



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

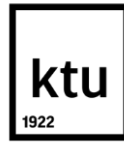
Klijų ant folijos džiovinimo linija

Baigiamasis magistro projektas

Giedrius Petrauskas
Projekto autorius

Prof. Valdas Eidukynas
Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Klijų ant folijos džiovinimo linija

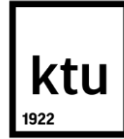
Baigiamasis magistro projektas
Mechanikos inžinerija (6211EX009)

Giedrius Petrauskas
Projekto autorius

Prof. Valdas Eidukynas
Vadovas

Dr. Linas Paukštaitis
Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Giedrius Petrauskas

Klijų ant folijos džiovinimo linija

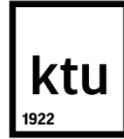
Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, *Giedriaus Petrausko*, baigiamasis projektas tema „*Klijų ant folijos džiovinimo linija*“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

(Vardas, Pavardė įrašomi ranka)

(parašas)



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Studijų programa – MECHANIKOS INŽINERIJA 6211EX009

Magistrantūros studijų baigiamojo projekto užduotis

Studentui – Giedriui Petrauskui

1. Baigiamojo projekto tema –

Klijų ant folijos džiovavimo linija

(Lietuvių kalba)

Glue on Foil Drying Line

(Anglų kalba)

2. Baigiamojo projekto tikslas ir uždaviniai –

Darbo tikslas – ištirti oro srautus džiovavimo kameroje, optimizuoti darbo sąlygas. Nustatyti optimalius oro tiekimo, pašalinimo ir oro šildytuvo (kaitinimo spiralės) parametrus. Šiam tikslui pasiekti yra iškelti tokie uždaviniai:

1. Atlikti analogiškų įrenginių rinkos analizę;
2. Palyginti skirtingas kompiuterinio skaičiavimo programas;
3. Sumodeliuoti džiovavimo kamerą;
4. Atlikti 5 skirtingas atvejo analizes;
5. Palyginti rezultatus esant skirtingoms darbo sąlygoms.

3. Pradiniai baigiamojo projekto duomenys –

- Džiovavimo kameros matmenys: ilgis 4 m, aukštis 0,5 m, plotis 0,4 m;
- 2 oro tiekimo ir 2 oro ištraukimo kanalai;
- Plėvelės plotis 300 mm;
- Klijų dangos storis 50 μm ;
- Klijų sudėtis: benzino pagrindu su smėlio dalelėmis;

- Klijuojama medžiaga – polimerinės plėvelės;
- Temperatūra darbo zonoje 60-80 °C.

4. Pagrindiniai reikalavimai ir sąlygos –

Įrenginio gabaritinius matmenis išlaikyti pagal pradines sąlygas ir vadovautis rinkoje esančiu „Adhesive coating equipment“ įrenginiu. Džiovinimo kamera vientisa, be pertvarų. Naudoti UAB „Kuprė“ tiekiamus lankstomus kaitinimo elementus, juos montuoti oro tiekimo kanale, kuo arčiau kameros. Kaitinimo elementas darbinę temperatūrą privalo pasiekti ne ilgiau kaip per dvi minutes. Reikia surasti optimalią šilumokaičių formą ir galią. Įvertinti, kad įrenginys bus naudojamas pramoniniu režimu.

Projekto autorius

Giedrius Petrauskas

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Baigiamojo projekto vadovas

Prof. Valdas Eidukynas

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Krypties studijų programos vadovas

Doc. dr. Kęstutis Pilkauskas

(Vardas, Pavardė)

(parašas)

(data)

Petrauskas Giedrius. Klijų ant folijos džiovinimo linija. Magistro baigiamasis projektas, vadovas Prof. Valdas Eidukynas; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų sritis (studijų krypčių grupė), studijų kryptis: Technologiniai mokslai, Mechanikos inžinerija.

Reikšminiai žodžiai: CFD, SolidWorks Flow Simulation, ANSYS Fluent, dujų srautai.

Kaunas, 2020. 51 p.

Santrauka

Gamybos ekologija ir antrinis produktų panaudojimas tampa vis aktualesne tema. Įvairios organizacijos ir politinės partijos, pasisako už švaraus pasaulio išsaugojimą. Dėl šių priežasčių gamybos įmonės turi persiorientuoti į ekologišką gamybą, bet gamybos poreikius diktuojantys klientai nori, kad dėl ekologijos nenukentėtų ir prekių funkcionalumas, modernumas. Prie šių dažnai skirtingų reikalavimų dar prisijungia reklama, reikalaujanti ryškių ir išskirtinių įpakavimų. Tam gamintojai ieško naujų tekstūrų, klijų ir klįjavimo metodų leisiančių sukurti ką nors unikalaus ir ekologiško ar bent jau ekonomiško, nes energijos nešvaistymas taip pat yra ekologija. Lipnių juostų, etikečių, įvairių plastikinių pakuočių gamybos technologijų yra daug, tačiau jos susiduria su bendra, našumą ribojančia problema – užteptų klijų išdžiovinimas. Kuriant naujus įrenginius, ar ieškant naujų koncepcijų, pastarųjų neįmanoma pasiekti be atsitiktinių eksperimentų ar mokslinių tyrimų.

Šio darbo tikslas – ištirti oro srautus džiovinimo kameroje, optimizuoti darbo sąlygas. Nustatyti optimalius oro tiekimo, pašalinimo ir oro šildytuvo (kaitinimo spiralės) parametrus. Tinkamai suprojektuota džiovinimo kamera leis montuoti kaitinimo elementus kuo arčiau darbo zonos, taip išvengiant šilumos nuostolių. Optimaliai parinkta darbo agentų galia ir išdėstymo dažnis leis sumažinti energijos sąnaudas ir suvaldyti oro srautus kameros viduje.

Tiriamąjį objekto 3D modeliavimą atlikome su *SolidWorks* programine įranga. Matematiniam modeliui sudaryti ir atlikti dujų srautų analizės pasirinkome *SolidWorks* papildinį *Flow Simulation*. Buvo atliktos penkios skirtingų atvejų simuliacijos keičiant po vieną ar kelis parametrus. Priimtini rezultatai buvo pasiekti tik penktojoje simuliacijoje. Pagrindiniai parametrai: 4 oro tiekimo kanalai, kuriuose oro srauto greitis 1 m/s ir naudojami 500 W kaitinimo elementai (kiekviename kanale) sumontuoti prieš pat oro kreiptuvus. 2 oro pašalinimo kanalai be priverstinio ištraukimo. Visų oro kanalų skersmenys 110 mm. Penktoje analizėje reikiamą temperatūrą pasiekėme 4-iose taškuose iš 5-ių. Temperatūros vidurkis po 600 s buvo 66,13 °C, o žemiausia temperatūra fiksuota 3-iame taške siekė 58,31 °C. Dėl simuliacijų imlumo laikui skaičiavimus nutraukėme ties 600 sekundžių, tačiau norėdami sužinoti, kuriuo laiko momentu trečiame taške pasieksime darbinę temperatūrą atlikome prognozę su *MS Excel* įrankiu *Forecast*. Prognozės metu nustatėme, jog trečiame taške 60-ies laipsnių temperatūrą pasieksime po 1140 sekundžių.

Petrauskas, Giedrius. Glue on Foil Drying Line. Master's Final Degree Project / supervisor Prof. Valdas Eidukynas; The Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study area (study field group), study field: Technological Sciences, Mechanical Engineering

Key words: CFD, SolidWorks Flow Simulation, ANSYS Fluent, gas flows.

Kaunas, 2020. 51 p.

Summary

Production ecology and product reuse are becoming an increasingly important topic. Various organizations and political parties are in favor of maintaining a clean world. For these reasons, production companies have to reorient to organic production, but customers who dictate production needs want the functionality and modernity of goods not to suffer as a result of ecology. These often different requirements are compounded by advertising that requires bright and exclusive packaging. To do this, manufacturers are looking for new textures, glues and gluing methods to create something unique and ecological, or at least economical, because not wasting energy is also ecology. There are many technologies for the production of adhesive tapes, labels and various plastic packaging, but they face a common, performance-limiting problem - the drying of applied adhesives. When developing new facilities or searching for new concepts, the latter cannot be achieved without random experimentation or scientific research.

The aim of this work is to study the air flows in the drying chamber, to optimize the working conditions. Set the optimal parameters for air supply, exhaust and air heater (heating coil). A properly designed drying chamber will allow the heating elements to be installed as close as possible to the work area, thus avoiding heat loss. Optimally selected power and quantity of heaters will reduce energy consumption.

3D modeling of the research object was performed with SolidWorks software. We chose the SolidWorks datasheet Flow Simulation to create and perform gas flow analyzes for the mathematical model. Five different case simulations were performed by changing one or more parameters each. Acceptable results were achieved only in the fifth simulation. Main parameters: 4 air supply ducts with air flow speed 1 m/s and 500 W heating elements (in each duct) installed just in front of the air deflectors. 2 air extraction ducts without forced extraction. Diameters of all air ducts 110 mm. In the fifth analysis, we reached the required temperature at four points out of five. The mean temperature after 600 s was 66.13 °C, and the lowest temperature recorded at point 3 was 58.31 °C. Due to the time-susceptibility of the simulations, we stopped the calculations at 600 seconds, but to find out at what point in time we will reach the operating temperature at the third point, we performed a forecast with the MS Excel tool Forecast. During the forecast, we found that at the third point, we would reach a temperature of 60 degrees after 1140 seconds.

Turinys

Paveikslų sąrašas	8
Lentelių sąrašas	9
Įvadas	10
1. Literatūros apžvalga	12
1.1. Analogiški įrenginiai	12
1.2. Klijai ir klijavimo technologija	14
1.3. Programinės įrangos apžvalga.....	16
1.3.1. Baigtinių elementų metodas.....	18
1.3.2. Skaičiuojamosios skysčių dinamikos matematinis pagrindimas	19
1.3.3. Dalinės diferencinės lygtys (<i>angl. Partial Differential Equations PDE</i>).....	20
1.4. CFD analizė programoje <i>SolidWorks</i>	22
2. Tyrimo samprata ir modelis	26
3. Tyrimo eiga	27
3.1. Tiriamos aplinkos modeliavimas.....	27
3.1.1. Skysčių dinamikos studija ir kraštinės sąlygos	29
3.2. Srautų analizė Nr. 1	30
3.3. Srautų analizė Nr. 2	33
3.4. Srautų analizė Nr. 3	36
3.5. Srautų analizė Nr. 4.....	39
3.6. Srautų analizė Nr. 5	42
3.6.1. Prognozavimas	46
Išvados	49
Literatūra	50

Paveikslų sąrašas

1 pav. Kompanijos „HoloEast“ adhesive coating equipment įrenginys.....	12
2 pav. Įrenginio džiovinimo kameros schema	13
3 pav. Pressen klijų pavyzdžiai	14
4 pav. Lipnių juostų sluoksniai	15
5 pav. Plėvelių klijavimo principinė schema	15
6 pav. CFD analizės pavyzdys	16
7 pav. Standartinės baigtinių elementų formos.	17
8 pav. Konstrukcijos matricų sujungimas į vientisą sistemą	19
9 pav. Baigtinių elementų tinklelio pavyzdys	21
10 pav. Baigtinių elementų konvergavimo grafikas.....	22
11 pav. BE tinklelio sudarymas programoje SolidWorks	23
12 pav. CAD geometrijos tinklelio atvaizdavimas.....	23
13 pav. Mokslinio tyrimo stadijos	26
14 pav. Kaitinimo elementų parametrai.....	28
15 pav. Sumodeliuota džiovinimo kamera	28
16 pav. Simetrijos sąlygos	29
17 pav. Kraštinės sąlygos.....	29
18 pav. Baigtinių elementų tinklelis	30
19 pav. Kameros skerspjūvio termograma po 300 s. Analizė Nr. 1.....	31
20 pav. Kameros įšilimo grafikas: 300 s. Analizė Nr. 1.....	32
21 pav. Kaitinimo elemento įšilimo fazė. Analizė Nr. 1	33
22 pav. Kameros skerspjūvio termograma po 300 s. Analizė Nr. 2.....	34
23 pav. Kameros įšilimo grafikas: 300 s. Analizė Nr. 2.....	35
24 pav. Kaitinimo elemento įšilimo fazė. Analizė Nr. 2	36
25 pav. Kameros skerspjūvio termograma po 300 s. Analizė Nr. 3.....	37
26 pav. Kameros įšilimo grafikas: 300 s. Analizė Nr. 3.....	38
27 pav. Kaitinimo elemento įšilimo fazė. Analizė Nr. 3	39
28 pav. Kameros skerspjūvio termograma po 300 s. Analizė Nr. 4.....	40
29 pav. Kameros įšilimo grafikas: 300 s. Analizė Nr. 4.....	41
30 pav. Kameros skerspjūvio termograma po 300 s. Analizė Nr. 5.....	42
31 pav. Kameros įšilimo grafikas: 300 s. Analizė Nr. 5.....	44
32 pav. Kameros skerspjūvio termograma po 600 s. Analizė Nr. 5.....	44
33 pav. 600 s simuliacijos skaičiavimo laikas	45
34 pav. Kameros įšilimo grafikas: 600 s. Analizė Nr. 5.....	46
35 pav. 3-io taško temperatūros kitimo prognozė	47

Lentelių sąrašas

1 lentelė. CFD programų palyginimas.....	17
2 lentelė. Kontrolinių taškų vertės po 300 s. Analizė Nr. 1	31
3 lentelė. Kaitinimo elemento temperatūra. Analizė Nr. 1	32
4 lentelė. Kontrolinių taškų vertės po 300 s. Analizė Nr. 2.....	34
5 lentelė. Kaitinimo elemento temperatūra. Analizė Nr. 2.....	35
6 lentelė. Kontrolinių taškų vertės po 300 s. Analizė Nr. 3	37
7 lentelė. Kaitinimo elemento temperatūra. Analizė Nr. 3	38
8 lentelė. Kontrolinių taškų vertės po 300 s. Analizė Nr. 4.....	41
9 lentelė. Kontrolinių taškų vertės po 300 s. Analizė Nr. 5.....	43
10 lentelė. Kontrolinių taškų vertės po 600 s. Analizė Nr. 5	45
11 lentelė. 3-io taško temperatūros prognozė duomenys.....	47

Įvadas

Šiuo metu, vis labiau modernėjančiame pasaulyje – dažniau atsigręžiamo į ekologiją, žmogaus sveikatą, įvairių produktų pakartotinį perdirbimą ir pan. Įvairios organizacijos, politinės partijos, pasisako už tvaraus pasaulio išsaugojimą ir kelia vis griežtesnius aplinkosaugos reikalavimus statybos, gamybos ir pakavimo įmonėms. Dėl šių priežasčių inžinieriai kasdien sprendžia naujas, sudėtingesnes gamybos ekologiškumo problemas. Neišvengiame pokyčių: vis našesnių ir ekonomiškesnių įrenginių diegimo, išmaniųjų valdymo sistemų, didesnio automatizacijos laipsnio – bei kai kuriais atvejais specifinių mechaninių įrenginių kūrimo. Visa tai neįgyvendinama be mokslo žinių ir tyrimų.

Lipnių juostų, etikečių, įvairių pakuočių ir lipdukų gamybos technologijų yra daugybė, tačiau visos jos susiduria su bendra, našumą ribojančia problema – užteptų klijų išdžiovinimas. Džiovinimo įrenginių pagal jų konstrukcines savybes ir skirtingus fizikinius džiovinimo metodus galime rasti apie keliasdešimt skirtingų rūšių. Visi jie turi privalumų bei trūkumų, o galutinį, vienokio ar kitokio tipo įrenginio naudojimą, nusprendžia konstruktorius, atsižvelgdamas į gaminamo objekto reikalavimus, klijų tipą ar tiesiog gamybinių įmonių poreikius. Tačiau augant aplinkosaugininkų, vartotojų poreikiams ir konkurencijai, gamybos įmonės yra priverstos ieškoti naujų, o kartais ir netradicinių sprendimų. Vienas iš jų, spaudimui (slėgimui) jautrių klijų (*pressure-sensitive adhesive*) maišymas su smėlio dalelėmis. Šiam mišiniui džiovinti nebetinka arba ekonomiškai nenaudingi rinkoje esantys įrenginiai. Dėl šios priežasties nuspręsta projektuoti visiškai naują įrenginį, kuris neturi nusileisti savo našumu rinkoje esantiems analogams bei kartu jį pritaikyti prie esamų gamybos patalpų. Projektuojant gamybines linijas, reikia atlikti nemažai skaičiavimų, tyrimų, eksperimentų, kad sukonstruotas įrenginys galėtų sklandžiai dirbti ir būti konkurencingas rinkoje.

Mokslinis tyrimas nurodo bendrą tyrimo kryptį, orientuojasi į problemos analizę taip, kad tyrimo tikslas būtų pasiektas kuo efektyviau, o jo rezultatų teisumas būtų neginčijamas. Pasiekęs mokslinio tyrimo tikslą, tyrėjas privalo rasti mokslškai pagrįstą problemos sprendinį. Bendru atveju tyrimas turi pagrįsti ar paaiškinti, kokia yra darbo (mokslinio tyrimo) prasmė ir kodėl jis atliekamas. Šis dujų srautų analizės tyrimo tipas – prognozuojamasis. Jis naudojamas, kai norima nustatyti kaip kinta tyrimo objektas ar reiškinys kintant aplinkos sąlygoms, ar pačio tyrimo objekto parametrams. Tokio tipo tikslas nukreiptas ne į esamos, bet į būsimos situacijos tyrimą [1].

Šio darbo tikslas – ištirti oro srautus džiovavimo kameroje, optimizuoti darbo sąlygas. Nustatyti optimalius oro tiekimo, pašalinimo ir oro šildytuvo (kaitinimo spirалės) parametrus. Šiam tikslui pasiekti yra išskelti tokie uždaviniai:

1. Atlikti analogiškų įrenginių rinkos analizę;
2. Palyginti skirtingas kompiuterinio skaičiavimo programas;
3. Sumodeliuoti džiovavimo kamerą;
4. Atlikti 5 skirtingas atvejo analizes;
5. Palyginti rezultatus esant skirtingoms darbo sąlygoms.

Pradinės sąlygos:

- džiovinimo kameros matmenys: ilgis 4 m, aukštis 0,5 m, plotis 0,4 m;
- 2 oro tiekimo ir 2 oro ištraukimo kanalai;
- plėvelės plotis 300 mm;
- klijų dangos storis 50 μm ;
- klijų sudėtis: benzino pagrindu su smėlio dalelėmis;
- klijuojama medžiaga – polimerinės plėvelės;
- darbinė kameros temperatūra 60-80 °C.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Analogiški įrenginiai

Apžvelgus Europoje gaminamus lipnių juostų, etikečių, plėvelių klijavimo įrenginius, artimiausias techninėmis charakteristikomis yra „HoloEast“ kompanijos sukurtas „Adhesive coating equipment“ įrenginys (1 pav.). Šis mechanizmas yra skirtas serijinei ir smulkiaserijinei gamybai ir apima visą gamybos ciklą, t.y. nuo plėvelės nuvyniojimo, klijų užtepimo iki džiovinimo ir suvyniojimo [2]. Jis skirtas gaminti lipnias plėveles, etiketes, taip pat yra galimybė suklijuoti dvi plėveles tarp jų įterpiančią armuojančią ar dizaino sluoksnį. Kadangi šio tyrimo objektas yra džiovinimo kamera, todėl pateikiu tik aktualias įrenginio charakteristikas:

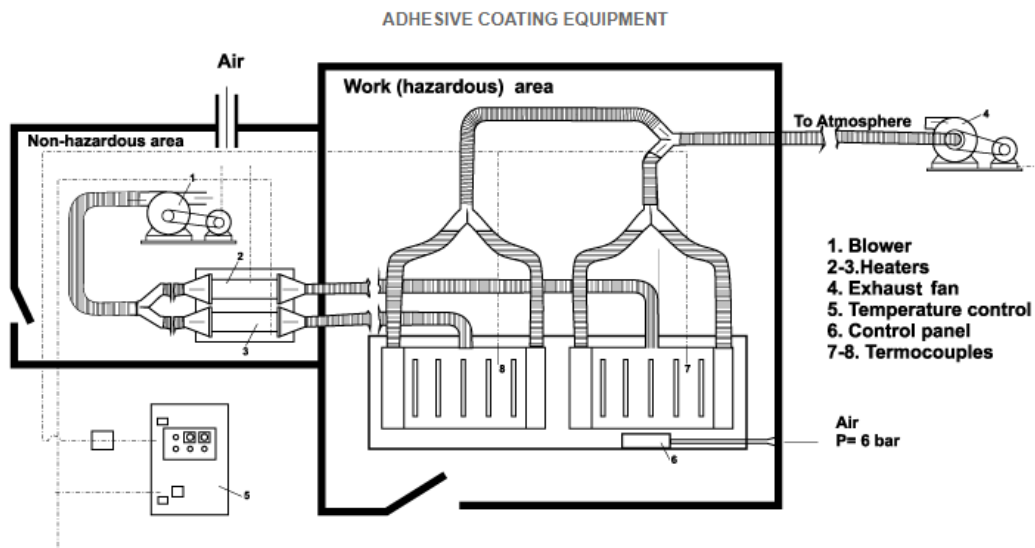
- Maksimalus plėvelės plotis – 305 mm;
- Maksimalus greitis džiovinimo kameroje: 25 m/min;
- Džiovinimo kanalų skaičius: 2-4 kanalai;
- Oro šildytuvų galia: 2-3 kW;
- Oro srauto ventiliatoriai: vienas tiekimo ir vienas ištraukimo;
- Klijų dangos storis: 25-50 μm .



1 pav. Kompanijos „HoloEast“ adhesive coating equipment įrenginys [2]

Nesunku pastebėti, kad įrenginys naudoja dvi nedidelio tūrio džiovinimo kameras tarp kurių yra tarpas. Tokia koncepcija leidžia lengviau valdyti oro srautus, nes kameros yra mažesnių gabaritinių matmenų, o plėvelės traukimo mechanizmus pakanka įdiegti kamerų išorėje. Tačiau, jis turi ir vieną esminį trūkumą – tarpe tarp kamerų plėvelė atvėsta, sumažėja klijų garavimas, ir yra tikimybė ant plėvelės patekti įvairioms dalėlėms ar dulkėms iš patapos. Įrenginys naudoja vieną paprasčiausių džiovinimo technologijų – džiovinimą karštu oru. Šiuo atveju orą kaitina tinklelio tipo šildymo

elementai 2 stovintys tarp pūstuvo ir džiovinimo kameros (žr. 2 pav.). Šildymo elementų galingumą reguliuoja PID reguliatorius 5, kuris gauna grįžtamąjį ryšį iš termoporų esančių džiovinimo kameroje ir iškart už šildytuvo. 1 ir 4 pažymėta oro tiekimo ir ištraukimo ventiliatoriai.



2 pav. Įrenginio džiovinimo kameros schema [3]

Analizuojant įrenginio darbo schemą pastebėta, kad pažymėtai darbo zonai reikia įrengti apsauginę patalpą, dėl anksčiau minėtų priežasčių. Tai didina įmonės kaštus ir užima papildomą vietą naudojant šį įrenginį. Džiovinimo kameros turi po vieną oro tiekimo ir po du oro ištraukimo kanalus. Kanalai yra sumontuoti vertikaliaje sienelėje horizontaliai. Per centrą yra tiekimo kanalas, o kraštuose ištraukimo angos. Pažymėtina, kad ventiliatoriai stovi už darbo zonos ribų, todėl yra patiriami papildomi hidrauliniai nuostoliai. Dėl toli nuo džiovinimo kameros esančių šilumokaičių neišvengiama ir temperatūros nuostolių bei reikalinga aukštos šiluminės varžos vamzdžių izoliacija.

1.2. Klijai ir kljavimo technologija

Naudojamų klijų pagrindą sudaro *Beardow Adams* sukurti slėgiui jautrūs klijai (*pressure sensitive adhesives PSA*) „Pressen 2039“. Šie klijai skirti klijuoti nuolatinio tiekimo gamybos juostoms ir lipnioms dangoms. „Pressen 2039“ gali būti naudojami net ir sunkiųjų medžiagų, kur reikalinga didelio stiprumo jungtis, lipniosioms juostoms gaminti [4].

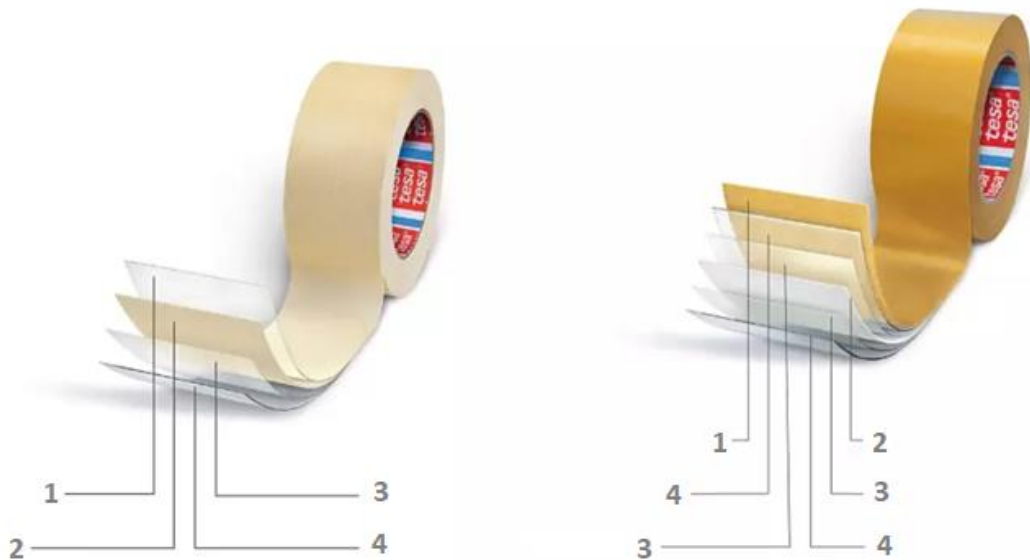
Klijų ypatumai: „Pressen 2039“ yra šviesūs spalvoti slėgiui jautrūs klijai, pasižymintys aukštu kilpiniu ryšiu, stipriu sukibimu ir atsparumu karščiui. Beveik bespalvis, o tai leidžia juos naudoti net ir storesniais sluoksniais ant skaidrių medžiagų. „Pressen 2039“ tinka maišymui su mažomis kieto paviršiaus dalelėmis, kurios pasižymi geru sukibimu ir greito lipnumo galimybėmis.

„Pressen 2039“ klijai natūraliame savo būvyje yra kietosios agregatinės būsenos granulės (žr. 3 pav.), todėl benzinau panaudojant kaip tirpiklį tikimasi tolygiai sumaišyti kljus su smėlio dalelėmis, kad vėliau būtų galima gautą mišinį tepti ant plėvelės. Svarbu sukurti tokį mišinį, kuriame smėlio dalelės pasiskirstytų tolygiai ir nenusėstų. Dėl šios priežasties yra kuriama nauja klijų tepimo technologija, kurios pagrindą sudaro „karštų klijų“ kljavimo technologija (*angl. Hot melt adhesives*) [5].



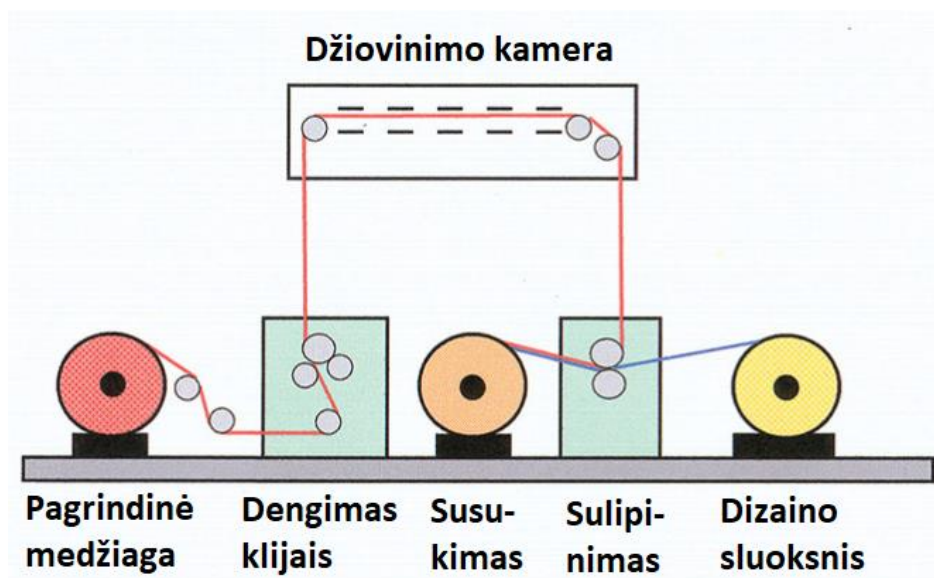
3 pav. Pressen klijų pavyzdžiai

Paprastai ant etikečių, lipnių juostų ar lipdukų su logotipais matome tik 2-3 sluoksnius, tačiau gamyboje tų sluoksnių yra nuo kelių iki keliolikos, priklausomai nuo juostos paskirties ir norimos išgauti tekstūros ar dizaino elementų. Vienas didžiausių lipnių juostų ir lipniųjų sistemų gamintojų pasaulyje „Tesa“ savo internetiniame puslapyje nurodo iš kokių sluoksnių susideda, mums visiems gerai žinomos vienpusės ir dvipusės lipnios juostos (žr. 4 pav.) [6]. 1) atlaisvinamasis sluoksnis, kuris leidžia lengvai atluoti lipniaja juosta; 2) pagrindinė medžiaga (popierius, plėvelė, audinys ir kt.); 3) gruntas, kuris užtikrina patikimą klijų sukibimą su pagrindine medžiaga; 4) slėgiui jautrūs klijai;



4 pav. Lipnių juostų sluoksniai [6]

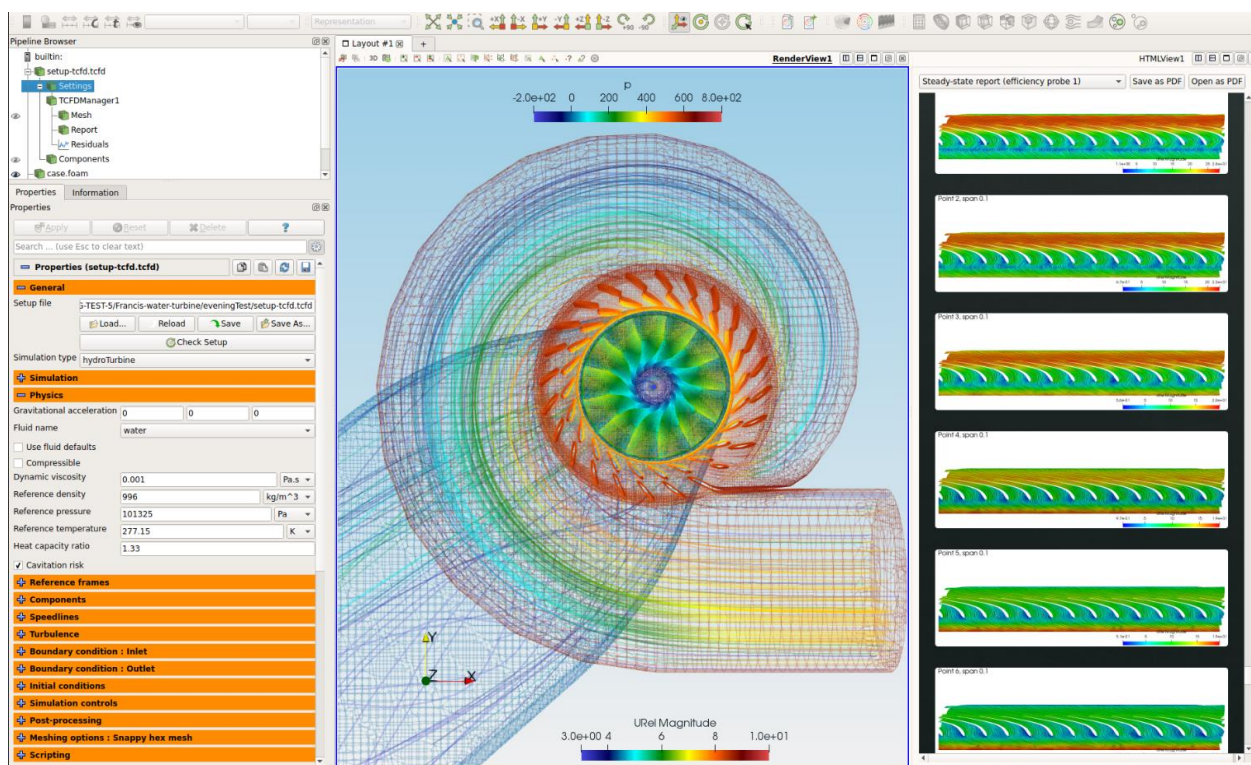
Daugeliui kyla klausimas, kodėl visada klijuojasi lipni juosta, nepaisant aplinkos sąlygų? Lipniųjų juostų paslaptis yra slėgiui jautrūs klijai, kurie kietėja esant tam tikrai slėgimo (spaudimo) jėgai. Įprastai klijai būna skystos būsenos ir turi tam tikrą džiūvimo laiką per kurį sukietėja, o slėgiui jautrūs klijai yra klampios konsistencijos ir suspaudus akimirksniu sukietėja ir išlaiko lipnumą net ir nuėmus apkrovą. Būtent dėl šios priežasties slėgiui jautrūs klijai tapo itin populiarūs ir turintys daug praktinių pritaikymo būdų visame pasaulyje.



5 pav. Plėvelių klijavimo principinė schema

1.3. Programinės įrangos apžvalga

Šio tyrimo objektas yra dujų srautų analizė klijų džiovinimo kameroje. Apibendrintai galime teigti, kad tai yra „fluidų“ dinamikos uždavinys. Vis plečiantis skysčių, dujų srautų kompiuterinio skaičiavimo galimybėms, buvo pradėta vartoti nauja programinės įrangos sąvoka, apibūdinanti skysčių ir dujų skaičiavimo metodologiją – skaičiuojamoji skysčių dinamika (*CFD, angl. – Computational fluid dynamics*) [7]. CFD uždaviniai apima ne tik skysčių ar dujų judėjimą uždaraime tūryje, jų maišymąsi tarpusavyje, ar priešingai – tekėjimą aplink tūrį turintį objektą, bet geba spręsti ir šilumos perdavimo, liepsnos degimo uždavinius, sąveikaujant su kietu kūnu arba be jo (6 pav.).



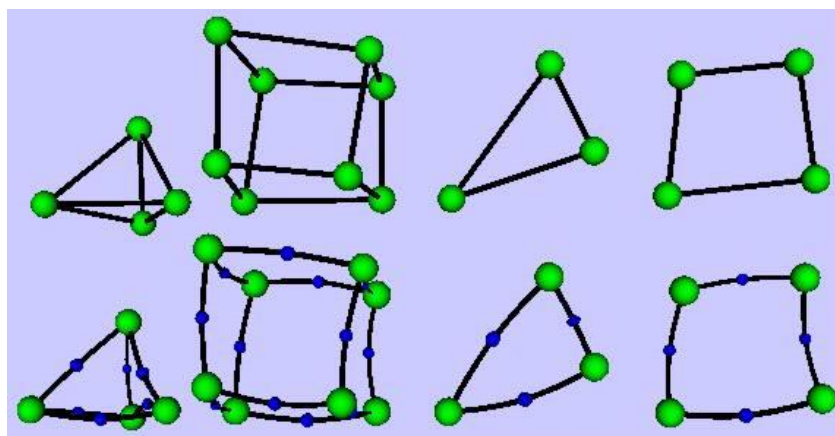
6 pav. CFD analizės pavyzdys [8]

CFD tipo programinių įrangų galime surasti bent kelias dešimtis ir visos jos turi savų privalumų bei trūkumų. Panagrinėjus atidžiau, galime pastebėti, kad visos programinės įrangos naudoja baigtinių elementų analizę (žr. 7 pav.), tik skiriasi skaičiavimo metodologija [9]. Skiriamos trys pagrindinės parametų diskretizavimo metodologijos: baigtinio tūrio (*Finite volume*), baigtinio elemento (*Finite element*) ir baigtinio skirtumo (*Finite difference*). Skaičiuojamosios „fluidų“ dinamikos programines įrangas galime grupuoti pagal daugelį aspektų, tačiau vieną geriausių grupavimų yra atlikęs švedų įmonės „Northvolt“ vyriausiasis inžinierius *Ehsan B. Haghighi*, kuris savo „LinkedIn“ paskyroje skelbia keturias CFD grupes [10]:

- **1 grupė.** Komerciniai profesionalūs CFD paketai (*ANSYS Fluent, Star-CCM*). Tai labai galingos, sudėtingos ir gebančios spręsti įvairių tipų uždavinius programinės įrangos. Jomis naudotis pakankamai sudėtinga, o importuojamiems CAD modeliams reikalingi pakeitimai.
- **2 grupė.** Komerciniai CFD papildiniai įtraukiami į esamą CAD programinę įrangą (*SolidWorks Flow Simulation, FloEFD*). Šie programų papildiniai leidžia paprasčiau atlikti skaičiavimus, nereikalauja gilių inžinerinių žinių ar ilgalaikio mokymosi programa. Šios

grupės produktai tinka mažiau sudėtingoms užduotims spręsti, lyginant su pirmąja grupe. Taip pat, jos yra gerokai pigesnės.

- **3 grupė.** Atvirojo kodo CFD programinė įranga su komercine GUI (*OpenFOAM / Visual-CFD, OpenFOAM / ANSA-μETA post-processor*). Šios grupės programos gali greitai ir tiksliai skaičiuoti vidutinio sudėtingumo vienos fazės (vieno srauto) uždavinius, tačiau vykdyti dviejų ar daugiau fazių skaičiavimus yra sudėtinga.
- **4 grupė.** Atvirojo kodo CFD paketas (*OpenFOAM / Paraview*). Šios nemokamos ketvirtosios grupės programos tinka paprastiems CFD uždaviniams spręsti ir vartotojo sąsaja nėra intuityvi ir draugiška naudotojui.



7 pav. Standartinės baigtinių elementų formos.

Apžvelgus keletą pagrindinių programinių įrangų gebančių spręsti CFD tipo uždavinius, galima teigti, jog viena geriausių rinkoje esančių programinių įrangų yra *ANSYS Fluent*, tačiau draugiškiausia vartotojui *SolidWorks Flow Simulation*. Šių programų išsamesnis palyginimas pateiktas 1-oje lentelėje.

1 lentelė. CFD programų palyginimas [11], [12]

	<i>SolidWorks Flow Simulation</i>	<i>ANSYS Fluent</i>
Privalumai	Aušto lygio CFD programa, kurios visiškai pakanka universitetiniams skaičiavimams vykdyti.	Aukščiausio lygio CFD programa, leidžianti spręsti sudėtingiausius uždavinius.
	Didelis skaičiavimo tikslumas.	Itin didelis skaičiavimų tikslumas.
	Vartotojo sąsaja patogi, šiuolaikiška, nereikalaujanti specifinių žinių.	Pateikiama daug įvairių duomenų apie srautų judėjimą, slėgių, temperatūrų pakyčius ir t. t.
	Turi tiesioginę sąsają su CAD modeliavimo sisteme, todėl lengva grįžti atgal atlikti pakeitimus ir tęsti skaičiavimus.	Galima tiksliai apibrėžti visas skaičiavimo sąlygas, parinkti skirtingus baigtinių elementų tinklelius ir pan.
	Iš dalies nebrangi. Yra studentiška versija.	
	Yra nemažai automatizuotų funkcijų, kurios paspartina uždavinio sąlygų aprašymą.	
	Netiksliai apibrėžiamos skaičiavimų sąlygos.	Labai brangi. Yra studentiškas paketas tik trims mėnesiams.

1 lentelė. (tęsinys)

	<i>SolidWorks Flow Simulation</i>	<i>ANSYS Fluent</i>
Trūkumai	Netiksliai apibrėžiamos skaičiavimų sąlygos.	Labai brangi. Yra studentiškas paketas tik trims mėnesiams.
	Po skaičiavimų matome tik bendrinius rezultatus.	Neturi tiesioginės sąsajos su CAD modeliu, todėl atlikus, bet kokius pakeitimus skaičiavimai atliekami iš naujo.
		Sudėtinga vartotojo sąsaja, naudotojams reikalinga daug specifinių žinių.

Išanalizavus dviejų CFD programų, *SolidWorks Flow Simulation* ir *ANSYS Fluent* pagrindinius trūkumus – bei privalumus, nuspręsta naudoti *SolidWorks* kompiuterinę programą. Šis pasirinkimas leis sutaupyti nemažai laiko, nes įrenginio modeliavimas vyks *SolidWorks* CAD papildinyje ir tai leis įrenginio 3D modelį tiesiogiai importuoti į *Flow Simulation* aplinką, o atlikus skaičiavimus vėl grįžti į CAD aplinką ir atlikti reikiamas korekcijas.

1.3.1. Baigtinių elementų metodas

Baigtinių elementų metodo (BEM) esmė yra ta, kad visa fizinė sistema yra išskaidyta į atskirus diskrečius elementus. Visa sistema gali būti labai sudėtinga ir netaisyklinga, tačiau atskirus jos elementus lengva analizuoti. Visi modelio elementai turi tiesioginį ryšį su sistemos struktūra ir medžiagos savybėmis. Galutinių elementų modelis paprastai turi iš dalies nedaug *laisvų* parametrų, kurių vertes reikia koreguoti, norint gauti tikslus rezultatus. Tai – reiškia, kad šie parametrai yra žinomi iš pirminių matavimų [13]. Tai gali būti:

- 1D, 2D (trikampis arba keturkampis) arba 3D (tetraedras, heksaedras);
- Išskirtiniais atvejais aukštesnio fizinio būvio elementai.

Baigtiniais elementais galime sumodeliuoti šių uždavinių sprendimą: mechanikos, akustikos, šiluminius laukus, skysčių dinamiką, elektromagnetinius laukus ir pan. Galime sumodeliuoti standartines sistemas: membranas, sijas, santvaras, plonasienius elementus ir t. t. Konkrečiu atveju elementų elgsena analizuojama atsižvelgiant į apkrovas diskrečiuose mazguose. Ši analizė dažnai grindžiama *Rayleigh-Ritz* metodu. Tipinis elementų analizės rezultatas yra iš dalies nedidelė matrica, susijusi su mazgų poslinkių ir mazgų jėgų vektoriais. Matricos komponentai gali būti išreikšti kaip elemento formos ir savybių funkcijos, o tam tikro elemento komponentų reikšmės gali būti pakeičiamos atitinkamas formas ir savybes aprašančia lygtimi. Kai visų elementų matricos yra apskaičiuotos, jos sujungiamos į vieną bendrą visos sistemos matricą (8 pav.).

$$\begin{bmatrix} k_1 & -k_1 & 0 & 0 \\ -k_1 & k_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} R_1^1 \\ R_2^1 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}; \quad + \quad \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_2 & -k_2 & 0 \\ 0 & -k_2 & k_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ R_1^2 \\ R_2^2 \\ 0 \end{Bmatrix}; \\
 \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_3 & -k_3 \\ 0 & 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ R_1^3 \\ R_2^3 \end{Bmatrix}; \quad + \quad \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_4 & 0 & -k_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -k_4 & 0 & k_4 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ R_1^4 \\ 0 \\ R_2^4 \end{Bmatrix}.$$

8 pav. Konstrukcijos matricų sujungimas į vientisą sistemą

1.3.2. Skaičiuojamosios skysčių dinamikos matematinis pagrindimas

Skaičiuojamoji skysčių dinamika (*angl. Computational Fluid Dynamics CFD*) – tai skysčių mechanikos dalis, kuri naudoja skaitinę duomenų analizę ir jos struktūras, skirtas analizuoti ir spręsti fluidų tekėjimo uždavinius. Taip pat – taikoma įvairioms mokslinių tyrimų ir inžinerijos problemoms spręsti įvairiose studijų ir pramonės srityse, įskaitant aviacijos ir kosminės erdvės analizę, orų modeliavimą, biomechanikos inžineriją ar vidaus degimo variklio analizę. CFD programos yra nuolat atnaujinamos, patikslinami jų skaičiavimo metodai, remiantis naujausių mokslinių tyrimų ar pramonėje gautų eksperimentų rezultatų aprašais [14].

Su vis didėjančia kompiuterių skaičiavimo galia, skaičiuojamoji skysčių dinamika tapo plačiai taikomu įrankiu inžineriniams uždaviniams spręsti. CFD analizėje atliekamas skysčio srauto tyrimas pagal jo fizines savybes, tokias kaip greitis, slėgis, temperatūra, tankis, klampumas ir kita. Norint sukurti fizinio reiškinių, susijusių su skysčių srautu, tikslų sprendimą, visos šios savybės turi būti vertinamos kartu. CFD skaičiavimo metodika remiasi trimis baziniais dėsniais:

- 1) **Masės išsaugojimo arba tęstinumo lygtis** (1), kuri išreiškiama taip: masės suma per laiko vienetą įtekanti į tūrio vienetą – ir ištekanti iš to pačio tūrio per tą patį laiką yra lygios. Dėl pasikeitusio tankio masės kaita, įvykusi per laiko vienetą išlieka nepakitusi. Suspaudžiamo nestacionaraus skysčio srauto tęstinumo lygtis:

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho(\nabla \cdot \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

čia ρ – skysčio tankis; t – laikas; v – srauto greitis; ∇ – vektoriaus gradientas (*angl. Del Operator*).

$$\vec{\nabla} = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (2)$$

Nespūdaus skysčio atveju, kai $\rho = const$. tęstinumo lygtis įgauna paprastesnę formą (3):

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (3)$$

2) **Momento išsaugojimo arba Navje-Stokso lygtimi** (4):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = \overbrace{-\nabla p}^{III} + \overbrace{\nabla \cdot (\vec{\tau})}^{IV} + \overbrace{\rho \vec{g}}^V \quad (4)$$

čia ρ – medžiagos tankis; p – statinis slėgis; ∇ – slėgio gradientas (konvekcijos išvestinė);

v – srauto greitis; g – laisvojo kritimo pagreitis; τ – klampos koeficientas;

- I. Srauto tekėjimo greitis
- II. Konvekcija
- III. Paviršiaus įtempimo jėga
- IV. Difuzija
- V. Masės (svorio) jėga

3) **Pirmuoju termodinamikos dėsnium**, kuris teigia, jog energija – dE_t iš niekur neatsiranda ir niekur neišnyksta. Vadinasi sistemą veikiantis išorinis darbas – dQ , padidina sistemos vidinės energijos kiekį – dW . Matematinė išraiška atrodo taip (5):

$$dE_t = dQ + dW \quad (5)$$

Taigi, skysčių ir dujų uždaviniai sprendžiami skaitiniais metodais, visada remiasi išvardytomis lygybėmis. Žinoma, esant tam tikromis sąlygomis, jos gali įgyti vis kitas formas. Jas, taip pat, gali papildyti patikslinantieji koeficientai ar funkcijos, gauti eksperimentų metu, tikrinant iškeltas hipotezes.

1.3.3. Dalinės diferencinės lygtys (*angl. Partial Differential Equations PDE*)

CFD skaičiavimuose matematinis modelis suteikia mums tiesioginį ar netiesioginį, viso proceso metu dalyvaujančių parametrų tarpusavio ryšį. Nors kiekviena iš lygčių turi santykinį poveikį fiziniam reiškiniui, parametrų pokyčiai turėtų būti vertinami vienu metu per skaitinį sprendimą, apimančią diferencialines lygtis. PDE apima daugiau nei vieną kintamąjį ir jų išvestines, nurodytą „ ∂ “ vietoje „ d “. Jei lygties išvedimas atliekamas su „ d “, šios lygtys vadinamos paprastomis diferencialinėmis lygtimis (*angl. Ordinary differential equation ODE* (6)), kuriose yra vienas kintamasis ir jo išvestinė. PDE yra susiję su diferencialinio operatoriaus transformavimu „ ∂ “ į algebrinę lygčių sistemą (7), kad gautumėme rezultatą. Būtent šilumos perdavimo, skysčių dinamikos, akustikos, elektronikos ir kvantinės mechanikos uždaviniai yra tos sritys, kuriose PDE yra labai naudingi.

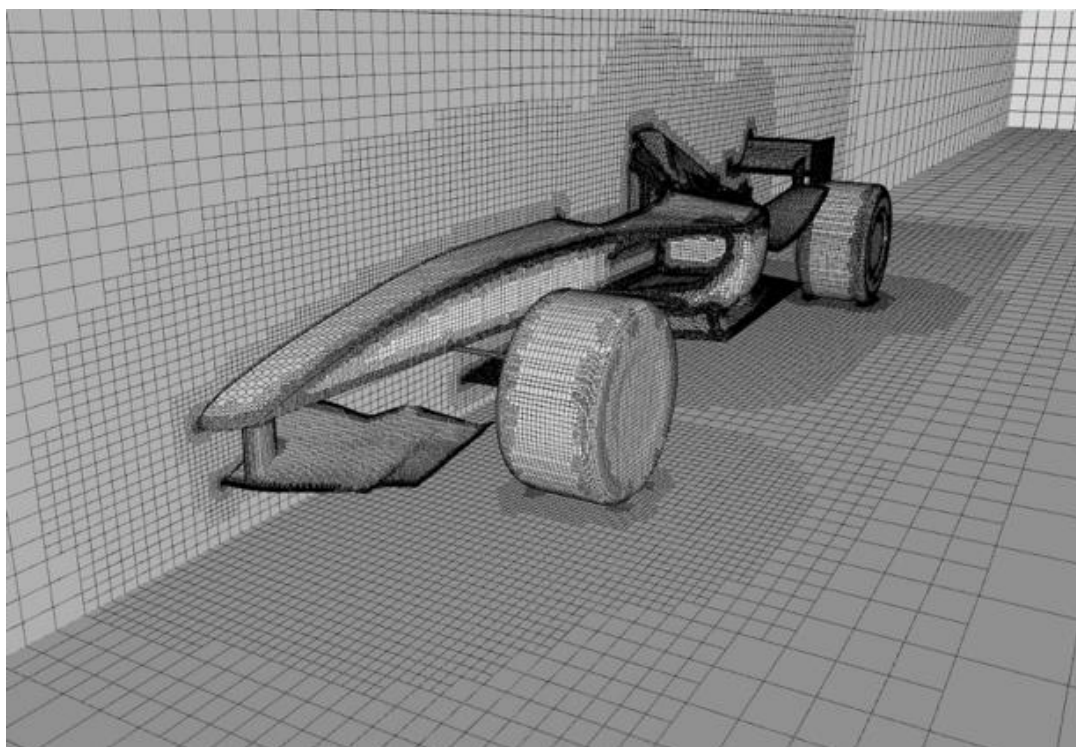
ODE pavyzdys:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = x \rightarrow x(t) \quad \text{čia } t \text{ yra vienintelis kintamasis} \quad (6)$$

PDE pavyzdys, Laplaso lygtis:

$$\frac{\partial f}{\partial x} + \frac{\partial f}{\partial y} = 0 \rightarrow f(x, y), \text{čia } x, y \text{ funkcijos kintamieji} \quad (7)$$

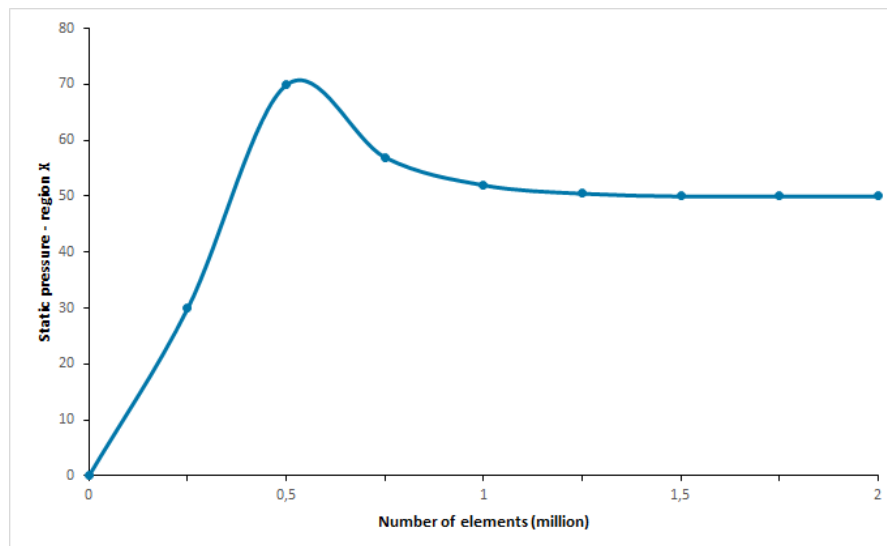
Norėdami išspręsti 6 ir 7 lygtis, visų pirma reikiamus dydžius turime diskretizuoti. Skaitinis sprendimas yra diskretizavimo metodas, naudojamas siekiant gauti apytikslius kompleksinių problemų sprendimus, kurių negalima išspręsti analitiniais metodais dėl sudėtingumo ir dviprasmybių. Paprastus procesus galima spręsti be diskretizavimo, nes tokius uždavinius nesunku išspręsti analitiškai. O skaitinio sprendimo tikslumas labai priklauso nuo diskretizavimo kokybės. Naudojami trys pagrindiniai diskretizavimo metodai: baigtinio skirtumo, baigtinio tūrio, baigtinio elemento. Todėl sprendžiant CFD uždavinius skaitiniais metodais, labai svarbu yra tinkamai diskretizuoti modelio parametrus, kitaip tariant, reikia padaryti tinkamo dydžio tinklą. Jį smulkinti ten, kur yra smulkių detalių, arba mums reikalingas aukštas skaičiavimo tikslumas [8] (9 pav.).



9 pav. Baigtinių elementų tinklo pavyzdys [7]

Pagrindinės klaidos sprendžiant uždavinius skaitiniais metodais, yra netinkamai parinkta tinklo struktūra ir/ar per mažas iteracijų skaičius. Dėl šių dažnai daromų klaidų gauname iškraipytus duomenis (10 pav.). Iškraipymai gali atsirasti, nes BE tinklas yra pernelyg grubus ir neapima visų elementų, kurie yra uždavinyje. Tokiu atveju reikia smulkinti tinklą tol, kol jis padengs visus elementus. Sprendimo tikslumas labai priklauso nuo tinklo struktūros. Norint optimizuoti skaičiavimo laiką ir rezultatus, baigtinių elementų tinklą kurti rekomenduojama vadovaujantis šiomis taisyklėmis:

1. Sukurti tokią tinklo struktūrą, kurioje yra gana mažas elementų skaičius ir atlikti analizę. Prieš atliekant analizę įsitikinti, kad tinkamai padengti visi elementai.
2. Atnaujinti tinklo struktūrą su didesniu elementų skaičiumi, dar kartą atlikti analizę. Palyginti rezultatus: jei jų pokytis minimalus – tinklas parinktas teisingai, jeigu ne – reikia pasmulkinti dar kartą.



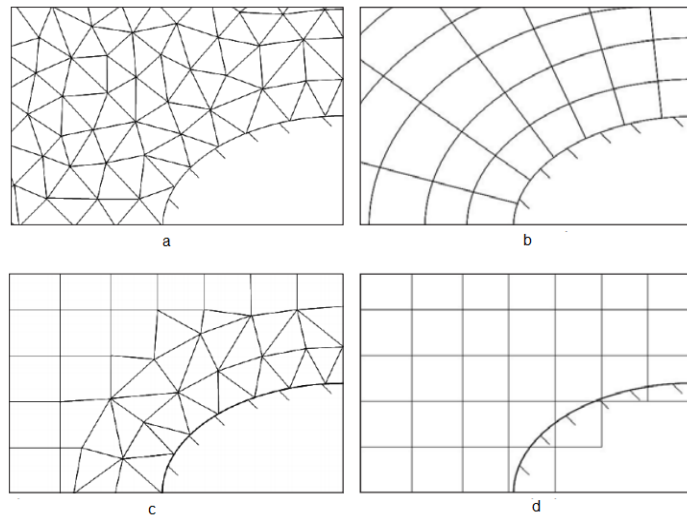
10 pav. Baigtinių elementų konvergavimo grafikas [7]

Nors CFD analizė yra plačiai taikoma ir ne itin sudėtinga, tačiau inžinieriai dar dažnai netinkamai aprašo skaičiuojamąjį objektą. Klaidas lemia tai, kad kiekvienas specialistas tinkamo tinklelio vertina subjektyviai – dėl laiko stokos sunku patikrinti skaičiavimų tikslumą vis smulkinant tinklelį. CFD analizė imli ne tik kompiuterio resursams, bet ir laiko atžvilgiu.

1.4. CFD analizė programoje *SolidWorks*

Kompiuterinė programa *SolidWorks* CFD skaičiavimus atlieka remdamasi *Navje-Stokso* lygtimi, turbulencijos modeliais ir kitais baziniais fizikiniais reiškiniais. Objekto diskretizavimui naudojamas baigtinio skirtumo metodas. *SolidWorks Flow Simulation* technologija pagrįsta Dekarto koordinatinių sistemų tinkleliu ir ši technologija yra viena iš pagrindinių CAD / CFD programų tiesioginės sąsajos galimybių. Nuo 1980-ųjų CFD programinių kodų sudėtingumas stipriai išaugo, ypač fizinio modeliavimo srityje, bet mažiau dėmesio skirta geometrinio sudėtingumo sprendimui [15].

Tradiciniai mechanikos uždaviniai įrodė, kad kūnui pritaikyti BE modeliai pasiteisino ir yra plačiai naudojami pramoninėms problemoms spręsti. Sudėtingoms geometrijoms naudojami nestruktūrizuoti BE, suformuoti sujungiant netaisyklingai paskirstytus mazgus (žr. 11 pav. a). Kai tinkleliu dengiamo kūno geometrija yra mažiau sudėtinga, galime naudoti struktūrizuotus elementus (11 pav. b). Optimizuojant skaičiavimų laiką ir rezultatų tikslumą, šios BE tinklelių sudarymo strategijos gali būti sujungtos regionais, pavyzdžiui 11 pav. c. Toks tinklelis vadinamas iš dalies struktūrizuotas. Alternatyvus metodas yra panaudoti „panardintą“ kūno tinklelį, kaip parodyta 11 pav. d. Šiuo atveju tinklelio kūrimas prasideda nepriklausomai nuo pačios geometrijos, ir baigtiniai elementai gali išeiti už kieto kūno ar skysčio kraštų. Toks tinklelis gali būti apibrėžiamas kaip kubo ar stačiakampio formos, kurios yra greta viena kitos, o jų išorinė skaičiavimo srities riba orientuota pagal Dekarto koordinatinių sistemą. BE, kertantys nagrinėjamo kūno paviršius, yra atskirai apdorojami (skaidomi) specialiais metodais, atsižvelgiant į paviršiaus sąlygas.

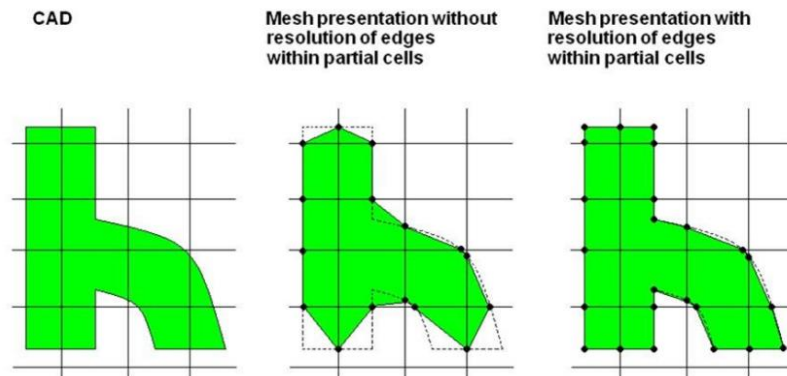


11 pav. BE tinklelio sudarymas programoje SolidWorks [15]

Dekarto sistemos tinklelio privalumai gali būti apibendrinti taip:

- Tinklelio sukūrimo algoritmo paprastumas, skaičiavimų greitis ir patikimumas;
- Vietinių klaidų sumažinimas;
- Diferencialinės sistemos patikimumas.

SolidWorks kūrėjai naudodami Dekarto koordinatių sistemos tinklelį yra sukūrę technologiją, kuri net ir esant pakankamai grubiam tinkleliui aptinka kieto kūno kraštines sąlygas ir pertvarko tinklelio rezoliuciją taip, kad BE tinklelio forma kuo labiau atitiktų geometrinio kūno formas (žr. 12 pav.).



12 pav. CAD geometrijos tinklelio atvaizdavimas [15]

SolidWorks Flow Simulation skysčių tekėjimo uždavinius sprendžia diferencialinėmis *Navje-Stokso* lygtimis (8-10), kurios yra išvestos iš masės, momento ir energijos išsaugojimo dėsnų [15], [16] :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + S_i \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i H}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j(\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i) + \frac{\partial p}{\partial t} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H \quad (10)$$

čia (7-9 lygtyse): $H = h + \frac{u^2}{2}$; ρ – skysčio tankis; t – laikas; u – srauto greitis; x – atstumas (poslinkis); τ – įtempiai; p – slėgis; S – išorinės jėgos; h – skysčio aukščių skirtumas; q – laikas; ε – skysčio klampa; Q – šilumos srautas; R – Reinoldso skaičius.

Kai yra skaičiuojami greಿತaveiksmiai skysčių uždaviniai arba uždaviniai su smūgio bangomis, atitinkamai 10-oji lygtys įgauna tokį pavidalą (11):

$$\frac{\partial \rho E}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i \left(E + \frac{p}{\rho} \right)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(u_j (\tau_{ij} + \tau_{ij}^R) + q_i \right) - \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \rho \varepsilon + S_i u_i + Q_H \quad (11)$$

$$\text{čia } E = e + \frac{u^2}{2} \quad (12)$$

Šias lygtis papildo skysčio būsenos lygtys, apibrėžiančios skysčio pobūdį, ir empirinės skysčio tankio, klampumo bei šilumos laidumo priklausomybės nuo temperatūros. Realių dujų modeliams, tūrio kondensacijai ir garinimui, kavitacijai, taip pat korėtoms terpėms aprašyti naudojami specialūs modeliai, gauti iš eksperimentų rezultatų. *SolidWorks* skysčių srauto modeliai yra laminariniai ir turbulentiniai. Laminariniai srautai vyksta esant mažoms *Reynoldso* skaičiaus reikšmėms, kurios apibūdinamos kaip tipinių greičio ir ilgio skalių, padalytų iš kinematinės klampos, sandauga. Kai *Reinoldso* skaičius viršija tam tikrą kritinę vertę, srautas sklandžiai pereina į turbulentinį tekėjimą.

Turbulentinio tekėjimo atveju yra skaičiuojamos diferencialinės lygčių sistemos pagal modifikuotą k - ε turbulencijos modelį su slopinimo funkcijomis, kurias 1981-aisias pasiūlė *Lam-Bremhorst*. Šios lygtys (13-18) aprašo laminarinius, turbulentinius ir pereinamuosius homogeninių skysčių srautus:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \mu_t P_B \quad (13)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \rho \varepsilon u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} + \left(f_1 \tau_{ij}^R \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + C_B \mu_t P_B \right) - f_2 C_{\varepsilon 2} \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (14)$$

$$\text{čia, } \tau_{ij} = \mu s_{ij}; \tau_{ij}^R = \mu_t s_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}; s_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \quad (15)$$

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \quad (16)$$

kai: $C_\mu = 0.09$; $C_{\varepsilon 1} = 1.44$; $C_{\varepsilon 2} = 1.92$; $\sigma_k = 1$; $\sigma_\varepsilon = 1.3$; $\mu_B = 0.9$;

$C_B = 1$ jei $P_B > 0$; $C_\mu = 0$ jei $P_B < 0$;

Turbulentinio srauto klampumas apskaičiuojamas taip:

$$\mu_t = f_\mu \cdot \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} \quad (17)$$

Lam-Bremhorst slopinimo funkcija:

$$f_\mu = (1 - e^{-0.025 R_y})^2 \cdot \left(1 + \frac{20.5}{R_t} \right) \quad (18)$$

$$\text{čia, } R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu}; R_t = \frac{\rho k^2}{\mu \varepsilon}$$

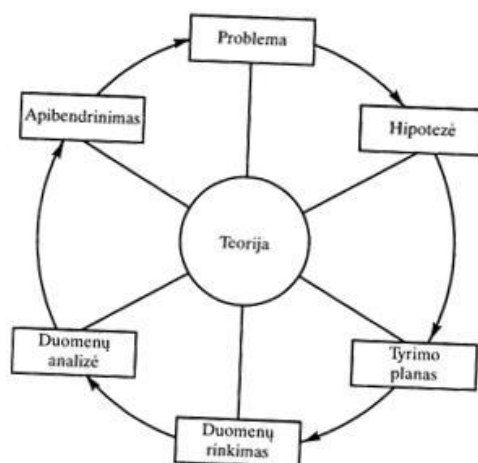
Konkreči CFD skaičiavimo užduotis yra apibrėžiama jos geometrija, medžiagų savybėmis ir kraštinėmis sąlygomis. Visi užduoties duomenys yra tiesiogiai apibrėžti pagrindiniame CAD modelyje ir priklausomai nuo uždavinio struktūros yra parenkama atitinkamų lygčių, ar jų sistemų kombinacija. Tyrinėjant fluidų srautus skaitiniais metodais, tyrėjas niekada nežino kokį formulių ir funkcijų rinkinį panaudos kompiuterinė programa konkrečiam uždaviniui išspręsti, ypač jei tas uždavinys kompleksinis. Būtent tokio tipo uždavinį ir sprendžiu šiame tiriamajame darbe.

2. Tyrimo samprata ir modelis

Mokslinę metodologiją sudaro du komponentai – bendrieji mokslinio metodo principai ir pasirinktos specialybės specializuoti metodai, o pergalingas derinys mokslininkams yra išmanyti abu komponentus [17]. Mokslo publikacijose randama įvairių mokslinių metodų modelių, tačiau bendrai jie yra apibrėžiami kaip nuolatinis, nesibaigiantis ir vis papildantis žinias procesas, apimantis mus supančios aplinkos stebėjimus. Žmonės iš prigimties yra smalsūs, todėl jiems nuolat kyla įvairių klausimų apie tai, ką mato ar girdi, kelia hipotezes ir samprotauja – kodėl viskas yra taip, kaip yra. Tiksliausiai reiškinius paaškinančios hipotezės ateityje lemia prognozes, kurias galima išbandyti praktiniais būdais. Labiausiai tikėtinų hipotezių patikrinimas yra pagrįstas kruopščiai kontroliuojamais eksperimentiniais ar moksliniais tyrimais. Analizuojant atliktų eksperimentų rezultatus stebima ar jie atitinka prognozes. Pirminę hipotezę galima patikslinti, pakeisti, išplėsti ar net atmesti. Jeigu viena ar kita hipotezė tampa labai pagrįsta, aiški ir daug apimanti, tai ji gali būti naudojama kaip dėsnis [18].

Žinių perteikimas yra daug daugiau nei faktinė informacija (mokslo žinios), kurią mokslas turi perduoti studentams, bet tokia informacija, kuri leidžia studentams mokytis save, mokslo ir technologijų klausimais savo amžiaus laikotarpyje. Šioje mokslo stadijoje yra svarbu suvokti mokslinio realizmo teiginį – mokslinis (tyrimo) metodas suteikia racionalų priėjimą prie fizinės tikrovės, sukurdamas prielaidą objektyvių žinių gavimui. Moksle kiekvieno individo realistiniai įsitikinimai turi atitikti tikrovę, nes realybė neatsiranda laipsniais (laipsniniu rodikliu), tiesiog gamtos reiškinys ar kūnas, arba egzistuoja, arba neegzistuoja. Toks realistinis asmens mąstymas pageidautinas mokslo pasaulyje.

Mokslinis tyrimas – tai nustatyta veiksmų seka, kuri remiasi moksliniais principais ir turi būti atlikta norint rasti atsakymą į kokios nors srities mokslinį klausimą (pvz. „kodėl taip yra?“). Su keletu skirtumų (kartais išimčių) ši seka yra panaši visose mokslo srityse. Dažnai tyrimo sekos žingsniai yra labiau laikomi principais ir neprivalo griežtai sekti nurodyta tvarka [17]. Kaip teigia nacionalinės mokslo premijos laureatė prof. R. Žukauskienė „Pagrindinis mokslinių tyrimų tikslas – gauti naujos informacijos apie tuos procesus ar reiškinius, kuriuos norime tirti, ir, remiantis šiais tyrimais, juos panaudoti, prognozuoti bei valdyti, arba praktiškai pritaikyti.“ [19]. Atliekant mokslinį tyrimą yra gaunami mokslinės veiklos rezultatai – naujos žinios apie tiriamuosius objektus. Yra skiriamos tokios pagrindinės mokslinio tyrimo stadijos (žr. 13 pav).



13 pav. Mokslinio tyrimo stadijos [19]

3. Tyrimo eiga

Skaičiuojamosios skysčių ir dujų dinamikos (CFD) uždaviniai praktikoje yra plačiai naudojami, nes pasinaudojus skaitiniais metodais galima suskaičiuoti net sudėtingas sistemas. Tiesa, norint kokybiškai išspręsti tokius uždavinius, tam yra reikalingi itin galingi kompiuteriai ir aukštos kvalifikacijos specialistai [20], [21]. Pastarieji turi išmanyti ne tik kompiuterinės programos ypatumus, bet ir pasižymėti analitiniu mąstymu bei gerai žinoti hidraulikos dėsnius ir teoremas.

Šiame darbe atliksiu penkias skirtingas srautų analizes, palyginsiu jas tarpusavyje. Pradinius skaičiavimus, remiantis ankstesnių panašaus tiriamojo objekto dydžio ir tipo simuliacijų patirtimi, ribosiu ties 300 sekundžių (5 minutės). Manau, tai yra pakankamas laiko tarpas pamatyti objektyvius duomenis ir juos įvertinti. Geriausią atvejį panagrinėsiu išsamiau ir, jeigu reikės, atliksiu tolimesnės eigos prognozę. Tam pasinaudosiu *Microsoft* sukurtu įrankiu *Forecast*.

3.1. Tiriamos aplinkos modeliavimas

Visi tyrimai ir atvejo analizės prasideda nuo tiriamojo objekto ar jo supaprastinto modelio sukūrimo. Mano tiriamasis objektas yra didelių gabaritų (4 x 0,5 x 0,4 m), todėl jis nebus tiriamas realiomis sąlygomis ar sumažintu modeliu laboratorijoje. Pasinaudodami šiuolaikine kompiuterine modeliavimo ir skaitinio skaičiavimo programa *SolidWorks*, virtualioje erdvėje tirsime šiluminio perdavimo ir šilumos judėjimo procesus. Tam, kad būtų galima atlikti išsamią analizę, visų pirma, turime sumodeliuoti tiriamąjį objektą. Žinoma, šis modelis turi skirtis nuo realaus, jį supaprastinant taip, kad būtų galima atlikti kokybiškus skaičiavimus, išvengti rezultatų iškraipymų dėl daugybės smulkių detalių ir jų tarpusavio ryšių, tačiau privalome įvertinti visus fizikinius parametrus, tokius kaip: medžiagų savybės, temperatūra, oro greitis, konvekcija ir pan. Supaprastintas modelis leidžia žymiai optimaliau atlikti skaičiavimus baigtiniais elementais ir sutaupyti daug laiko, ypač nagrinėjant didelius objektus ir/ar sprendžiant kompleksinius uždavinius.

Programos *SolidWorks* 3D modeliavimo aplinkoje sukuriame pirminį kameros modelį su dviem oro tiekimo ir ištraukimo kanalais, taip kaip nurodyta pradinėse sąlygose. Kaitinimo spiralė pasirinkta iš pramoninės kaitinimo įrangos tiekėjo UAB „Kuprė“. Pasirinkta kaitinimo spiralė yra lengvai lankstoma į norimą formą, yra įvairių galingumų (žr. 14 pav.), o maksimali darbinė temperatūra siekia 630 °C [22]. Pradinės sąlygas atitinkantis kaitinimo elementas yra 1500 W, kurios ilgis 1610 mm, skersmuo – 6,4 mm.



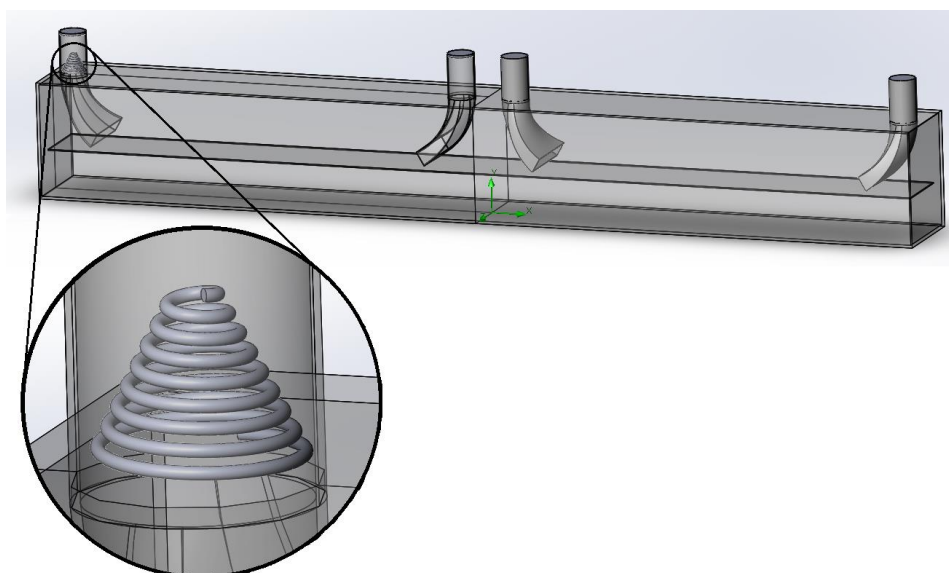
GP ir GPN tipai

Tipas	Įtampa, V	Galingumas, W	Vamzdelio medžiaga	Ilgis, mm	Skersmuo, mm
01.123	230	800	Cr/Ni	1110	6.4
01.241	230	1000	Cr/Ni	1055	6.4
02.042	230	2000	Cr/Ni	1600	8.5
02.071	230	800	Cr/Ni	735	6.4
02.082	230	1000	Cr/Ni	770	6.4
02.211	230	500	Cr/Ni	850	6.4
02.221	230	630	Cr/Ni	710	6.4
02.231	230	800	Cr/Ni	850	6.4
02.251	230	2000	Cr/Ni	1750	8.5
02.261	230	2000	Cr/Ni	1900	8.5
02.521	230	1500	Cr/Ni	1610	6.4
03.271	230	1500	Cr/Ni	1700	8.5

	GP	GPN
Kaitinimo el. skersmuo	Standartiniai: 6.5, 8.0, 10.0, 12.5, 16, 20 (mm) Coliniai: 1/4", 3/8", 1/2", 5/8", 3/4" Pagal užsakymą: nuo 6.0 iki 50 (mm)	
Skersmens paklaida	-0.02 (mm) -0.08 (mm)	+0.2 (mm)
Ilgis	20 - 1000 (mm)	
Ilgio paklaida	±1,5 %	
Įtampa	12 - 380 (V)	
Paviršiaus apkrova	35 W/cm ²	5 W/cm ²
Maksimali temperatūra	630 °C	
Galingumas	50 - 3000 W	
Galingumo paklaida	+5 % -10 %	
Vamzdžio medžiaga	Plienas Cr-Ni 1H18N9T	
Minimalus nešyldomų zonų ilgis	- dugnelio pusėje: 4 mm - izoliatoriaus pusėje: 6 mm	

14 pav. Kaitinimo elementų parametrai [22]

Pirminiams skaičiavimams kaitinimo elementas yra susukamas į kūginę cilindrinę spiralę taip, kad tilptų į 110 mm skersmens vamzdį. Tokia spiralės susukimo forma pasirinkta išnagrinėjus G. Gimbučio ir kitų autorių, aukštųjų mokyklų vadovyje „Šiluminė technika“ aprašytą šilumos laidumą fluidui aptekant vamzdį [23]. Prasilenkiantys vamzdžiai atiduoda gerokai didesnę šilumos kiekį, nei einantys vienas paskui kitą, pvz.: cilindrinę spiralę. Sumodeliavus visus elementus jie yra surenkami į vientisą sistemą, kurią sąlygoja fiziniai ryšiai ir veiksniai (15 pav.). Vėlesniuose atvejuose analogiška tvarka bus atliekami reikiami 3D modelio pakeitimai įvertinant visus fizinius ryšius tarp atskirų tiriamojo objekto elementų ir keičiant fizinių veiksnių parametrus, tokius kaip oro srauto greitis, kaitinimo elemento galia ir pan.



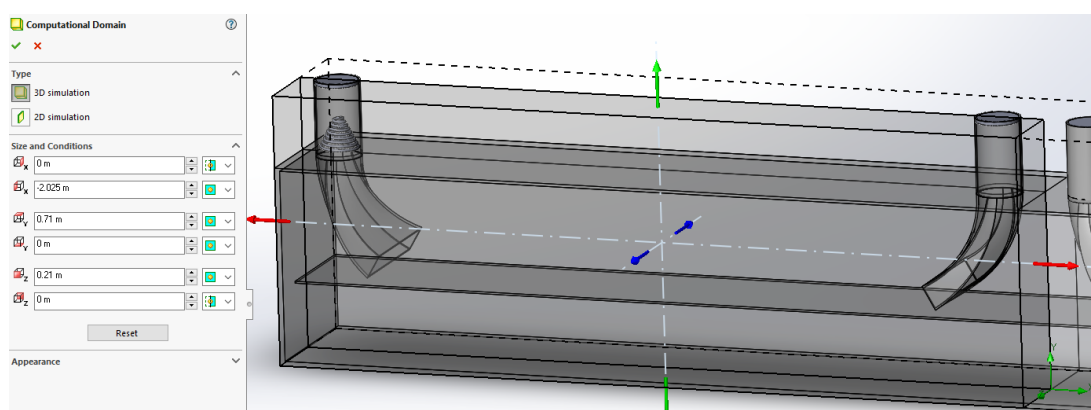
15 pav. Sumodeliuota džiovinimo kamera

3.1.1. Skysčių dinamikos studija ir kraštinės sąlygos

Užbaigę modeliavimo procesą pereiname *Flow Simulation* studiją, ir paleidžiame CFD skaičiavimų aplinkos kūrimo vedlį *Wizard*. Jame nustatome, kad tai bus kompleksinis uždavinys, o visi parametrai aprašomi SI sistemos vienetais. Pasirenkame vidinį srauto tekėjimo uždavinį, (nes oro srautas įteka ir išteka pro vamzdį) nustatome, kad tai yra nuo laiko priklausomas šilumos perdavimo procesas ir užduodame pradines sąlygas:

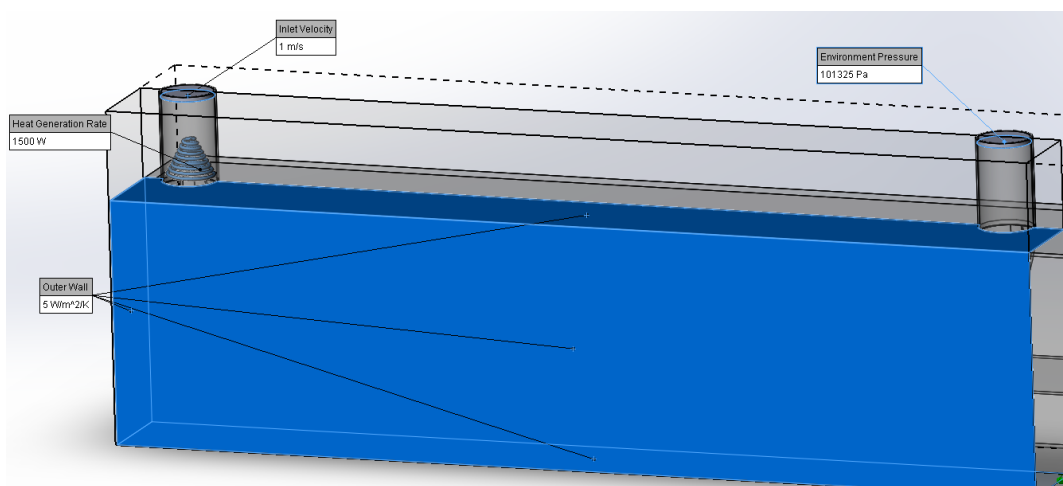
- Aplinkos temperatūra 20 °C;
- Fluido tekėjimas – laminarinis ir turbulentinis;
- Fluido tipas – oras;
- Kietojo kūno medžiaga – nerūdijantis plienas.

Siekdami paspartinti skaičiavimus, tiriamajam objektui pritaikome simetriškumo sąlygas. Kadangi skaičiuojamas objektas turi dvi simetrijos ašis, tai jas abi ir įvertiname. Taip skaičiavimų tūrį sumažiname 4 kartus (16 pav.).



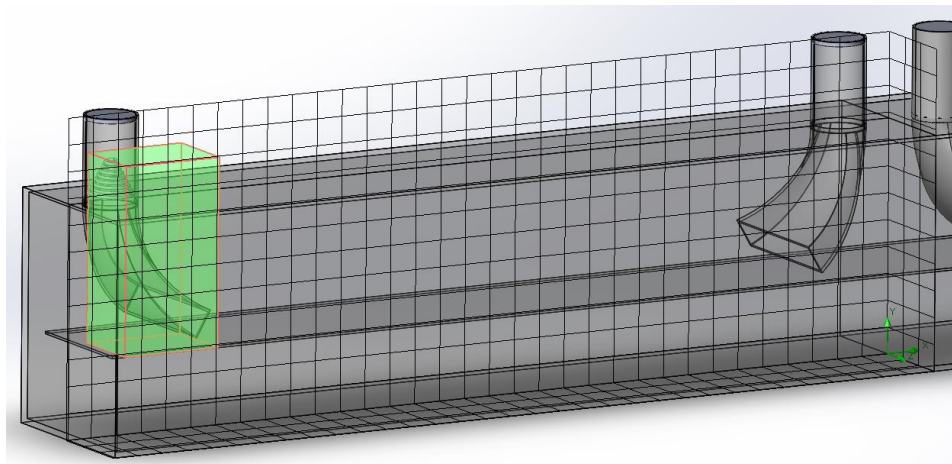
16 pav. Simetrijos sąlygos

Įvertinę tiriamo objekto simetriškumą, nurodome oro srauto tekėjimo kanalus, greitį, kaitinimo elementą ir jo galingumą bei konvekciją per išorines kameros sienes (17 pav.). Kaitinimo elementui apribojame maksimalią temperatūrą ties 600 °C, kaip rekomenduoja gamintojas, ir pažymime, kad srauto skaičiavimai prasidės pasiekus minėtą 600 laipsnių temperatūrą.



17 pav. Kraštinės sąlygos

Baigtinių elementų tinklelį išskirstome į globalųjį (viso tiriamo objekto) ir vietinį (spiralei ir oro kreiptuvui). Toks tinklelio išskaidymas leidžia optimizuoti skaičiavimo greitį ir tikslumą, nes kameros ir kaitinimo spiralės matmenų eilė skiriasi dešimtimis kartų. Globaliajam tinkleliui pasirenkame 4-ąjį lygį (iš septynių), kurio maksimalus elementas yra 11,45 cm. Tai nėra blogas rezultatas įvertinant kameros ilgį 400 cm. Vietinį tinklelį, gaubiantį kaitinimo elementą ir oro kreiptuvą, nustatome kintamo dydžio nuo 3-io iki 6-to dydžio iš 9-ių. Tokio tinklelio maksimalus elementas siektų 2,3 cm, o programa pati automatiškai parinktų tinklelio dydį priklausomai nuo nagrinėjamo objekto dydžio. Aprašytas modelio tinklelis pavaizduotas 18-ame paveiksle.



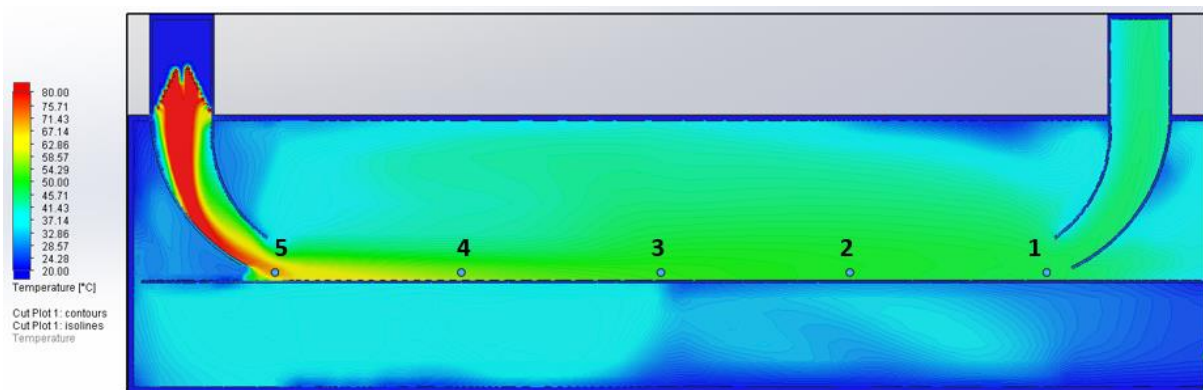
18 pav. Baigtinių elementų tinklelis

Užbaigdami baigtinių elementų tinklelio nustatymus, visiškai aprašome matematinį skaitinį modelį ir jau galime atlikti virtualų tyrimą. Pažymėtina, kad visais atvejais baigtinių elementų tinklelio nustatymai išliks vienodi.

3.2. Srautų analizė Nr. 1

Pirmosios analizės metu tiriamojo objekto kintamųjų reikšmės buvo parinktos pagal pradines sąlygas ir atsižvelgiant į perkamų komponentų gamintojų rekomendacijas. Kaitinimo elemento galingumas 1500 W, maksimali temperatūra – 600 °C; Įėjimo kanalo oro srauto greitis 1 m/s (matuojamas vamzdyje), o išėjimo kanalas atviras t. y. jo slėgis lygus atmosferiniam slėgiui esant normaliomis sąlygomis. Išėjimo kanalui nenaudojame priverstinio ištraukimo, nes tiriamam įrenginiui nėra reikalinga stipri oro cirkuliacija. Oro judėjimas reikalingas tik toks, kad kameroje nesikondensuotų drėginamųjų klijų garai, todėl remiantis kai kuriais analogiško veikimo įrenginiais naudojame tik priverstinį oro tiekimą, o tai leidžia sutaupyti energijos sąnaudas. Pažymėtina, jog oro ištraukimo kanalas visais tyrimo atvejais bus be priverstinio ištraukimo. Naudojame vieną kaitinimo elementą, o įėjimo ir išėjimo kanalų vidiniai skersmenys $d = 110 \text{ mm}$.

Pirmoji simuliacija atitiko 300 sekundžių fizinio (realaus) proceso laiko, skaičiuojamo nuo tada, kai kaitinimo elementas pasiekia 600 laipsnių pagal Celsijų ribą. Kameros skerspjūvio termograma pavaizduota 19-ame paveiksle. Jame matyti ir penki charakteringi taškai, kuriuose yra matuojama tiksli oro temperatūra prie drėginamos plėvelės paviršiaus. Jie išdėstyti išilgai kameros 35-37 cm tarpusavio atstumu. Temperatūra nėra matuojama ne darbo zonoje t. y. už oro kreiptuvų. 19-to paveikslo temperatūros skalė yra sugraduota nuo 20 °C (mėlyna spalva) iki 80 °C (raudona spalva). Vertės viršijančios 80 laipsnių pagal Celsijų ribą taip pat žymimos raudona spalva.



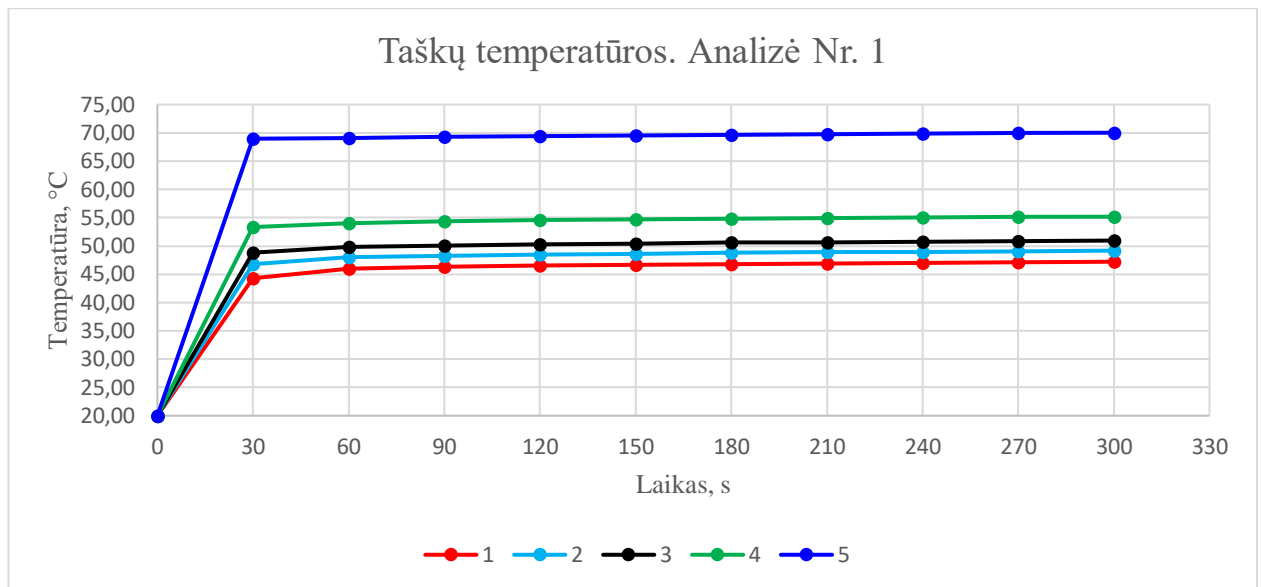
19 pav. Kameros skerspjūvio termograma po 300 s. Analizė Nr. 1

Atlikus pirmąją oro temperatūros pasiskirstymo analizę, reikiama temperatūra kameros skerspjūvyje buvo pasiekta tik viename kontroliniame taške iš penkių. Tikslios kontrolinių taškų oro temperatūros vertės pateiktos 2-oje lentelėje. Temperatūra buvo matuojama kas 30 sekundžių.

2 lentelė. Kontrolinių taškų vertės po 300 s. Analizė Nr. 1

Taškų Nr.	Laikas, s / Temperatūra, °C										
	0 s	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s	210 s	240 s	270 s	300 s
1	20.00	44.34	45.98	46.28	46.57	46.71	46.83	46.92	47.01	47.11	47.22
2	20.00	46.81	47.98	48.25	48.52	48.64	48.80	48.88	48.96	49.08	49.18
3	20.00	48.81	49.79	50.06	50.33	50.45	50.58	50.68	50.76	50.90	50.96
4	20.00	53.31	54.05	54.31	54.57	54.67	54.82	54.91	54.99	55.10	55.17
5	20.00	68.93	69.06	69.26	69.46	69.54	69.65	69.77	69.88	69.95	70.02
Vidurkis	20.00	52.44	53.37	53.63	53.89	54.00	54.14	54.23	54.32	54.43	54.51

Iš lentelėje pateiktų duomenų matome, kad arčiausiai oro tiekimo kanalo esantis taškas jau per pirmąsias 30 sekundžių pasiekia reikiamą temperatūrą ir ją išlaiko visos simuliacijos metu. Tuo metu likusieji taškai per visą simuliuojamą laikotarpį nepasiekia net minimalios reikšmės. Pirmoji simuliacija taip pat parodė, kad nėra efektyvu naudoti vieną kaitinimo spiralę, nes oro temperatūra per pirmuosius 35 centimetrus krenta 14-15 laipsnių, o tarp tolimesnių taškų - tik 2-3 laipsnius. Taškų temperatūros kitimo grafikas pavaizduotas 20 pav. Nesunku pastebėti, kad per pirmąją minutę oro temperatūra pasiekia 94-98 % temperatūros esančios simuliacijos pabaigoje. Zonos, esančios toliau nuo spiralės, pasiekia mažesnę išilimą, nei esančios arčiau.



20 pav. Kameros įšilimo grafikas: 300 s. Analizė Nr. 1

Simuliacijos metu buvo pastebėta, kad kaitinimo elementas savo darbinę temperatūrą pasiekia stebėtinai greitai, todėl buvo atliktas išsamesnis jo galios tyrimas aprašytais sąlygomis: darbo agento galia 1500 W, oro srauto greitis 1 m/s, aplinkos temperatūra 20 °C. Tyrimo metu nustatėme, jog kaitinimo elementas savo rekomenduojamą 600 °C darbinę temperatūrą pasiekia apytiksliai per 29 sekundes. Turint omenyje, jog tiriamasis objektas yra pramoninės paskirties, tai darbo agento įšilimo greitis turi nykstamai mažą įtaką įrenginio našumui, ir daug svarbiau yra pasiekti gerą įrenginio efektyvumą eksploatacijos metu. Išsamesni galios tyrimo rezultatai yra pateikti 3-ioje lentelėje ir 21-ame paveiksle.

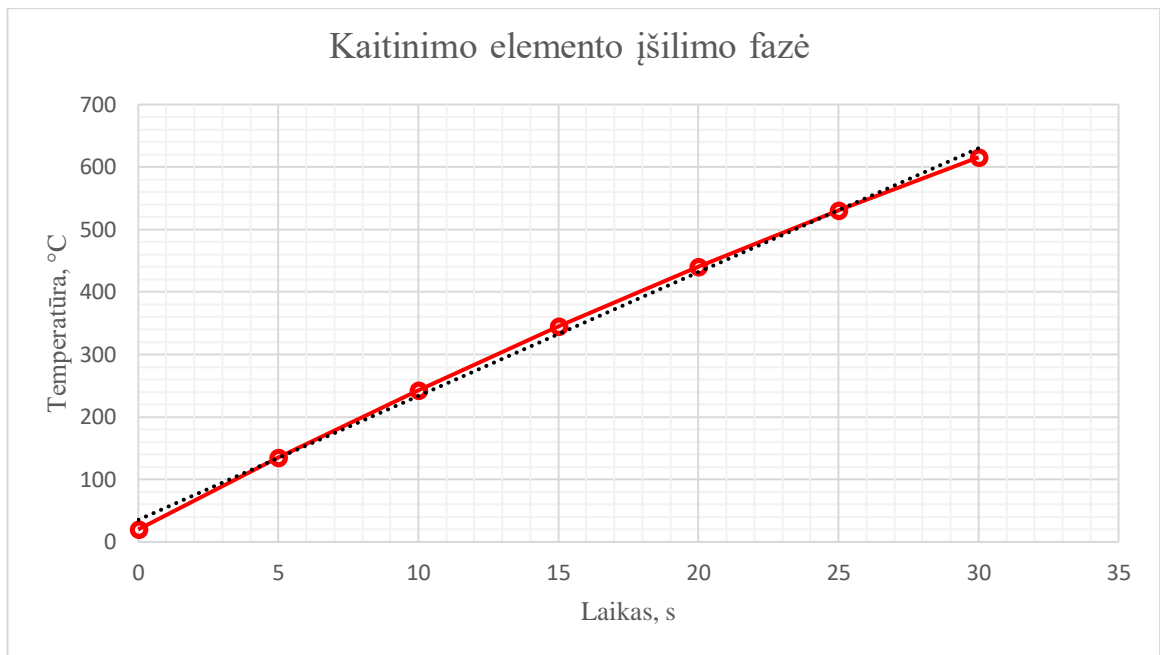
3 lentelė. Kaitinimo elemento temperatūra. Analizė Nr. 1

Laikas, s	Temperatūra (solid), °C
0	20.00
5	134.93
10	242.91
15	344.63
20	440.43
25	530.23
30	615.57

Kaitinimo elemento įšilimo temperatūros grafikas artimas tiesiniam priklausomybei (21 pav.), o tai patvirtina šiluminės galios formulę (19):

$$W = I^2 \cdot R \cdot t \quad (19)$$

čia I – srovės stipris; R – elektrinė varža; t – laikas.



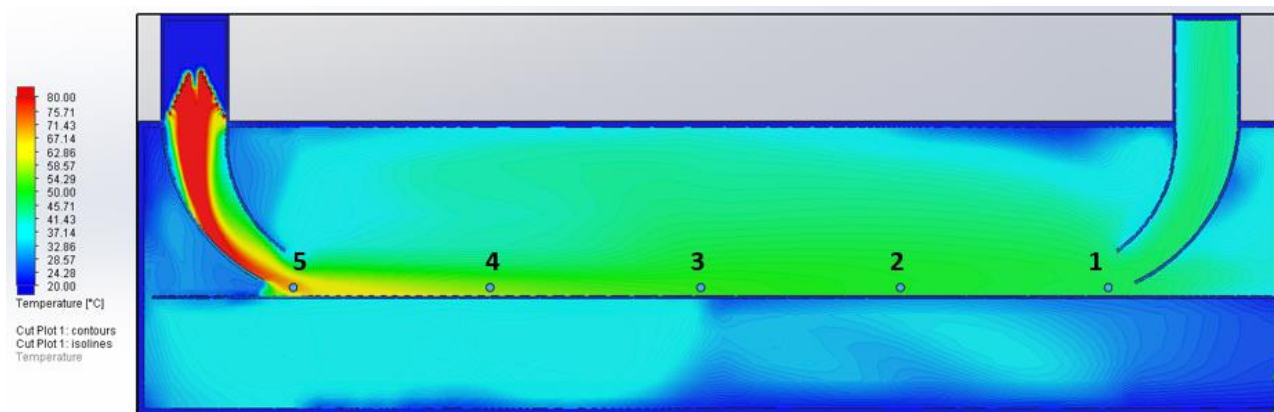
21 pav. Kaitinimo elemento įšilimo fazė. Analizė Nr. 1

Efektyvi šiluminio kūno forma ir didelis galingumas neužtikrina reikiamo oro įšilimo džiovinimo kameros viduje. Pirmojo atvejo modelis parodė, jog 1500 W kaitinimo elementas yra ženkliai per galingas ir neekonomiškas eksploatacijos metu. Tinkamo matematinio modelio ir oro šildytuvų galingumo patikrinimui pakartosime šiuos skaičiavimus, keisdami tik šildytuvo galingumą – jį sumažinsime iki 500 W. Minėtą atvejį plačiau panagrinėsime 3.3 poskyryje.

3.3. Srautų analizė Nr. 2

Antrasis tyrimo modelis yra labai artimas pirmajam. Išlaikyti identiški parametrai pirmajam modeliui, išskyrus, jau minėtą kaitinimo elemento galingumo sumažėjimą iki 500 W, tačiau maksimali temperatūra išliko nepakitusi – 600 °C. Įėjimo kanalo oro greitis – 1 m/s, o išėjimo kanalas atviras ir jo slėgis lygus atmosferiniam slėgiui. Vėl naudojome vieną kaitinimo elementą vienai kameros pusei, o įėjimo ir išėjimo kanalų vidiniai skersmenys – $d = 110 \text{ mm}$.

Antrojo atvejo analizė, kaip ir pirmojo, atitiko 5 minučių fizinio (realaus) laiko proceso simuliaciją. Oro temperatūros skaičiavimai džiovinimo kameros viduje startavo, kai kaitinimo elementas pasiekė 600 laipsnių pagal Celsijų ribą. Antrojo atvejo kameros skerspjūvio termograma pavaizduota 22-ame paveiksle. Jame matyti tie patys penki charakteringi taškai, kuriuose yra matuojama tiksli oro temperatūra prie džiovinamos plėvelės paviršiaus. Taškų pozicija išliko nepakitusi. Termogramos temperatūrinė skalė sugraduota nuo 20 °C (mėlyna spalva) iki 80 °C (raudona spalva). Vertės viršijančios 80 laipsnių pagal Celsijų ribą taip pat žymimos raudona spalva.



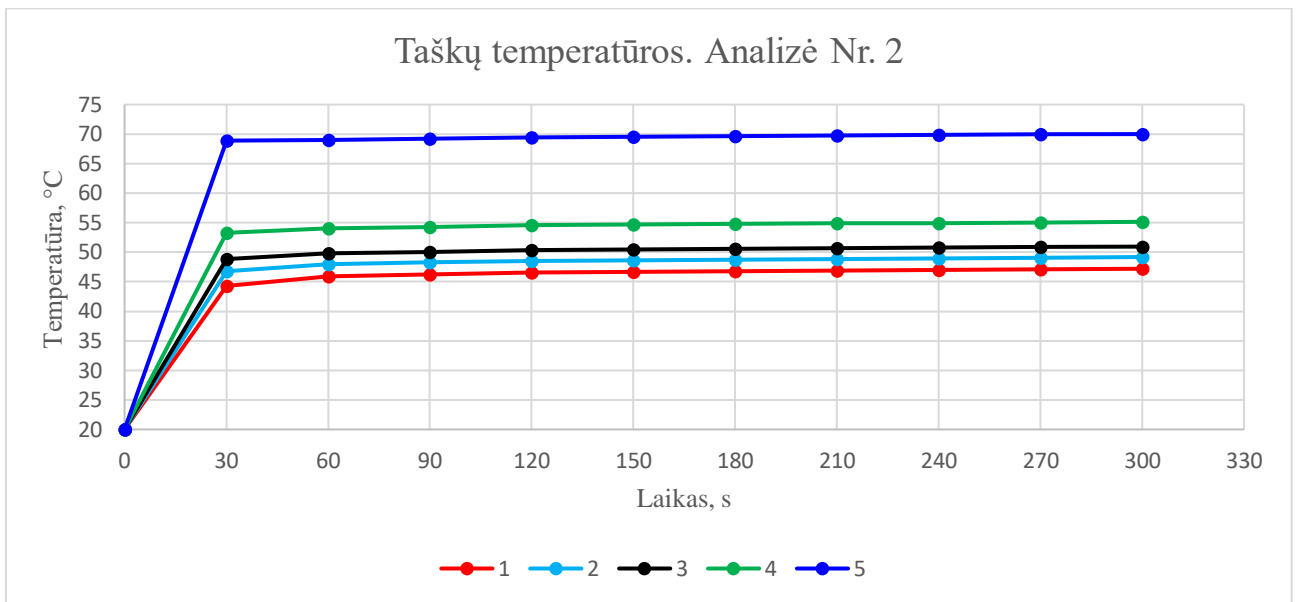
22 pav. Kameros skerspjūvio termograma po 300 s. Analizė Nr. 2

Lyginant antrosios ir pirmosios analizės termogramas, vizualiai pokyčių nematyti. Reikiama temperatūra kameros skerspjūvyje pasiekta tik penktame kontroliniame taške. Tikslios temperatūros vertės taškuose pateiktos 4-oje lentelėje.

4 lentelė. Kontrolinių taškų vertės po 300 s. Analizė Nr. 2

Taškų Nr.	Laikas, s / Temperatūra, °C										
	0 s	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s	210 s	240 s	270 s	300 s
1	20.00	44.32	45.94	46.25	46.55	46.68	46.80	46.90	47.03	47.12	47.20
2	20.00	46.80	47.99	48.26	48.50	48.62	48.78	48.85	48.95	49.07	49.19
3	20.00	48.81	49.77	50.04	50.33	50.46	50.57	50.66	50.74	50.88	50.94
4	20.00	53.29	54.01	54.27	54.54	54.65	54.79	54.89	54.96	55.07	55.15
5	20.00	68.89	69.02	69.19	69.40	69.49	69.61	69.72	69.85	69.93	70.00
Vidurkis	20.00	52.44	53.37	53.63	53.89	54.00	54.14	54.23	54.32	54.43	54.50

Antrosios analizės metu užfiksuotos temperatūros reikšmės kontroliniuose taškuose yra itin artimos pirmos analizės rezultatams, ir tai patvirtino hipotezę. Rezultatų skaičiavimo metu iš esmės turėjome labai panašų šildytuvą, nes jo darbinė temperatūra siekė tuos pačius 600 °C ir nežymiai skyrėsi jo ilgis. Palyginę 2-os ir 4-os lentelių duomenis ženklių skirtumų nepastebime – dažniausiai kintanti dalis yra skaičiai po kablelio. Tai reiškia, kad matematinis modelis sukurtas teisingai, nes simuliuojant dvi itin panašias situacijas rezultatai yra beveik vienodi, tai matosi ir konkrečiose reikšmėse, ir tolydinėje džiovavimo kameros temperatūros kilimo kreivėje (žr. 23 pav.).



23 pav. Kameros įšilimo grafikas: 300 s. Analizė Nr. 2

Didžiausi skirtumai turi išryškėti įšilimo stadijos metu, nes šildytuvų galia skiriasi 3 kartus. Remiantis elektrinės galios formule, (20) darome prielaidą, kad šildytuvas savo darbinę temperatūrą pasieks per triskart ilgesnį laikotarpį, nes galios priklausomybė yra tiesinė. Elektrinės galios lygtis:

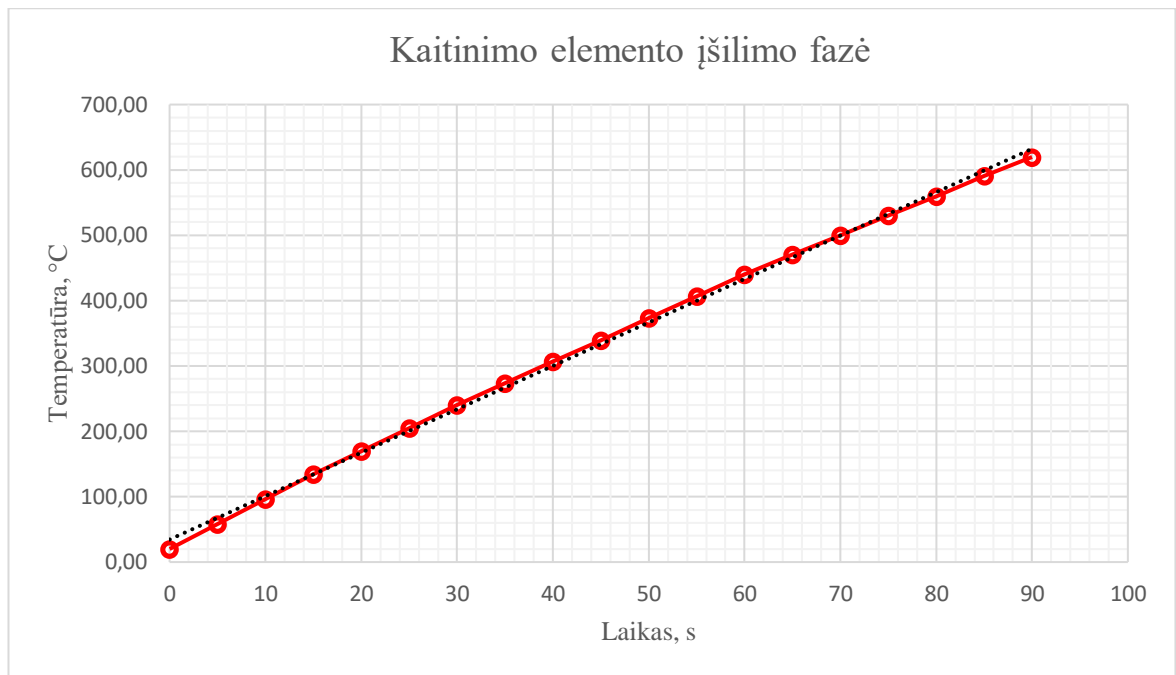
$$P = \frac{A}{t} \quad (20)$$

čia P – elektrinė galia; A – atliktas darbas; t – laikas, per kurį buvo atliktas darbas.

Teorinėms prielaidoms pagrįsti buvo atliktas išsamesnis oro šildytuvo galios tyrimas aprašytais sąlygomis: darbo agento galia 500 W, oro srauto greitis 1 m/s, aplinkos temperatūra 20 °C. Tyrimo metu nustatėme, jog kaitinimo spiralė 600 °C temperatūrą pasiekia per maždaug 86,5 sekundės. Šį rezultatą lygindami su 1500 W galios agregatu, pagrindžiame elektrinės galios tiesinę priklausomybę, nes pastarasis elementas 600 laipsnių pasiekė per 29 sekundes. Su nedidele paklaida – tai yra triskart geresnis rezultatas. Išsamesni galios tyrimo rezultatai yra pateikti 5-oje lentelėje ir 24-ame paveiksle.

5 lentelė. Kaitinimo elemento temperatūra. Analizė Nr. 2

Laikas, s	Temperatūra (solid), °C	Laikas, s	Temperatūra (solid), °C	Laikas, s	Temperatūra (solid), °C
0	20.00	35	273.28	65	470.36
5	58.14	40	306.46	70	500.30
10	96.28	45	339.63	75	530.23
15	134.42	50	373.23	80	560.07
20	169.65	55	406.83	85	590.91
25	204.88	60	440.43	90	619.75
30	240.11				



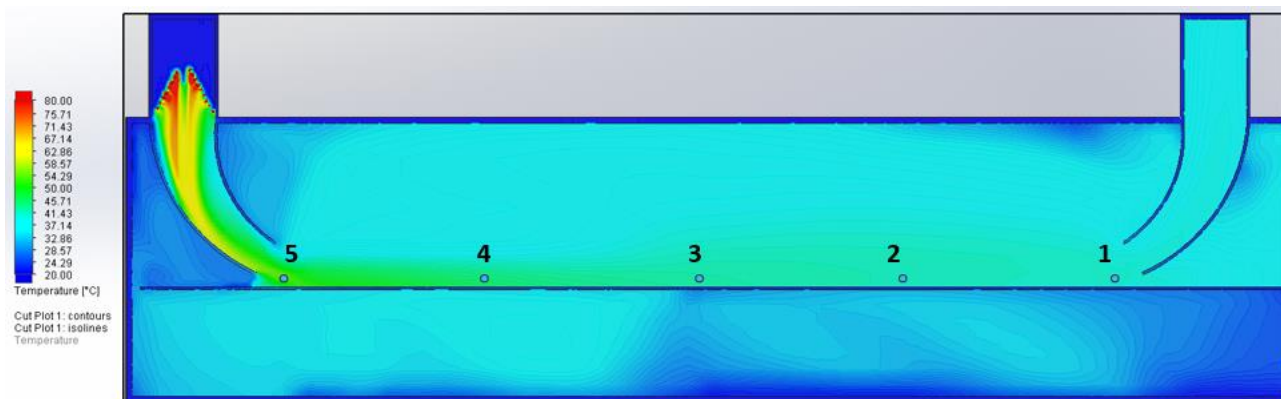
24 pav. Kaitinimo elemento išilimo fazė. Analizė Nr. 2

Taigi, naudodami mažesnės galios šildytuvus, padidinome įrenginio ekonomiškumą eksploatacijos metu, nes išaugo tik išilimo laikas, tačiau bendra kameros temperatūra dėl to pakito nykstamai mažu dydžiu. Tačiau neįgyvendinome esminės sąlygos – neužtikrinome reikiamų temperatūrų džiovinimo kameros viduje. Sekančiam tyrimui didinsime tiekiamo oro greitį iki 2 m/s ir stebėsime, ar didesnis oro srauto greitis leis greičiau pernešti karštą orą į šalto oro zonas, šiam dar nespėjus atvėsti ir taip pasiekti reikiamą darbinę temperatūrą. Tačiau yra įmanomas ir priešingas efektas, kurį aprašo mokslininkai G. Gimbutis ir kt. aukštųjų mokyklų vadovyje „Šiluminė technika“ [23]. Jie teigia, jog esant greitesniam oro dalelių judėjimui, šiuo atveju oro srauto iš difuzoriaus į kamerą, ir greitesnės jų sklaidos (dėl tūrių skirtumo), bus prarandama daugiau dalelių energijos – temperatūros.

3.4. Srautų analizė Nr. 3

Trečiosios analizės metu tiriamojo objekto kintamųjų reikšmės buvo tokios: kaitinimo elemento galingumas 500 W, maksimali temperatūra – 600 °C; Įėjimo kanalo oro srauto greitis 2 m/s (matuojamas vamzdyje), o išėjimo kanalas atviras į atmosferą. Naudojome vieną kaitinimo elementą vienai džiovinimo kameros pusei, o įėjimo ir išėjimo kanalų vidiniai skersmenys $d = 110 \text{ mm}$. Taigi, antrasis ir trečiasis atvejai skiriasi tik oro tiekimo greičiu.

Trečiojo atvejo, kaip ir pirmųjų dviejų, simuliacija atitiko 300 sekundžių realaus proceso laiko, o kameros skerspjūvio termograma pavaizduota 25-ame paveiksle. Jame jau matyti ryškesni pokyčiai: oro temperatūra visame kameros tūryje gerokai vienodesnė, tačiau bendra temperatūra – žemesnė. Čia pasireiškė dalelių sklaidos efektas: dėl greitesnės dalelių sklaidos orui išeinant iš kreiptuvo ir pasklindant po kamerą, oro srauto temperatūra sparčiai krenta žemyn. Tyrimo metu kontrolinių taškų pozicija išliko nepakitusi. 25-to paveikslo temperatūros skalės sugradavimas, taip pat nepakito – nuo 20 °C (mėlyna spalva) iki 80 °C (raudona spalva). Temperatūra aukštesnė nei 80 laipsnių pagal Celsijų pažymėta raudona spalva.



25 pav. Kameros skerspjūvio termograma po 300 s. Analizė Nr. 3

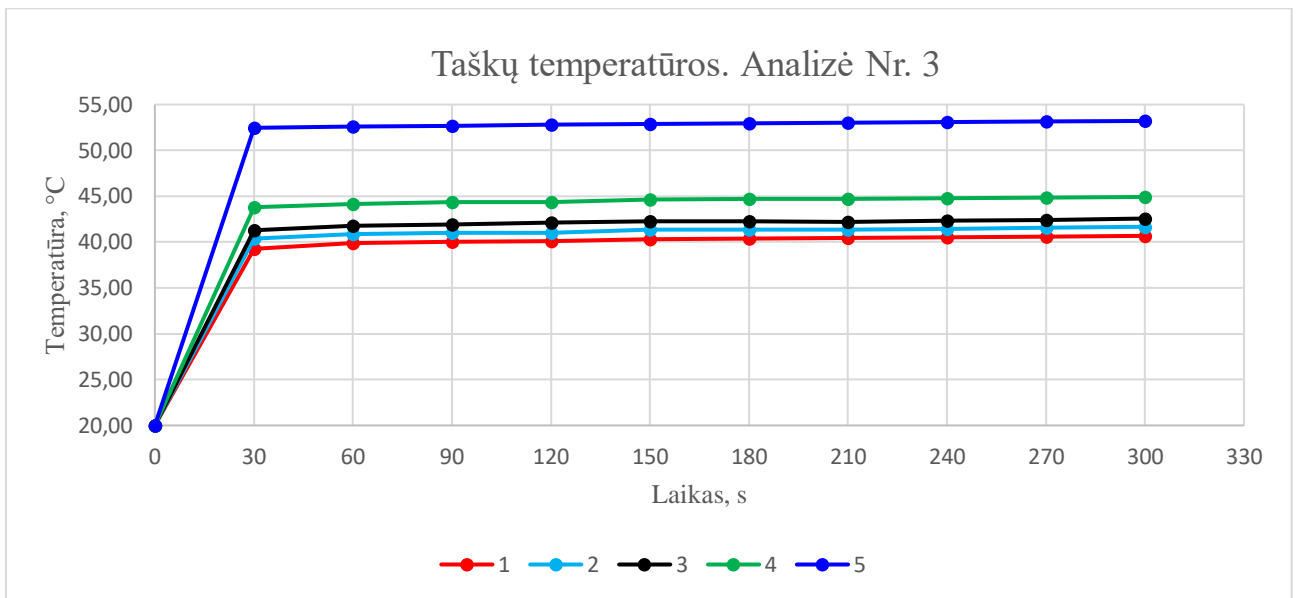
Analizuojant trečiojo tyrimo rezultatus pastebėjome, jog nei viename taške, per visą simuliacijos laiką, nebuvo pasiekta reikiama temperatūra. Tačiau pats oro srautas – tolydesnis ir šiltesnio oro zona formavosi prie plėvelės paviršiaus labai nepasklisdama po visą kameros tūrį. Taip pat prie oro tiekimo kanalo nesiformavo itin aukštos temperatūros zona, kuri galimai galėtų pakenkti plėvelės struktūrai. Temperatūros vertės užfiksuotos kontroliniuose taškuose yra pateiktos 6-oje lentelėje.

6 lentelė. Kontrolinių taškų vertės po 300 s. Analizė Nr. 3

Taškų Nr.	Laikas, s / Temperatūra, °C										
	0 s	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s	210 s	240 s	270 s	300 s
1	20.00	39.27	39.88	40.05	40.07	40.32	40.38	40.45	40.51	40.58	40.68
2	20.00	40.40	40.87	41.02	41.04	41.33	41.38	41.34	41.45	41.56	41.67
3	20.00	41.30	41.76	41.92	42.12	42.25	42.29	42.19	42.32	42.44	42.57
4	20.00	43.80	44.15	44.33	44.34	44.64	44.70	44.68	44.76	44.82	44.92
5	20.00	52.47	52.57	52.70	52.82	52.90	52.98	52.99	53.09	53.16	53.21
Vidurkis	20.00	43.45	43.85	44.00	44.08	44.29	44.35	44.33	44.43	44.51	44.61

Iš kontrolinių taškų verčių matome, jog arčiausiai ir toliausiai oro tiekimo kanalo esančiuose taškuose temperatūros skirtumas buvo vos 12,5-13,2 laipsnio, kai pirmosios ir antrosios simuliacijų metu tarp dviejų pirmųjų taškų – net 14-15 laipsnių skirtumas. Lyginant temperatūras tarp pirmo ir ketvirto taškų, jos pokytis siekia vos 4-4,5 laipsnio. Tai yra labai geras sklaidos rezultatas, bet tokios koncepcijos problema – per žema temperatūra kameros viduje. Norint įgyvendinti šį variantą, reikėtų naudoti aukštesnės darbinės temperatūros arba tinkelio tipo oro šildytuvus. Tačiau tokių šildytuvų ilgaamžiškumas gerokai trumpesnis už naudojamų vientisos struktūros, be to, pastarieji yra gerokai brangesni.

Temperatūros kitimo grafike, pavaizduotame 26 pav., nesunku pastebėti, jog jau pirmosiomis 30 sekundžių oro temperatūra pasiekia net 96,5-98,6 %, temperatūros esančios simuliacijos pabaigoje. Tai leidžia daryti prielaidą, kad šio atvejo kameroje niekada nepasieksime reikiamos oro temperatūros.

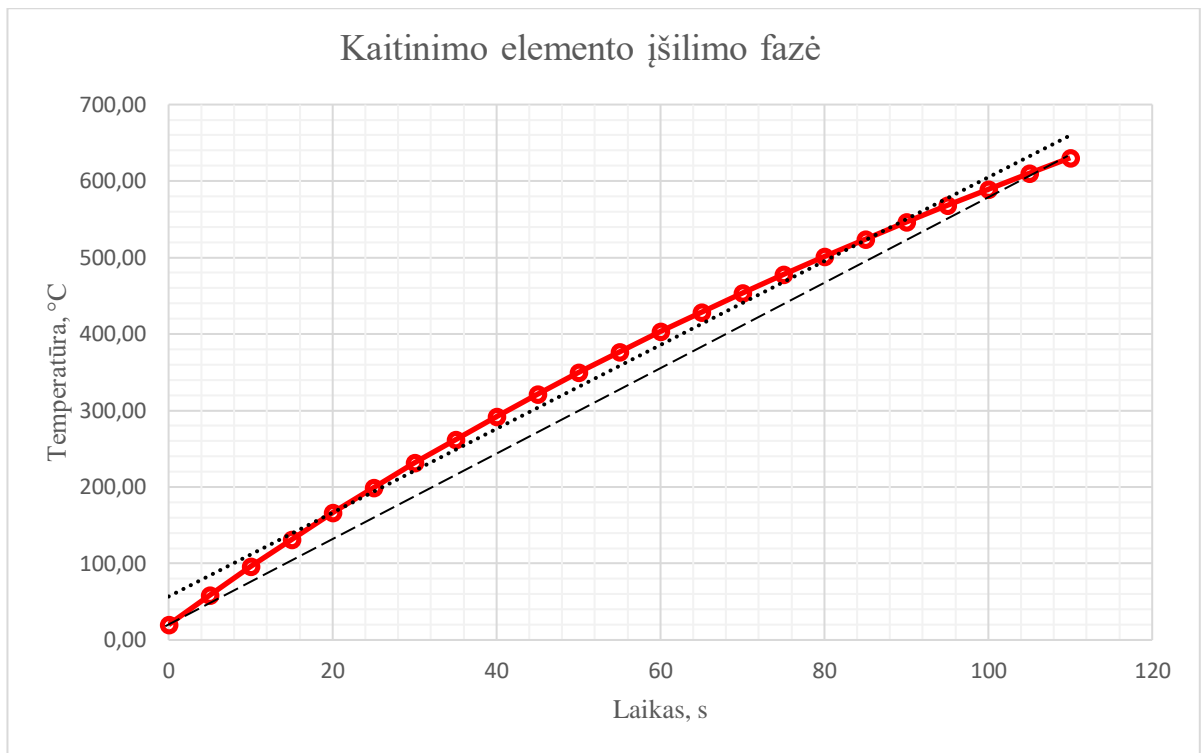


26 pav. Kameros įšilimo grafikas: 300 s. Analizė Nr. 3

Kadangi naudojame mažesnės galios, 500 W kaitinimo elementą, o oro srauto greitį padidinome iki dviejų metrų per sekundę, yra būtina patikrinti, kaip elementas pasiekia savo darbinę temperatūrą. Padidėjęs oro srauto greitis spartina temperatūros atidavimą į aplinką (nuo spiralės) ir jos išnešiojimą per visą kameros tūrį. Dėl šių priežasčių, kaitinimo elemento įšilimo laikas turėtų išsitęsti. Taigi, patikriname, ar pasikeitus darbo sąlygoms, darbo agento įšilimo laikas bus priimtinas, atsižvelgiant į objekto pramoninę paskirtį. Išsamesnius tyrimo rezultatus žiūrėti 7-oje lentelėje ir 27 paveiksle.

7 lentelė. Kaitinimo elemento temperatūra. Analizė Nr. 3

Laikas, s	Temperatūra (solid), °C	Laikas, s	Temperatūra (solid), °C	Laikas, s	Temperatūra (solid), °C
0	20.00	40	292.47	80	501.23
5	58.66	45	321.68	85	524.13
10	95.86	50	349.81	90	546.43
15	131.69	55	376.98	95	568.19
20	166.19	60	403.19	100	589.43
25	199.46	65	428.58	105	610.19
30	231.54	70	453.47	110	630.46
35	262.35	75	477.65		



27 pav. Kaitinimo elemento įšilimo fazė. Analizė Nr. 3

Padidėjus oro srauto greičiui, pastebime įdomų reiškinį: teoriškai turėjęs būti tiesinis temperatūros kilimo grafikas virto panašiu į laipsninės šaknies funkciją. Grafike taškinė linija žymi simuliacijos metu gautų reikšmių tiesinę priklausomybę, o punktyru pažymėta linija jungia pradinį ir galinį taškus, išryškindama netiesinį temperatūros kilimą. Remiantis simuliacijos duomenimis, kaitinimo elementas 600 laipsnių pagal Celsijų ribą kerta per 104,7 s, tai yra tinkamas rezultatas, nes darbinė temperatūra pasiekama greičiau nei per dvi minutes.

3.5. Srautų analizė Nr. 4

Įvertinus pirmųjų analizių rezultatus, išnagrinėjus, kokiomis sąlygomis esant jie buvo pasiekti ir išklausus kolegų iš termoinžinerijos srities pasiūlymus, buvo nuspręsta padidinti oro kanalų skersmenis. Iš elektroninio šildymo sistemų katalogo buvo pasirinktas standartinis šilumtiekio vamzdis, kurio išorinis skersmuo – 200 mm, o vidinis 160 mm. Primenu, jog pirmųjų analizių vamzdžio vidinis skersmuo buvo 110 mm. Pagal naujo vamzdžio matmenis buvo pakoreguotas ir oro kreiptuvas. Kaitinimo elemento formą iš kūginės spiralės pakeitėme į plokščią spiralę taip, kad geriau išnaudotume visą vamzdžio skerspjūvio plotą. Spiralės galia išliko nepakitusi – 500 W, maksimali temperatūra – 600 °C, tačiau buvo padidintas kaitinimo elementų ir oro tiekimo kanalų skaičius. Naujoje koncepcijoje naudojame po du kaitinimo elementus ir du oro tiekimo kanalus vienai kameros pusei, ir tik vieną oro pašalinimo angą. Įėjimo kanalų oro srauto greitį grąžinome iki 1 m/s (matuojamas vamzdyje), tačiau po tokių pokyčių tiekiamo oro debitas ženkliai pakito. Vien padvigubinus oro tiekimo kanalų skaičių, bendras debitas padvigubėjo, tačiau padidinome ir vamzdžių skersmenis, tai naują tiekiamo oro debitą randame iš 21-os lygybės:

$$Q = A \cdot v \tag{21}$$

čia $A = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ – apskritimo plotas; v – srauto greitis.

Pertvarkome šias dvi lygybes į vieną ir gauname naują debito išraišką (22):

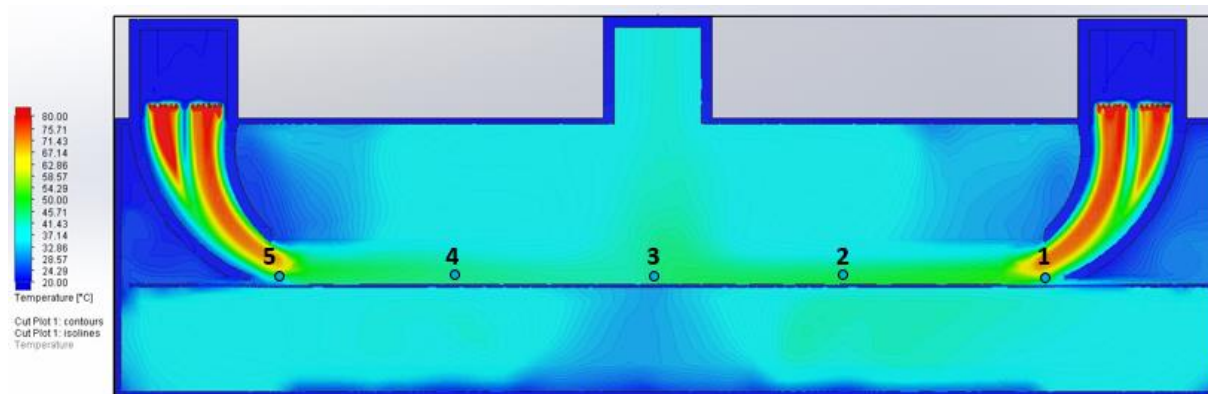
$$Q = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot v}{4} \quad (22)$$

Į debito lygybę įstatę reikšmes, apskaičiuavome, kad esant 160 mm vamzdžio skersmeniui ir 1 m/s srauto greičiui, debitas viename tiekimo kanale lygus:

$$Q_{160} = 0.0201 \text{ m}^3/\text{s} \quad (23)$$

Atvejo su 110 mm skersmens vamzdžiu esant 1m/s srauto greičiui, debitas buvo lygus $0.0095 \text{ m}^3/\text{s}$, tai yra daugiau nei du kartus mažesnis. Vadinasi, šiam atvejui bendrą tiekiamo oro debitą padidinome kiek daugiau negu keturis kartus.

Išėjimo kanalą, kaip ir ankstesniais atvejais, palikome atvirą, tačiau jo skersmuo padidėjo iki 160 mm. Kompiuterinė simuliacija atitiko 300 sekundžių fizinio (realaus) proceso laiko, pradedamo skaičiuoti, kai kaitinimo elementas pasiekia 600 laipsnių pagal Celsijų temperatūrą. Ketvirtojo atvejo kameros skerspjūvio termograma pavaizduota 28-ame paveiksle. Joje esančių charakteringų taškų pozicija liko nepakitusi. Temperatūrinės skalės gradavimas – nuo 20 °C (mėlyna spalva) iki 80 °C (raudona spalva). Vertės, viršijančios 80 laipsnių pagal Celsijų ribą, taip pat žymimos raudona spalva.



28 pav. Kameros skerspjūvio termograma po 300 s. Analizė Nr. 4

Termogramoje matome, jog yra efektyviai apiplaunami kaitinimo elementai. Tolydi temperatūra pasiskirsto per beveik visą vamzdžio skerspjūvį, dideli temperatūros šuoliai natūraliai yra tik palei vamzdžio sienelės ir centre, kur nėra spiralės. Tačiau, atidžiai išstudijavus temperatūrines zonas, pastebime, kad maksimali oro temperatūra oro kreiptuvuose yra gerokai mažesnė, nei pirmosios ir antrosios simuliacijos metu. Žemesnė temperatūra dar ne viskas, nes būtina įvertinti, kad šiuo atveju turime 4 kartus didesnį tiekiamo oro tūrį. Visgi, bendras kameros skerspjūvio vaizdas netenkina, nors ir teikiantis vilčių. Panaudojus po dvi tokias pat 500 W kaitinimo spirales viename vamzdyje, jas išdėsčius vieną po kita, tikėtina – rezultatai būtų džiuginantys ir greitai pasiekta reikiama temperatūra. Tačiau tokios koncepcijos didžiausias minusas – didelė bendra kaitinimo elementų galia – 4 kW, o tai ekonomiškai būtų nenaudinga, lyginant su konkurentų naudojama 2-3 kW galia.

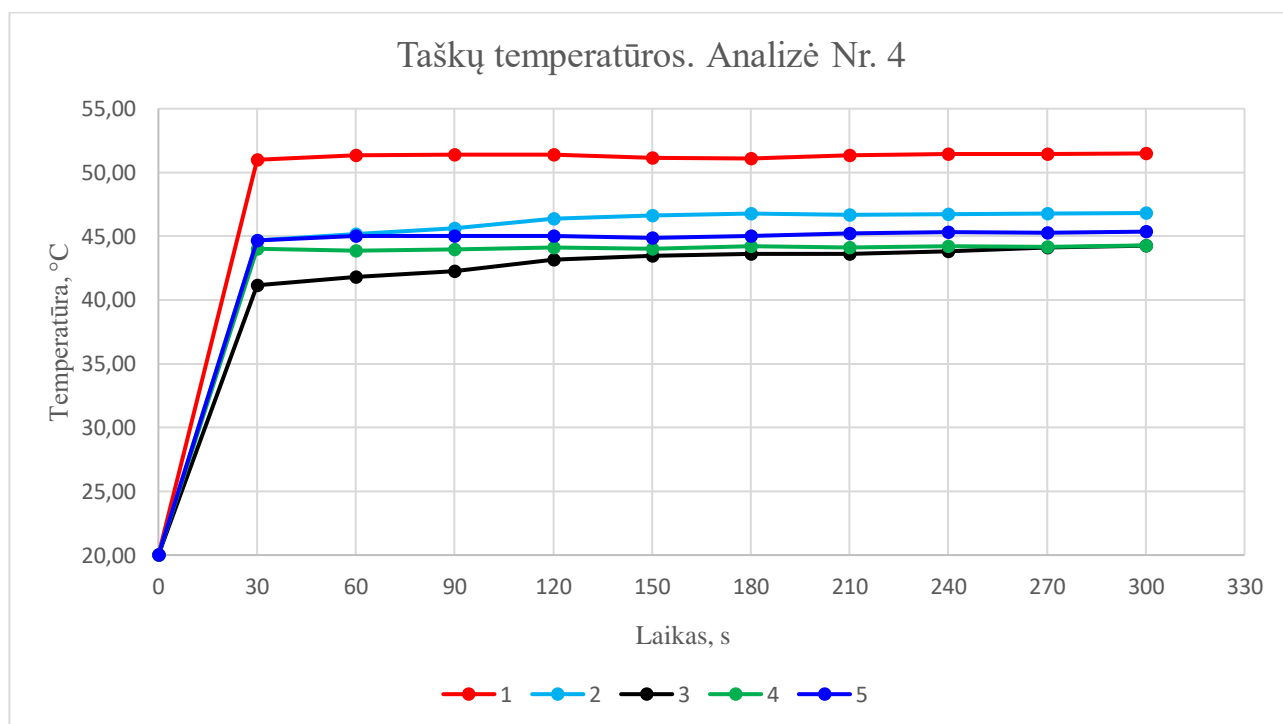
Šios, ketvirtosios, analizės metu komponentų išdėstymas kameroje yra simetriškas oro pašalinimo kanalo išilginiam pjūviui (ties tašku 3). Kontroliniai taškai taip pat išdėstyti simetriškai 3-io taško atžvilgiu ir buvo galima tikėtis apytiksliai vienodų temperatūrų taškuose 2-4 ir 1-5, tačiau konvekcijos įtaka per išorines kameros sienelės, davė ryškesnių pokyčių (žr. 8 lentelė). Kontroliniuose taškuose

oro temperatūra buvo fiksuojama 30-ies sekundžių intervalu, o išmatuotos vertės parodė, kad kraštinių taškų (1 ir 5) temperatūrų skirtumas svyravo intervale – 6,08-6,41 laipsnio ir atitinkamai 0,65-2,58 laipsnio tarp taškų 2 ir 4. Naudojant karšto oro tiekimo iš abiejų galų koncepciją, ženkliai sumažėjo temperatūrų šuoliai išilgai kameros, ypač lyginant su pirmo ir antro atvejo rezultatais, kuriuose temperatūrų skirtumas tarp kraštinių taškų siekė net 22,7-24,6 laipsnio arba kitaip – temperatūros nevienodumas sumažėjo beveik 4 kartus.

8 lentelė. Kontrolinių taškų vertės po 300 s. Analizė Nr. 4

Taškų Nr.	Laikas, s / Temperatūra, °C										
	0 s	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s	210 s	240 s	270 s	300 s
1	20.00	50.98	51.34	51.42	51.38	51.16	51.11	51.35	51.44	51.45	51.49
2	20.00	44.67	45.18	45.61	46.36	46.61	46.79	46.66	46.75	46.77	46.82
3	20.00	41.17	41.83	42.24	43.16	43.48	43.60	43.64	43.82	44.11	44.26
4	20.00	44.02	43.86	43.95	44.14	44.04	44.23	44.11	44.20	44.19	44.28
5	20.00	44.65	45.04	45.01	45.04	44.87	45.03	45.22	45.31	45.29	45.36
Vidurkis	20.00	45.10	45.45	45.65	46.02	46.03	46.15	46.20	46.30	46.36	46.44

Šios analizės metu didžiausi temperatūrų skirtumai buvo fiksuoti ne tarp kraštinių, o tarp 1 ir 3 taškų – nuo 7,23 iki 9,81 °C. Žinoma, tai vis tiek yra labai geras rezultatas temperatūros pasiskirstymo atžvilgiu, lyginant su ankstesnių atvejų rezultatais. Nepaisant fiksuotų gerų sklaidos rezultatų, vis tik nepasiekėme reikiamos temperatūros nei viename taške iš penkių.



29 pav. Kameros įšilimo grafikas: 300 s. Analizė Nr. 4

Temperatūros kitimo grafike – 29-ame paveiksle – aiškiai matome visas fiksuotas temperatūrų reikšmes išsidėsčiusias siaurame diapazone. Išsiskiria tik pirmojo taško vertės, kurios visais atvejais yra apytiksliai 10 °C didesnės. Pučiant orą iš abiejų galų, kameros viduje formuojasi mažo greičio

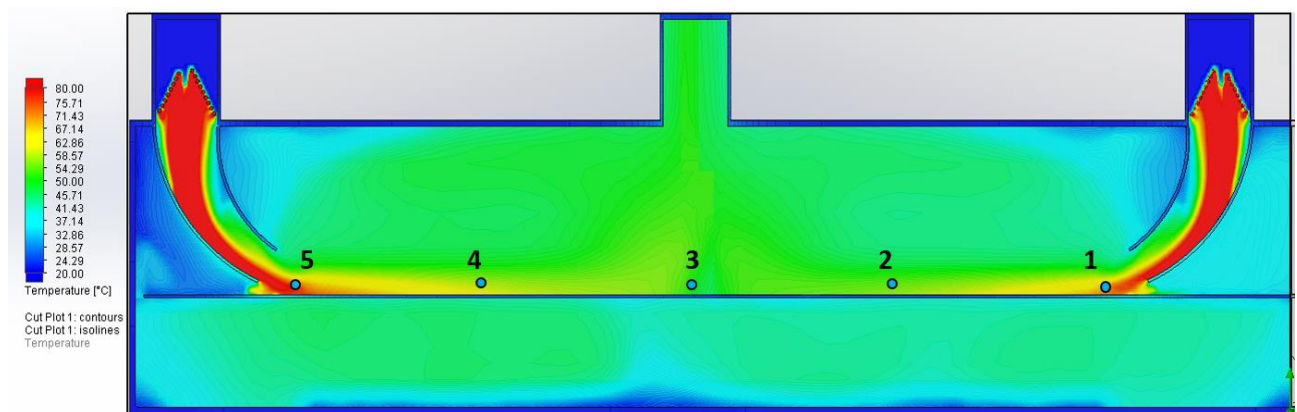
oro sūkuriai – vyksta oro srautų maišymosi procesai. Šiuos procesus puikiai atspindi 29 pav. esančių kreivių ryškesni lūžiai (netolygūs pakilimai ir nusileidimai). Temperatūra, fiksuota kontroliniuose taškuose, ne tik kyla netolygiai, bet ir leidžiasi, ir vėl kyla – vyksta nuolatinis oro masių judėjimo procesas. Taip nuolat maišantis skirtingos temperatūros oro masės, padidėja vandens kondensacijos tikimybė kameros viduje – tai yra nepageidaujamas reiškinys. Vadinasi, turimą koncepciją reikia modifikuoti taip, kad sumažintume oro masių maišymosi procesą, bet kartu padidintume tiekiamo oro temperatūrą.

Kaitinimo elemento įšilimo fazės netikriname, nes, esant panašiomis sąlygomis, jis buvo patikrintas antrąjį analizę (žr. 3.3 poskyrį). Fiksuoti rezultatai buvo daugiau negu patenkinami.

3.6. Srautų analizė Nr. 5

Pertvarkius ketvirtosios simuliacijos metu naudotą džiovavimo kameros struktūrą taip, kad atitiktų antrąjame atvejuje naudojamus galios ir oro srauto parametrus, kurie buvo geriausi iš keturių bandymų, gavome naują tyrimo objektą. Naujosios džiovavimo kameros parametrai yra tokie: kaitinimo elementui gražinome kūginės spiralės formą, o galios parametrai liko nepakitę – 500 W maksimali galia ir darbinė temperatūra – 600 °C. Kaitinimo elementų ir oro tiekimo kanalų kiekį palikome tokį, koks buvo ketvirtoje simuliacijoje – po du vienai kameros pusei. Oro kanalų skersmenį sumažinome iki pradinio – 110 mm, kad sumažėtų įtekančio oro debitas, o kartu sumažėtų vandens garų kondensacijos tikimybė kameros viduje. Oro pašalinimo anga yra per centrą tarp dviejų oro tiekimo kanalų, jos skersmuo $d = 110 \text{ mm}$. Įėjimo kanalų oro srauto greitis 1 m/s (matuojamas vamzdyje). Kadangi naudojame du oro tiekimo kanalus, tai bendras tiekiamo oro tūris yra dukart didesnis už esantį antrame atvejuje, bet 2,11 karto mažesnis nei ketvirtame bandyme.

Kaip ir ankstesnėse simuliacijose skaičiavimų periodas truko 300 sekundžių realaus proceso laiko, skaičiuojamo nuo tada, kai kaitinimo elementas pasiekia 600 °C. Kameros skerspjūvio termograma atvaizduota 30-ame paveiksle. Šio paveikslo temperatūros skalė yra sugraduota nuo 20 °C (mėlyna spalva) iki 80 °C (raudona spalva). Vertės, viršijančios 80 laipsnių pagal Celsijų ribą, taip pat žymimos raudona spalva.



30 pav. Kameros skerspjūvio termograma po 300 s. Analizė Nr. 5

Termogramoje matome, jog oro srautui apiplaukiant kaitinimo elementus, yra suformuojamas aukštos temperatūros oro srautas, kuris baigiasi šiek tiek už kreiptuvų išėjimo angos ir patenka tiesiai į kamerą, efektyviai ją šildydamas. Tolydi temperatūra pasiskirsto per beveik visą vamzdžio skerspjūvį iškart už spiralės ir tolydžiai siaurėja iki pat kameros. Staigių temperatūros šuolių nėra – visur

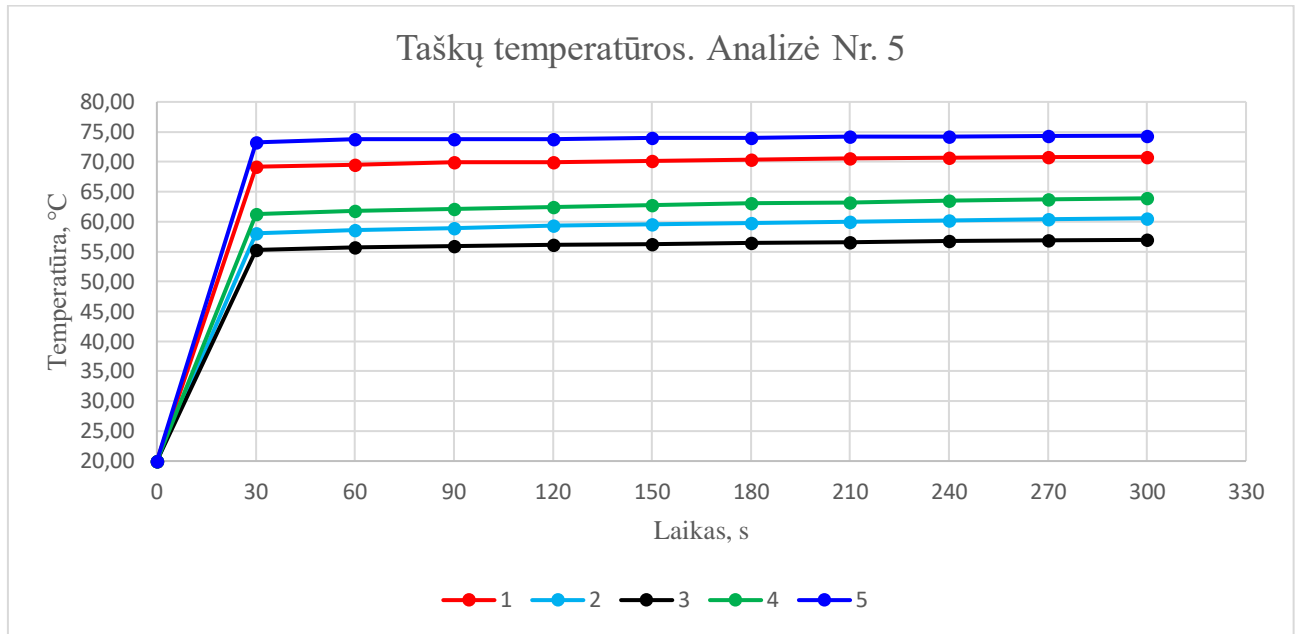
tolydžiai pernešamas šilumos srautas gradiento kryptimi. Nevienodos oro temperatūros kreiptuvo zonoje yra dėl dviejų priežasčių: 1) kaitinimo elementai yra kūginės spiralės formos ir jų susukimo kryptis yra vienoda, todėl spiralės pradžios, pabaigos taškai ir kilimo kampas kreiptuvo atžvilgiu yra nevienodas; 2) kairysis oro kreiptuvas yra prie išorinių sienelių, todėl oras aplink jį greičiau vėsta, o iš vamzdžio karštas oras išeina greičiau. Vėsesnis aplinkos oras, iš vamzdžio išeinančiam oro srautui, sukuria papildomą ištraukimo jėgą – veikia kaip katalizatorius (didesniame temperatūrų arba slėgių skirtume, oro masių perdavimas vyksta sparčiau). Dėl konvekcijos įtakos nevienodumus stebime ne tik kreiptuvuose, bet ir visame kameros skerspjūvyje. Pažymėtina, kad šilto oro srautu pildosi visas kameros tūris, net ir plėvelės apačioje. Šio rezultato nepavyko pasiekti ankstesnėse simuliacijose. Jei džiovinama plėvelė bus šildoma iš abiejų pusių, galėsime pasiekti didesnę darbo našumą, matuojamą plėvelės judėjimo greičiu kameroje metrais per sekundę. Geras rezultatas pasiektas ir vertinant kondensacijos tikimybę, nes rizikos zonoje, prie kameros lubų, nėra vėsaus oro zonos, kuriame garai galėtų kondensuotis.

Penktojo atvejo tyrimo metu komponentų išdėstymas kameroje išliko simetriškas oro pašalinimo kanalo išilginiam pjūviui (ties tašku 3). Kontroliniai taškai išdėstyti simetriškai 3-io taško atžvilgiu ir, dėl jau minėtų priežasčių, rezultatai simetriškuose taškuose nebuvo vienodi (žr. 9 lentelė). Taškuose oro temperatūra buvo fiksuojama kas 30-imt sekundžių. Išmatuotos vertės rodo, kad tarp taškų 1 ir 5 temperatūrų skirtumas per 300 s svyravo nuo 3,52 iki 4,19 laipsnio, atitinkamai 3,16-3,33 laipsnio tarp taškų 2 ir 4. Lyginant su skirtumais užfiksuotais ketvirtame tyrime, šiame jie sumažėjo 2,2-2,6 laipsnio tarp kraštinių taškų, o tarp 2 ir 4 padidėjo 0,75-2,5 laipsnio. Panaudojus siauresnius vamzdžius ir sutankinus jų išdėstymą, vidutinė kameros temperatūra po 300 s padidėjo nuo 11,01 °C iki net 20,71 °C, atitinkamai lyginant su pirma (geriausia) ir trečia (blogiausia) analizėmis.

9 lentelė. Kontrolinių taškų vertės po 300 s. Analizė Nr. 5

Taškų Nr.	Laikas, s / Temperatūra, °C										
	0 s	30 s	60 s	90 s	120 s	150 s	180 s	210 s	240 s	270 s	300 s
1	20,00	69,21	69,53	69,88	69,92	70,11	70,32	70,54	70,63	70,76	70,83
2	20,00	58,05	58,58	58,92	59,32	59,59	59,76	59,94	60,19	60,41	60,56
3	20,00	55,22	55,69	55,93	56,14	56,21	56,43	56,52	56,76	56,86	56,95
4	20,00	61,24	61,80	62,16	62,48	62,77	63,05	63,24	63,50	63,73	63,89
5	20,00	73,29	73,72	73,80	73,82	73,96	74,04	74,15	74,23	74,28	74,36
Vidurkis	20,00	63,40	63,86	64,14	64,34	64,53	64,72	64,88	65,06	65,21	65,32

Šios analizės metu didžiausi temperatūrų skirtumai buvo fiksuoti tarp 3-io ir 5-o taškų – nuo 16,78 °C iki 18,07 °C. Tai yra prastas, bet leistinas rezultatas pagal pradines sąlygas, nes jose yra nurodytas maksimalus 20 laipsnių skirtumas darbo zonoje. Tačiau, rezultatai rodo, kad didžiausi skirtumai buvo simuliacijos pradžioje, o pabaigoje šie sumažėjo, nes 5-ame taške aukšta temperatūra yra nuo pat pradžių ir mažai kinta tyrimo metu, o 3-ame taške – stabiliai didėja. Tai leidžia tikėtis, kad įšilus kamrai temperatūrų skirtumas dar labiau sumažės. Pažymėtina, kad reikiamą temperatūrą pasiekėme net keturiuose taškuose, o bendras kameros temperatūros vidurkis jau po 30 s viršija minimalią darbinę temperatūrą.

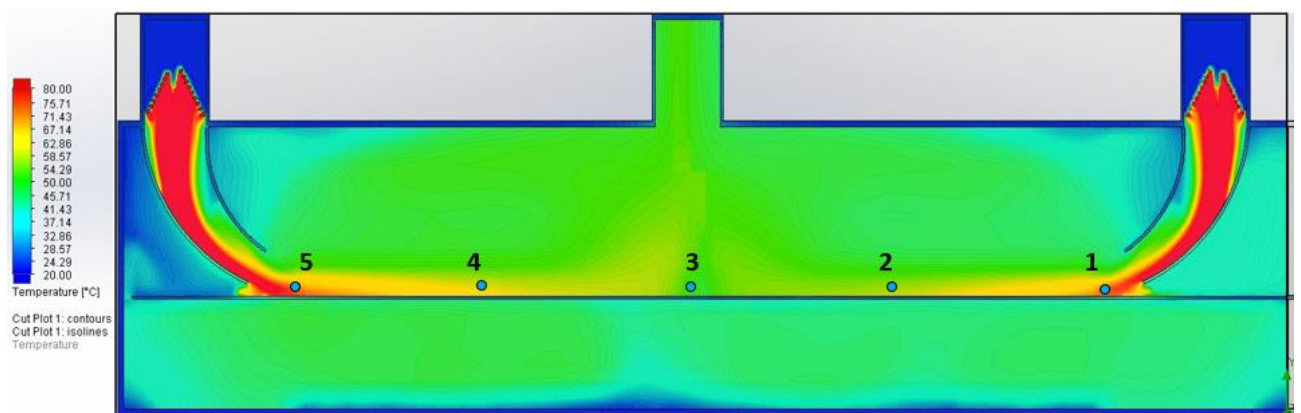


31 pav. Kameros įšilimo grafikas: 300 s. Analizė Nr. 5

Kameros įšilimo grafiko, temperatūrų sklaida yra sumažėjusi ir nebeliko aiškių oro srautų maišymosi žymių. Tik visai mažus, reikšmingos įtakos neturinčius nuokrypius, galima pastebėti tarp 60-120 s ir 180-270 sekundžių, kur antro, trečio ir ketvirto taškų temperatūra susvyruoja. Likusiuose taškuose temperatūra kyla tolygiai: kraštiniuose taškuose lėčiau, nes jų pradinė temperatūra aukštesnė, o taškuose esančiuose vėsesnėse zonose – greičiau.

Kaitinimo elemento įšilimo fazės netikriname, nes esant praktiškai identiškoms sąlygoms jis buvo patikrintas antroje analizėje (žr. 3.3 poskyrį). Fiksuoti rezultatai buvo daugiau negu patenkinami.

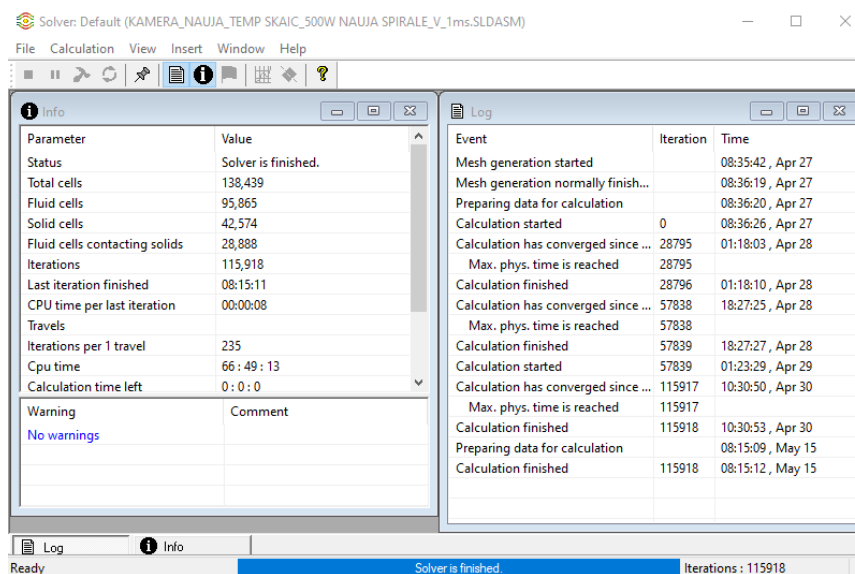
Kadangi ši penktoji simuliacija buvo arčiausiai mūsų siekiamo tikslo, jos simuliacijos laiką išplėtėme iki 600 sekundžių realaus proceso laiko. Toks simuliacijos išplėtimas gal ir neduos ryškių temperatūrų pokyčių, tačiau tikrai pagelbės prognozuojant tolimesnę tyrimo eigą. Kameros skerspjūvio termograma po 600 sekundžių atvaizduota 32-ame paveiksle.



32 pav. Kameros skerspjūvio termograma po 600 s. Analizė Nr. 5

Čia jau matome nusistovėjusią oro srauto tėkmę. Oro srautas išėjęs iš kreiptuvų laikosi prie plėvelės paviršiaus ir juda trečiojo taško link, tačiau likus keliems centimetrams iki jo, srautas pasisuka link

išėjimo angos ir kyla į viršų. Centrinė srauto dalis patenka į atmosferą, o išorinė dalis lieka kameros viduje prie lubų ir teka link oro kreiptuvų. Likus apie 30 centimetrų iki oro kreiptuvų išėjimo angos (matuojant lygiagrečiai, ne tiesiai), pravėšęs oro srautas leidžiasi žemyn ir susijungia su įtekančiu karšto oro srautu. Ir šis ciklas vėl kartojasi. Vadinasi, laikui bėgant, temperatūra kameros viduje nepaliaujamai kyla. Tiesa šis kilimas nėra greitas, o simuliacijos skaičiavimas labai imlus laikui procesas. Pavyzdžiui, šie penktosios simuliacijos 600 sekundžių realaus proceso imitavimo skaičiavimai užtruko beveik 67 valandas (žr. 33 pav.) Dar apytiksliai 3 valandas užtruko kameros modeliavimo procesas ir matematinio modelio aprašymas. Todėl, dėl resursų trūkumo, tolimesni skaičiavimai nebus tęsiami, o pasikliausime prognozavimo programomis, nes turime pakankamą pradinį duomenų kiekį.



33 pav. 600 s simuliacijos skaičiavimo laikas

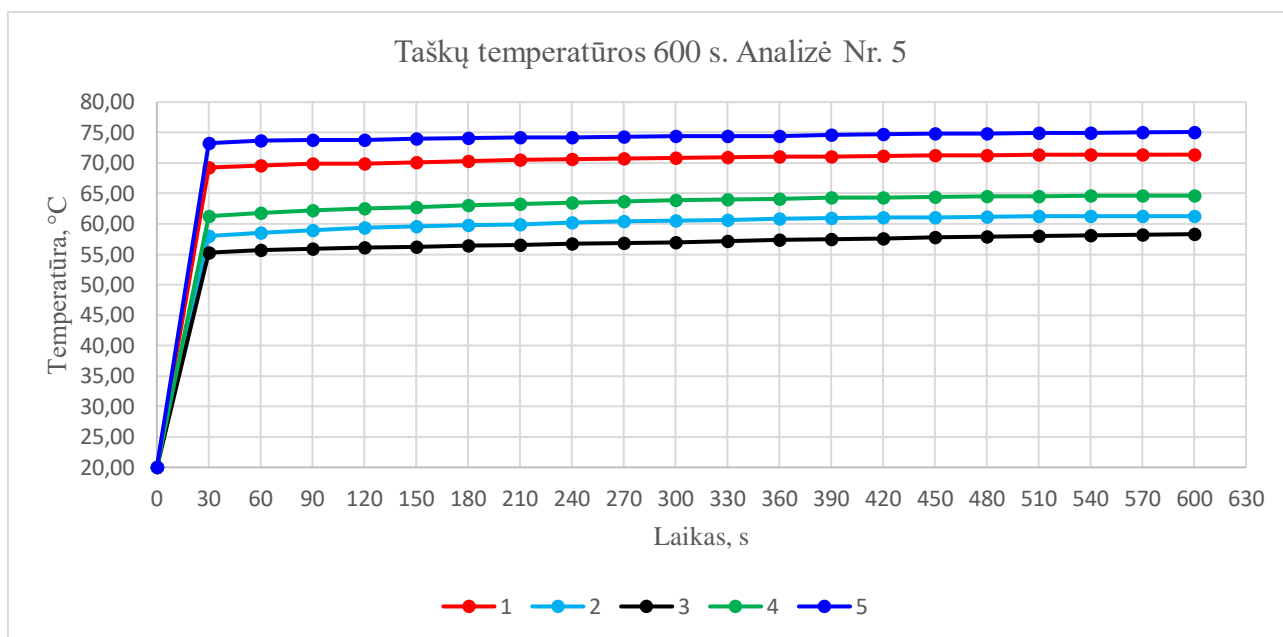
Pratęsus skaičiavimus, kaip ir buvo galima tikėtis, per einamas 300 sekundžių temperatūra lėtai kilo aukštyn. Pradinės ir galinės temperatūros skiriasi vos 0,54-1,36 °C. Nors trečiojo taško temperatūra pakito daugiausiai, ji vis tiek nepasiekė minimalios 60 laipsnių temperatūros. Išsamias temperatūras žiūrėti 10-oje lentelėje.

10 lentelė. Kontrolinių taškų vertės po 600 s. Analizė Nr. 5

Taškų Nr.	Laikas, s / Temperatūra, °C										
	300	330	360	390	420	450	480	510	540	570	600
1	70,83	70,92	71,04	71,08	71,13	71,22	71,27	71,32	71,35	71,36	71,37
2	60,56	60,65	60,80	60,92	61,00	61,07	61,16	61,24	61,23	61,25	61,26
3	56,95	57,15	57,32	57,45	57,60	57,74	57,89	58,01	58,13	58,22	58,31
4	63,89	63,99	64,14	64,27	64,36	64,43	64,52	64,57	64,60	64,62	64,63
5	74,36	74,45	74,46	74,67	74,71	74,86	74,87	74,90	74,96	75,04	75,09
Vidurkis	65,32	65,43	65,55	65,68	65,76	65,86	65,94	66,01	66,05	66,10	66,13

Pratęsus skaičiavimus, didžiausi temperatūrų skirtumai išliko tarp 3 ir 5 taškų. Tiesa, šis skirtumas ir toliau mažėja – nuo 17,41 °C (po 300 s) iki 16,78°C (po 600 s). Išsamus temperatūros kitimo grafikas

pateikiamas 34 paveiksle. Jame matome, kad nežymus šilto ir šalto oro masių maišymasis išlieka viso tyrimo metu, tačiau vis labiau nyksta.



34 pav. Kameros įšilimo grafikas: 600 s. Analizė Nr. 5

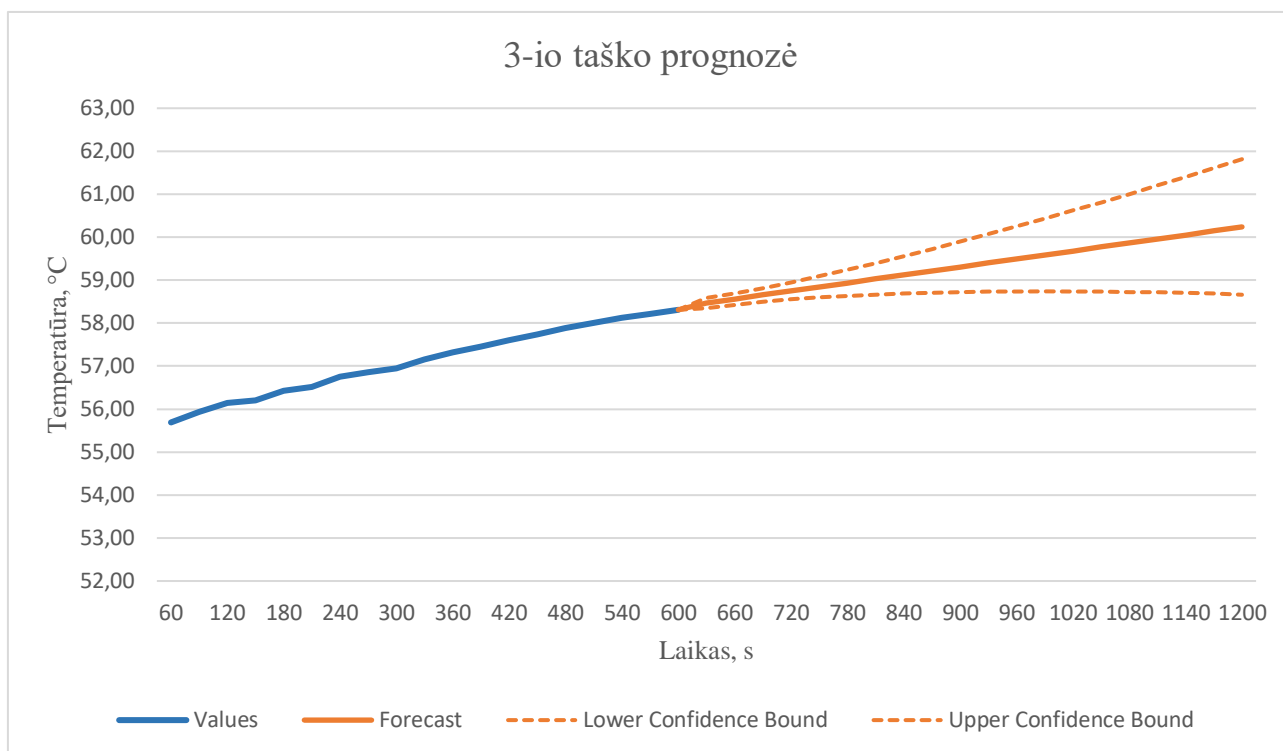
Pastebime, kad bėgant laikui temperatūrų sklaida kameros viduje mažėja, ir visa sistema stabilizuojasi. Visuose taškuose stebime tolygų temperatūros kilimą: aukštesnės temperatūros taškuose lėčiau, o žemesnės temperatūros – greičiau. Kadangi, po išplėstinių skaičiavimų trečiasis taškas vis dar nepasiekė reikiamos temperatūros, o skaičiavimai užtruko labai daug valandų, pastaruosius nutraukiame – toliau vadovausimės prognozavimo programomis.

3.6.1. Prognozavimas

3.6 poskyryje nagrinėta dziovinimo kameros įšilimo analizė yra geriausia iš visų penkių atvejų, tačiau jos metu 3-asis taškas, net po išplėstinių skaičiavimų, nepasiekė reikiamos temperatūros. Žinoma, temperatūra taške stabiliai didėjo visos simuliacijos metu, ir netgi jame stebėjome didžiausią augimą. Tai leidžia daryti prielaidą, kad temperatūra ir toliau didės, bet dėl daugybės valandų trunkančių skaičiavimų buvo nuspręsta nevykdyti tolimesnių skaičiavimų, o juos pakeisti vieno taško temperatūros kitimo prognoze. Prognozuoti 3-io taško temperatūros kitimui pasirinkome *MS Excel* įrankį „Forecast“. Šis įrankis yra skirtas tiesinėms ir atsikartojančio kitimo duomenų prognozėms, priklausomoms nuo laiko. Jame galime pasirinkti pasikliautinąjį intervalą, prognozavimo laiką, sezoniškumo kriterijus arba palikti juos automatiniam nustatymui bei trūkstančių duomenų tarpų užpildymą keliais skirtingais metodais [24], [25].

Teisingam prognozavimui rekomenduojama vengti duomenų, kurie gali iškreipti prognozę, t. y. tokių duomenų, kurie išsiskiria staigiais pokyčiais iš duomenų masyvo, ypač jei tie nukrypimai neturi pasikartojimo (sezoniškumo) [24]. Atsižvelgdami į rekomendacijas, prognozavimui reikalingus pradinius duomenis nurodome tik nuo 60-os sekundės, kur jau yra nusistovėjusi temperatūra. Pasikliautinąjį intervalą nustatome ties 95 procentais ir pažymime automatinį sezoniškumo aptikimą. Prognozavimo laiką pasirenkame laikydamiesi rekomendacijų – neviršijame dvigubo laiko periodo nuo turimų rezultatų kiekio – 1200 s. Trūkstančių duomenų neturime, todėl jų užpildymo parametrai mums neturi reikšmės ir juos paliekame automatiškai programos parinktus. Pažymime varnelę ties

Include forecast statistics, kad pridėtų išsamią prognozavimo statistiką. Spaudžiame *create* mygtuką ir per keletą sekundžių programa mums sukuria išsamią prognozę su duomenų masyvu ir jų kitimo kreive (žr. 35 pav.).



35 pav. 3-io taško temperatūros kitimo prognozė

Grafike mėlyna linija žymi turimų duomenų priklausomybę, o oranžinė linija prognozuojamas reikšmes. Programa pateikia pasikliautino intervalo (95 proc.) apatinę ir viršutinę ribas, pažymėtas punktyrinėmis linijomis. Grafike matome, jog temperatūra viršija 60 laipsnių pagal Celsijų ribą. Išsamūs prognozės duomenys pateikti 11 lentelėje.

11 lentelė. 3-io taško temperatūros prognozė duomenys

Timeline	Values	Forecast	Lower Confidence Bound	Upper Confidence Bound
60	55,69			
90	55,93			
120	56,14			
150	56,21			
180	56,43			
210	56,52			
240	56,76			
270	56,86			
300	56,95			
330	57,15			
360	57,32			
390	57,45			
420	57,60			
450	57,74			
480	57,89			

11 lentelė. (tęsinys)

Timeline	Values	Forecast	Lower Confidence Bound	Upper Confidence Bound
510	58,01			
540	58,13			
570	58,22			
600	58,31	58,31	58,31	58,31
630		58,47	58,35	58,59
660		58,56	58,43	58,69
690		58,65	58,50	58,81
720		58,75	58,55	58,94
750		58,84	58,59	59,09
780		58,93	58,63	59,24
810		59,03	58,66	59,39
840		59,12	58,69	59,55
870		59,21	58,71	59,72
900		59,31	58,72	59,89
930		59,40	58,73	60,07
960		59,49	58,74	60,25
990		59,59	58,74	60,43
1020		59,68	58,74	60,62
1050		59,77	58,73	60,81
1080		59,87	58,73	61,01
1110		59,96	58,71	61,20
1140		60,05	58,70	61,40
1170		60,15	58,68	61,61
1200		60,24	58,66	61,81

Žvelgiant į pagrindinę prognozę, 3-asis taškas reikiamą temperatūrą pasiekia po 1140-os sekundės. Pagal apatinę pasikliautinojo intervalo ribą temperatūra nesiekia 60 laipsnių. Tačiau tokį atvejį turėtume atmesti, nes jame ilgą laiką kilusi temperatūra sustoja kilti ir nuo 1050-os sekundės ima mažėti, kas nėra realu žvelgiant į eksperimentą, kurio metu į kameros vidų, be perstojo yra tiekiamas karštas oras. Žvelgiant į viršutinę ribą, vėlgi, nėra tikėtina, kad iš lėto kilusi temperatūra ims vis sparčiau didėti, todėl tokią prognozę atmetame. Manome, kad labiausiai tikėtini prognozės rezultatai yra artimi galimos simuliacijos rezultatams. Tačiau tikėtina, kad simuliacijos metu reikiamą temperatūrą pasiektume truputėlį vėliau, nei yra prognozuojama, nes prognozės grafikas apytiksliai tiesinis, o temperatūros didėjimas, iš surinktų duomenų, panašus į kreivę, artėjančią prie asimptotės.

Esant tokiam kameros modeliui, parinkti 500 W galios agregatai užtikrina reikiamas darbo sąlygas kameroje. Optimali spiralės forma, įvertinus teorinius modelius ir atlikus simuliacijas yra kūginė spiralė. Mažesnio skersmens vamzdžiai davė geresnį rezultatą, nei panaudojus didesnius. Ištraukimo kanalui nėra reikalingas priverstinis oro ištraukimas, o tiekimo kanale pakanka pasiekti 1 m/s greitį.

Išvados

1. Atlikus rinkos tyrimą, buvo rastas Europoje gaminamas „HoloEast“ kompanijos „Adhesive coating equipment“ įrenginys, turintis artimiausią koncepciją. Šio įrenginio maksimalus klijų dangos storis yra 50 μm , o mūsų atveju 50 μm – vidutinis storis. Džiovinimo kamera išskaidyta į dvi atskiras dalis ir kiekviena jų turi vieną oro tiekimo bei du oro ištraukimo kanalus. Šilumokaitis yra toli nuo džiovinimo kameros, kas sukuria temperatūrinius nuostolius. Įrenginys netinkamas naudoti pagal pradines sąlygas.
2. Populiariausios CFD tipo kompiuterinės programos buvo suskaidytos į keturias grupes ir trumpai aptartos. Iš jų išrinkome dvi labiausiai tinkančias programas ir išsamiai jas palyginome. *ANSYS Fluent* yra aukščiausio lygio CFD programa, gebanti itin tiksliai išspręsti sudėtingiausius uždavinius. *SolidWorks Flow Simulation* yra aukšto lygio ir didelio skaičiavimų tikslumo programa, turinti draugiškiausią vartotojo sąsają. Šios programos visiškai pakanka universitetuose ir nemažai daliai verslo įmonėse atliekamų skaičiavimų, todėl ją ir pasirinkome tyrimui atlikti.
3. Pagal darbo užduotyje nurodytas sąlygas, buvo sumodeliuota tokia džiovinimo kamera: ilgis 4 m, aukštis 0,5 m, plotis 0,4 m. Panaudoti reikalaujami kaitinimo elementai ir sukurti oro kreiptuvai. Visas objektas, panaudojant fizinius ryšius, buvo surinktas į vientisą sistemą ir sukurtas jo matematinis modelis. Įvertinome simetrijos sąlygas, taip sumažindami skaičiavimų laiką.
4. Atlikome penkias skirtingų atvejų analizes. Pradėjome nuo analizės pagal pradines sąlygas ir vis keitėme po vieną ar kelis parametrus iki tol, kol penktojoje simuliacijoje gavome mus tenkinantį rezultatą. Penktoje analizėje reikiamą temperatūrą pasiekėme 4-iuose taškuose iš 5-ių. Temperatūros vidurkis po 600 s buvo 66,13 °C, o žemiausia temperatūra fiksuota 3-iaame taške siekė 58,31 °C. Papildomai atlikome temperatūros kitimo pastarajame taške prognozę, ir jos metu nustatėme, jog 60 laipsnių temperatūrą pasieksime po 1140 sekundžių.
5. Pirmuoju atveju naudojome po vieną oro tiekimo ir pašalinimo kanalą vienai kameros pusei, kurių skersmuo $d = 110 \text{ mm}$. Oro tiekimo greitis vamzdyje 1 m/s, o pašalinimo kanalas atviras į atmosferą. Spiralinės galingumas 1500 W. Reikiamą temperatūrą pasiekėme tik 1-ame taške iš 5-ių. Temperatūros vidurkis taškuose – 54,51 °C. Antrajam atvejui sumažinome spiralinės galingumą iki 500W. Pakito tik spiralinės įšilimo laikas, kiti rezultatai praktiškai identiški. Trečiojo atvejo metu padidinome oro tiekimo greitį iki 2 m/s – kiti parametrai išliko nepakitę. 60 laipsnių temperatūros nepasiekėme nei viename taške, o vidurkis siekė vos 44,61 °C. Ketvirtoje simuliacijoje panaudojome du oro tiekimo (kraštuose) ir vieną pašalinimo kanalą (centre), kurių skersmenys $d = 160 \text{ mm}$. Oro tiekimo greitis 1 m/s. Kaitinimo spiralinės galingumas 500 W. Reikiamos temperatūros taškuose nepasiekėme, o temperatūros vidurkis buvo 46,44 °C. Penktuoju atveju palikome ketvirto atvejo koncepciją, tik sumažinome vamzdžių skersmenis iki 110 mm. 4-iuose taškuose iš 5-ių pasiekėme 60 °C temperatūrą. Temperatūros vidurkis taškuose siekė 65,32 laipsnius pagal Celsijų, po 300 s ir atitinkamai 66,13 ° po 600 s. Temperatūros kitimo 3-iaame taške prognozė parodė, kad labiausiai tikėtina, jog 60 °C temperatūrą pasieksime per 1140 sekundžių.

Literatūra

1. T. Grigorjeva ir A. Andriušytė, Mokslinių tyrimų pagrindai, Vilnius: Technika, 2015, pp. 69-70.
2. Holoeast, „Adhesive coating equipment,“ [Tinkle]. Available: <http://www.holoeast.com/PDF/ADHESIV-%20COATING-EQUIPMENT.pdf>. [Kreiptasi 20 03 2019].
3. „ADHESIVE COATING MACHINE,“ Holo East, [Tinkle]. Available: <http://www.holoeast.com/machines/coating/adhesive-coating-system.html>. [Kreiptasi 20 03 2019].
4. B. Adams, „Pressen 2039,“ [Tinkle]. Available: <https://www.beardowadams.com/hot-melt-adhesive/pressen-2039.pdf>. [Kreiptasi 20 04 2019].
5. „Hot-Melt Adhesives,“ Beardow Adams, [Tinkle]. Available: <https://www.beardowadams.com/our-adhesives/hot-melt>. [Kreiptasi 20 04 2019].
6. „Adhesive taps components,“ Tesa, [Tinkle]. Available: <https://www.tesa.com/en/wikitapia/what-is-so-exciting-about-adhesion-bonding-primers-release-coating-and-liner.html>. [Kreiptasi 01 03 2020].
7. „CFD Computational Fluid Dynamics,“ Simscale, [Tinkle]. Available: <https://www.simscale.com/docs/content/simwiki/cfd/whatis CFD.html>. [Kreiptasi 30 03 2019].
8. „Francis Turbine CFD,“ CFD support, [Tinkle]. Available: <https://www.cfdsupport.com/francis-turbine-cfd-study.html>. [Kreiptasi 30 03 2019].
9. A. A. a. G. Polidori, „Mass Transfer - Advancement in Process Modelling,“ [Tinkle]. Available: <https://www.intechopen.com/books/mass-transfer-advancement-in-process-modelling/computational-fluid-dynamics-method-for-the-analysis-of-the-hydrodynamic-performance-in-swimming>. [Kreiptasi 30 03 2019].
10. E. B. Haghighi, „LinkedIn,“ [Tinkle]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/which-cfd-package-appropriate-your-organization-ehsan-b-haghighi/>. [Kreiptasi 30 03 2019].
11. E. Weber, „Quora,“ [Tinkle]. Available: <https://www.quora.com/How-reliable-are-SolidWorks-flow-simulation-results-Which-is-better-SolidWorks-or-ANSYS>. [Kreiptasi 30 03 2019].
12. E. MEDES0, „Simulation,“ [Tinkle]. Available: <https://edrmedeso.com/simulation/ansys-computational-fluid-dynamics-cfd/>. [Kreiptasi 30 03 2019].
13. Audilab, „Finite-element method,“ [Tinkle]. Available: <http://audilab.bme.mcgill.ca/AudiLab/teach/fem/fem.html>. [Kreiptasi 26 04 2019].
14. SimScale GmbH, „What is CFD Computational Fluid Dynamics?,“ Simscale, [Tinkle]. Available: <https://www.simscale.com/docs/content/simwiki/cfd/whatis CFD.html>. [Kreiptasi 16 11 2019].
15. D. G. D. Dr. A. Sobachkin, „SolidWorks docs,“ [Tinkle]. Available: https://www.solidworks.com/sw/docs/Flow_Basis_of_CAD_Embedded_CFD_Whitepaper.pdf. [Kreiptasi 25 04 2019].
16. J. M. C. Yunus A. Cengel, Fluid Mechanics: Fundamentals and applications, Third edition, New York: McGraw-Hill, 2014, pp. 517-520.
17. H. G. Gauth Jr., Scientific Method in Practise, Cambridge: Cambridge University Press, 2003, pp. 20-22 ; 370-375.

18. T. Garland Jr., „The Scientific Method as an Ongoing Process,“ 19 08 2016. [Tinkle]. Available: https://idea.ucr.edu/documents/flash/scientific_method/story_html5.html. [Kreiptasi 16 11 2019].
19. R. Žukauskienė, „Psichologinių tyrimų planavimas,“ 2014. [Tinkle]. Available: <http://rzukausk.home.mruni.eu/wp-content/uploads/2-tema-tyrimu-planavimasnj.ppt>. [Kreiptasi 16 11 2019].
20. Dassault Systèmes SolidWorks Corporation, „System Requirements,“ [Tinkle]. Available: <https://www.solidworks.com/sw/support/SystemRequirements.html>. [Kreiptasi 16 10 2019].
21. R. Crahmaliuc, „Introduction to CFD Analysis with Practical Examples,“ SIMSCALE, 21 03 2019. [Tinkle]. Available: <https://www.simscale.com/blog/2016/03/what-everybody-ought-to-know-about-cfd/>. [Kreiptasi 16 10 2019].
22. „Kaitinimo elementai,“ UAB „Kuprė“, [Tinkle]. Available: <http://www.kupre.lt/index.php?lang=lt&t=gaminiai&type=grupe&grupe=kaitinimo-elementai&tipas=kaitinimo-elementai&id=21>. [Kreiptasi 23 03 2019].
23. G. Gimbutis ir kiti, Šiluminė technika, Vilnius: Mokslas, 1993, pp. 7-30, 105-118.
24. Adam, „Forecasting in Excel,“ 18 10 2018. [Tinkle]. Available: <https://www.spreadsheetweb.com/forecasting-in-excel/>. [Kreiptasi 09 05 2020].
25. „Create a forecast in Excel for Windows,“ Microsoft, [Tinkle]. Available: <https://support.office.com/en-us/article/create-a-forecast-in-excel-for-windows-22c500da-6da7-45e5-bfdc-60a7062329fd>. [Kreiptasi 09 05 2020].