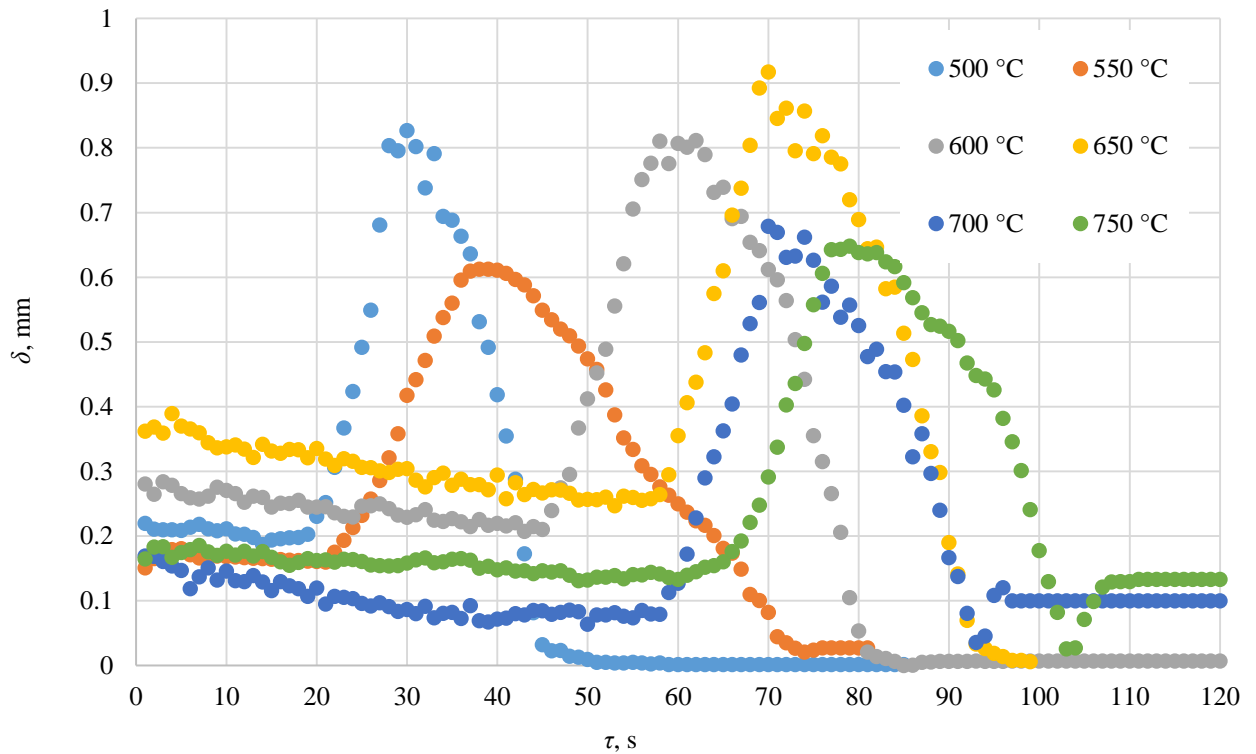
### 3.4. Rezultatu apibendrinimas

Šioje dalyje apibendrinami visų eksperimentinių bandymų rezultatai. Apžvelgiami kūno aušimo ir plėvelės storio grafikai.



3.27pav. Įkaitinto kūno aušimo dinamika prie skirtingų pradinių temperatūrų

3.27pav. grafike pateikta įkaitusio kūno aušimo dinamika prie skirtingų pradinių temperatūrų. Nepaisant didelio temperatūrų skirtumo tarp eksperimentų, matoma tokia pati temperatūros kitimo priklausomybė nuo laiko. Nuliniu laiko momentu, kai bandinio temperatūra yra aukščiausia, jis panardinamas į pastovios 99°C temperatūros vandenį, prasideda plėvelinis virimas. Kūno paviršių apgaubia plona garo plėvelė, kuri subliūkšta pasiekus Leidenfrost ribą. Nustatyta, kad ši riba eksperimentuose kinta nuo 360 iki 380°C. Toliau krenant temperatūrai, pereinama prie burbulinio virimo, kurio metu pastebėtas staigus temperatūros kritimas dėl padidėjusio perduodamo šilumos srauto į vandenį. Toks staigus aušimas matomas visuose eksperimentuose. Galima teigti, kad temperatūrų ribų, kurias pasiekus keičiasi virimo režimas, beveik neįtakoja pradinė kūno temperatūra. Burbulinio virimo pabaiga visuose eksperimentuose pastebėta prie maždaug 150°C, o priartėjus prie 100°C virimo procesas baigiasi. Pradinė cilindro temperatūra, didžiausią įtaką turi plėvelinio virimo ir viso bendro virimo proceso trukmei.



**3.28pav.** Garo plėvelės priklausomybė nuo laiko prie skirtingų pradinių temperatūrų

3.28pav. Pavaizduoja garo plėvelės storio funkcija nuo laiko. Pateiktas grafikas sudarytas iš suvidurkintų reikšmių. Matome, kad pradiniu laiko momentu, kai vyksta plėvelinis virimas, plėvelės storis varijuoja neženkliai. Eksperimentų, prie skirtingų temperatūrų, plėvelės storiai plėvelinio virimo metu skiriasi. Storiausias garo sluoksnis susidarė, kai kūno pradinė temperatūra yra 650°C, kuris siekė 0,365mm. Tuo tarpu ploniausia plėvelė dengė kūną esant 700°C, kurios storis 0,08mm. Visų eksperimentinių bandymų metu, plėvelės storis smarkiai išaugo perėjus prie burbulinio virimo. Maksimalus jos storis yra 0,917mm esant 650°C. Mažiausias plėvelės storio vidurkis yra 0,611mm, kai kūno temperatūra 550°C.



#### 4. Išvados

Šiame baigiamajame projekte tirti termohidrodinaminiai procesai, vykstantys panardinant įkaitintą cilindrinį kūną į pastovios 99°C temperatūros vandenį. Sukurtas eksperimentinis stendas bei pagamintas cilindrinis kūnas, kurio viduje sumontuotos termoporos, leidžiančios stebėti ir užfiksuoti temperatūros kitimą kūno paviršiuje ir centre. Sukurta programa, leidžianti nustatyti garo plėvelės storį iš vaizdinės medžiagos MatLAB aplinkoje, aprašyta tyrimo metodika. Atlikus eksperimentinius tyrimus nustatyta, kad:

1. Pradinė kūno temperatūra neįtakoja virimo proceso eigos, nuo jos priklauso tik viso virimo proceso trukmė. Kūno pradinei temperatūrai esant 500°C, bendras virimo procesas trunka apie 86 s, tuo tarpu prie 750°C pradinės temperatūros 151s.
2. Kūno temperatūra didžiausią įtaką turi plėvelinio virimo trukmei, prie mažiausios tirtos 500°C temperatūros plėvelinis virimas truko apie 30s, o prie aukščiausios eksperimento metu tirtos temperatūros 750°C virimas truko 84s.
3. Iš vaizdinės medžiagos nustatyta, kad plėvelinio virimo metu vidutinis plėvelės storis mažai kinta ir yra apie 0,185mm prie 750°C pradinės kūno temperatūros ir 0,199mm prie 500°C.
4. Pastebėta, kad garo plėvelės storis ženkliai išauga krentant kūno temperatūrai žemiau 380-360°C ir pereinant prie burbulinio virimo, kurio metu plona plėvelė suyra ir pradeda formuotis dideli garo burbulai, kurių storis kūno paviršiuje vidutiniškai siekia 0,917mm.
5. Išanalizavus eksperimento duomenis, nustatyta, kad plėvelinio virimo metu šilumos srautas yra nedidelis bei pastovus, apie 0,10MW/m<sup>2</sup> ir stipriai išauga perėjus prie burbulinio virimo iki 0,57MW/m<sup>2</sup>.
6. Pradinė kūno temperatūra neįtakoja atiduodamo šilumos srauto, tik bendrą jo kiekį.

## Literatūra

1. Axcell, B.P., Tonge, D.A., Jemsson, T., 1988. Turbulent forced convection in a pipe with an exponential wall heat flux. In: Shah, R.K., Ganic', E.N., Yang, K.T. (Eds.), *Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics, and Thermodynamics*. Elsevier, p.
2. Aziz, S., Hewitt, G.F., Kenning, D.B.R., 1986. Heat transfer regimes in forced convection film boiling on spheres. In: *Proceedings of the 8th International Heat Transfer Conference*, pp.
3. Bui, T.D., Dhir, V.K., 1985. Film boiling heat transfer on an isothermal vertical surface. *Journal of Heat Transfer*
4. Burns, R.A., 1989. *Heat Transfer Studies With Application To Nuclear Reactors*. Ph.D. Thesis, University of Manchester.
5. Chandler, J.M., 1994. A study of film boiling heat transfer. Ph.D. Thesis, University of Manchester.
6. Dhir, V.K., Purohit, G.P., 1978. Subcooled film-boiling heat transfer from spheres. *Nuclear Engineering and Design*
7. Dhuga, D.S., Winterton, R.H.S., 1985. The Pool Boiling Curve And Liquid-Solid Contact.
8. Dreitsler, G.A., 2005. Heat transfer enhancement in channels for film boiling of cryogenic liquids. *Applied Thermal Engineering*
9. Eckert, E., Drake, R.M., 1959. *Heat and Mass Transfer*, 2nd ed. McGraw-Hill
10. Fodemski, T.R., 1986. Experimental investigation of steady and destabilized forced convection film boiling on a He using the electrical capacity method. In: *8th International Heat Transfer Conference, San Francisco, USA*,
11. Groeneveld, D.C., Leung, K.H., Vasic, A.Z., 2003. A look-up table for fully developed film-boiling heat transfer. *Nuclear Engineering and Design*.
12. Hama, K., Shiotsu, M., 2007. Film boiling on a vertical plate in subcooled helium II. *Cryogenics*
13. Honda, H., Makishi, O., Yamashiro, H., 2007. Generalized stability theory of vapour film in subcooled film boiling on a sphere. *International Journal of Heat and Mass Transfer*
14. Jouhara, H., 2003. Film boiling heat transfer on spherical, cylindrical and plane geometries. Ph.D. Thesis, University of Manchester.
15. Kim, J.H., 1994. Film boiling stability and heat transfer on spheres. Ph.D. Thesis, University of Manchester.
16. Kolev, N.I., 1998. Film boiling on vertical plates and spheres. *Experimental Thermal and Fluid Science*
17. Kreith, F., Bohn, M.S., 1986. *Principles of Heat Transfer*, 4th ed. Harper & Row Publishers Inc.
18. Lauer, H., Hufschmidt, W., 1976. Heat transfer and surface rewet during quenching. In: *Proceeding of NATO Advanced Study Institute, Istanbul, Turkey*
19. Leidenfrost, J.G., 1966. On the fixation of water in diverse fire. *International Journal of Heat and Mass Transfer*
20. LeRoy, A., Bromley, L.A., Robbers, J.A., 1953. Heat transfer in forced convection film boiling. *Industrial and Engineering Chemistry*
21. Moffat, R.J., 1988. Describing the uncertainties in experimental results. *Experimental Thermal and Fluid Science*
22. Naylor, P., 1985. Experimental Investigation of Untriggered Film Boiling Collapse. UKAEA Winfrith, Report no. AEEW-R 1928.
23. Nusselt, W.Z., 1916. *Ver.deut.Ing.*

24. Orozco, J., Francisco, H., 1992. Free convection film boiling heat transfer from a rotating surface. Transactions of ASME
25. Stevens, J.W., Witte, L.C., 1973. Destabilization of vapor film boiling around spheres. International Journal of Heat and Mass Transfer
26. Stevens, J.W., Witte, L.C., 1971. Transient film and transition boiling from a sphere. International Journal of Heat and Mass Transfer
27. Vijaykumar, R., Dhir, V.K., 1992a. Experimental study of subcooled film boiling on a vertical surface – thermal aspects. Journal of Heat Transfer.
28. Vijaykumar, R., Dhir, V.K., 1992b. Experimental study of subcooled film boiling on a vertical surface – hydrodynamic aspects. Journal of Heat Transfer,
29. Zhang, P., Murakami, M., 2005. Experimental investigation of the film boiling heat transfer in He II: heat transfer coefficient. Cryogenics.
30. JOUHARA, Hussam; AXCELL, Brian P. Film boiling heat transfer and vapour film collapse on spheres, cylinders and plane surfaces. *Nuclear engineering and design*, 2009, 239.10: 1885-1900.
31. Nuclear-power.net, 2018, prieiga per: <https://www.nuclear-power.net/nuclear-engineering/heat-transfer/boiling-and-condensation/boiling-modes-types-of-boiling>