



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Skaitinis srauto struktūros ir hidraulinių charakteristikų tyrimas skirtingų konfigūracijų mikro-kanaluose

Baigiamasis projektas

Justina Jaseliūnaitė

Projekto autorė

Doc. Dr. Raimondas Pabarčius

Vadovas

Dr. Marijus Šeporaitis (LEI)

Konsultantas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Skaitinis srauto struktūros ir hidraulinių charakteristikų tyrimas skirtingų konfigūracijų mikro-kanaluose

Baigiamasis projektas
Termoinžinerija (6211EX023)

Justina Jaseliūnaitė

Projekto autorė

Doc. Dr. Raimondas Pabarčius

Vadovas

Dr. Marijus Šeporaitis (LEI)

Konsultantas

Lekt. Dr. Linas Paukštaitis

Recenzentas

Kaunas, 2021



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Justina Jaseliūnaitė

Skaitinis srauto struktūros ir hidraulinių charakteristikų tyrimas skirtingų konfigūracijų mikro-kanaluose

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad:

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

Justina Jaseliūnaitė

Patvirtinta elektroniniu būdu



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Baigiamojo magistro projekto užduotis

Studentui (-ei)	Justinai Jaseliūnaitei
Projekto tema	Skaitinis srauto struktūros ir hidraulinių charakteristikų tyrimas skirtingų konfigūracijų mikro-kanaluose (lietuvių kalba) Numerical Research of Flow Structure and Hydraulic Characteristics in Micro-Channel with Different Pin-fin Configurations (anglų kalba)
Darbo tikslas ir uždaviniai	Darbo tikslas - skaitiniais metodais ištirti skysčio tekėjimą sudėtingame mikrokanale ir jį optimizuoti. Darbo uždaviniai: <ol style="list-style-type: none">1. atlikti literatūros apie mikrokanalus ir jau atliktus optimizavimo darbus analizę;2. aprašyti geometrinę tekėjimo sudėtingame kanale struktūrą ir sukurti erdvės diskretizacijos tinklą;3. pasirinkti skaitinius metodus norimam modeliuoti tekėjimui;4. skaitiškai sumodeliuoti realų eksperimentą naudojantis <i>OpenFOAM</i> programine įranga;5. ištirti skysčių tekėjimo skirtingų geometrinių konfigūracijų mikrokanaluose dėsningumus, juos palyginti tarpusavyje.
Reikalavimai ir sąlygos	Apiforminimas pagal bendruosius reikalavimus / Papildomų reikalavimų nėra
Vadovas	Doc. Dr. Raimondas Pabarčius (vadovo pareigos, vardas, pavardė, parašas)
	2021-02-18 (data)

Jaseliūnaitė, Justina. Skaitinis srauto struktūros ir hidraulinių charakteristikų tyrimas skirtingų konfigūracijų mikro-kanaluose. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. dr. Raimondas Pabarčius, konsultantas dr. Marijus Šeporaitis; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Energetikos inžinerija.

Reikšminiai žodžiai: mikrokanalai, skaičiuojamoji fluidų dinamika, tekėjimo dėsniumai, sudėtingas tekėjimas, *OpenFOAM*.

Kaunas, 2021. 86 p.

Santrauka

Elektronikos įrenginiams mažėjant, šilumos nuvedimas, iš elektroninių komponentų ir ne tik jų, tampa vis aktualesnė ir sudėtingesnė užduotis. Dėl sparčiai besivystančių technologijų ir didėjančio elektroninių prietaisų funkcionalumo suvartojama vis daugiau energijos, vis mažesniame tūryje. Nepaisant gerėjančio energetinio lustų efektyvumo, šilumos nuostolių tankis didėja su kiekviena nauja jų karta. Vis daugiau šilumos turi būti išsklaidyta iš vis mažesnio tūrio, norint užtikrinti ilgalaikį ir efektyvų įrenginių eksploatavimą. Įprastų metodų, tokių kaip natūralios konvekcijos, ar įprastų šilumokaičių jau nebepakanka. Todėl ieškoma efektyvesnių metodų aušinti, ypač mažus įrenginius, vienas jų yra aušinančių mikrokanalų integravimas tiesiog į lustą. Didelis santykinis šilumos mainų plotas mažame tūryje padeda pasiekti reikiamą šilumos perdavimą šilumnešiui.

Šiuo technologijų augimo metu yra svarbu užtikrinti didelio pašalinamos šilumos srauto tankį, tam pasirinkta nagrinėti mikrokanalus, kurių masyvai sudaro didelio našumo kompaktiškus šilumokaičius. Nors atliktų tyrimų norint juos optimizuoti vis daugėja, bet juose daugiausiai tiriamos šiluminės savybės. Kaip našiausi dažniausiai išskiriami cilindriniai ir elipsiniai masyvai, vis dėlto geromis savybėmis pasižymi ir daugiau įvairesnių mikrokanalų, pavyzdžiui, turintys kristalinės gardelės sandarą, bet jų masinė gamyba būtų labiau komplikauta, nei paprastesnės geometrijos masyvų.

Šiuo tyrimu siekiama išanalizuoti optimizavimo galimybes sudėtingos formos mikrokanalų masyvus naudojančiuose įrenginiuose. Tam reikia iširti tekėjimo šiais masyvais ypatybes, o tai atlikti galima sukuriant ir pasitelkiant jų skaitinius modelius. Darbe nagrinėjami sudėtingo tekėjimo mikrokanaluose dėsniumai, naudojantis skaičiuojamosios fluidų dinamikos programine įranga *OpenFOAM*. Apibrėžiamas uždavinio sprendimo algoritmas, tinklelio generavimas, skaitinių schemų, pradinių ir kraštinių sąlygų (angl. *initial and boundary conditions*) parinkimas. Atliekama modeliavimo validacija pagal eksperimentinius rezultatus. Tuomet, siekiant optimizuoti mikrokanalus, pasirenkamos kelios tiek cilindrinio, tiek elipsinio kliūčių masyvo struktūros.

Kliūčių išdėstymo tvarkos įtakos tyrimas parodė, jog šachmatinis išdėstymas yra efektyvesnis už linijinį. Tėkmė juo yra stabilesnė ir slėgio nuostoliai mažesni. Tai todėl, kad pratekamo skerspjuvio ploto kitimas tam turi didesnę įtaką, nei tekėjimo krypties kitimas. Gauti rezultatai leidžia teigti, kad tėkmę stabilizuoja, mažesnes recirkuliacines sritis sudaro ir slėgio nuostolius sumažina, tėkmės linijas atitinkančios kliūtys – elipsės. Tyrimo metu pastebėta, kad didinant šilumos mainų paviršių plotą, slėgio nuostoliai gali neproporcingai išaugti. Kai kuriuose masyvų išdėstymuose buvo nustatyta sudėtingų tekėjimo reiškinių, tokių kaip sužadintų regionų interferencijas ar asimetriškų sukurių

sinchroniškas nukreipimas į pagrindinę tėkmę. Todėl, projektuojant mikrokanalų masyvus, būtinas optimalus jų formos ir tekėjimo režimo suderinimas.

Jaseliūnaitė, Justina. Numerical Research of Flow Structure and Hydraulic Characteristics in Micro-Channel with Different Pin-fin Configurations. Master's thesis / supervisor doc. dr. Raimondas Pabarčius, consultant dr. Marijus Šeporaitis; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Energy Engineering.

Keywords: micro pin-fin, computational fluid dynamics, flow characteristics, complex flow, *OpenFOAM*

Kaunas, 2021. 86 pages.

Summary

As electronic devices become smaller, heat removal from the electronic components becomes an increasingly important and complex task. More energy is consumed due to rapidly evolving technologies and the increasing functionality of electronic devices, which implies that more heat must be removed to ensure the long-term and efficient operation of the equipment. Despite the improving energy efficiency of the chips, the heat loss density increases with each new generation. More and more heat must be dissipated from a smaller and smaller volume in order to ensure long-term and efficient operation. Conventional methods such as natural convection or traditional heat exchangers are no longer sufficient. Consequently, there are research made on new cooling devices. One of the most progressive heat exchangers are the micro-channels, whose small size and sufficiently large heat dissipation area ensure their efficiency.

During time of technology growth, it is important to ensure high heat flux dissipation, for this reason it was chosen to investigate the micro-pin fin arrays, which are high-performance compact heat exchangers. Although the number of studies conducted to the optimization of micro-channels is increasing, the main research topic is thermal properties. Cylindrical and elliptical arrays are noted as the most efficient. However more diverse micro-channels, such as those with the crystal lattice structure, also show good performance, but their mass production would be more complicated than arrays of simpler geometry.

The aim of this study is to create numerical models of complex micro-channel arrays and to analyse the flow properties, thus optimizing the devices. This paper investigates the peculiarities of complex flow in micro-channels using computational fluid dynamics software *OpenFOAM*. The problem solving algorithm, grid generation, selection of numerical schemes, initial and boundary conditions are discussed. The simulation of experiment was performed in order to validate selected numerical properties and models. Several configurations of both cylindrical and elliptical arrays are selected with the aim to optimize micro-channels.

The different array arrangement showed that the staggered array is more efficient than the inline, because of the flow stabilization and the lower pressure loss due to the greater influence of the change in flow cross-section area compared to the change in flow direction. From the obtained results it can be stated that ellipses lead to longer lasting flow stabilization, smaller recirculation zones, reduced pressure drop as a result of streamlined shape. Furthermore, it was observed that increasing area of useful heat dissipation can cause unusually high pressure loads but maintaining the optimal parameters can reduce the pressure drop. Additionally, the study showed that micro-channel flow is

complex due to phenomena such as interference of wake regions or synchronous diversion of asymmetric vortices. Therefore, when designing the micro-channels, it is necessary to optimally choose pin-fin shape, arrangement and flow regime.

Turinys

Paveikslų sąrašas	11
Lentelių sąrašas	14
Terminų sąrašas.....	15
Įvadas.....	16
1. Literatūros apžvalga	18
1.1. Šilumokaičių klasifikacija pagal dydį.....	19
1.1. Mikrošilumokaičiai.....	20
1.2. Mikrokanalai.....	24
1.3. Geometrinė struktūra	26
1.3.1. Kliūčių forma (formos / matmens kitimas).....	26
1.3.2. Kliūčių išdėstymas.....	31
1.3.3. Kanalo aukščio santykis su kliūčių skersmeniu	36
1.3.4. Įdomesni atvejai.....	38
1.4. Tekėjimo struktūra.....	39
1.5. Mikrogamybos technologijos.....	44
1.6. Baigiamojo projekto temos ir uždavinių pagrindimas.....	45
2. Metodika.....	46
2.1. Modeliuojamas eksperimentas.....	46
2.2. <i>OpenFOAM</i> programinė įranga	48
2.3. Modeliavimo eiga	48
2.4. Sprendžiamos lygtys	49
2.5. Sprendimo kontrolė.....	50
2.6. Turbulencijos modeliavimas.....	50
2.7. Validacija.....	52
2.7.1. Tinklelio konvergavimo tyrimas	52
2.7.2. Geometrijos supaprastinimas.....	56
2.7.3. Eksperimento validacija	58
3. Rezultatai.....	61
3.1. Cilindro formos kliūtys.....	62
3.1.1. Cilindro skersmens įtaka	63
3.1.2. Atstumo tarp cilindro formos kliūčių įtaka	64
3.1.3. Linijinio ir šachmatinio kliūčių išdėstymo rašto įtaka.....	68

3.2. Elipsės formos kliūtys.....	71
3.2.1. Elipsės ilgojo / trumpojo pusašio įtaka.....	72
3.2.2. Atstumo tarp elipsės formos kliūčių įtaka	75
3.3. Elipsių ir cilindrų formos kliūčių palyginimas	79
Išvados	82
Literatūros šaltiniai	83
Priedai.....	87
1 Priedas. Publikacijų sąrašas	87
2 priedas. <i>Python</i> geometrijos generavimo kodas	88
3 priedas. Cilindrinių linijinio išdėstymo kliūčių masyvų struktūros.....	93
4 priedas. Cilindrinių šachmatinio išdėstymo kliūčių masyvų struktūros	94
5 priedas. Elipsinių linijinio išdėstymo kliūčių masyvų struktūros.....	95
6 priedas. Elipsinių šachmatinio išdėstymo kliūčių masyvų struktūros	96

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Moore'o dėsnis [1]	18
1.2 pav. Galios tankis paeiliui einantiems mazgams [2]	19
1.3 pav. Šilumokaičių tipai (parengta pagal [5])	21
1.4 pav. Kompaktiški šilumokaičiai: a) plokštelė-vamzdis (plokšti vamzdžiai, ištisinės plokštelės); b) plokštelė-vamzdis (apvalūs vamzdeliai, ištisinės plokštelės); c) plokštelė-vamzdis (apvalūs vamzdeliai, apvalios plokštelės); d) plokštelė-stabilizatoriai (vieno perdavimo); e) plokštelė-stabilizatoriai (kelių perdavimų) [6]	22
1.5 pav. a) Įprastas plokštelinis šilumokaitis; b) kryžminis plokštelinis šilumokaitis [8]	22
1.6 pav. Gofruoti plokšteliniai šilumokaičiai: a) paprastas trikampis; b) paprastas keturkampis; c) banguotas; d) kontrastingų smulkių juostų; e) daugiasluoksniškas; f) perforuotas [7]	23
1.7 pav. Slėgio nuostolių (a) ir entropijos (b) didėjimo priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus [10]	23
1.8 pav. Šilumokaičių efektyvumo priklausomybė šilumnešio nuo greičio [12]	24
1.9 pav. Modernios dujų turbinos mentė [14]	25
1.10 pav. Moksliniai straipsniai rasti įvedus raktažodį <i>micro-channels</i> nuo 1996 iki 2019 metų (duomenys surinkti iš <i>Elsevier</i>) [17]	25
1.11 pav. Mikrokanalų tyrimo sritys [17]	26
1.12 pav. Efektyvumo indekso priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus [18]	27
1.13 pav. Srauto linijos a) kvadratinių; b) cilindrinė; c) trikampių kliūčių masyvuose, kai $\Delta p = 2760$ Pa [23]	27
1.14 pav. Skirtingiems mikrokanalų šiluminio efektyvumo priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus [25]	28
1.15 pav. a) Slėgio nuostolių; b) vidutinio Nuselto skaičiaus priklausomybės nuo Reinoldso skaičiaus. A, B, C – vis mažesnis lašo formos kliūčių hidraulinis skersmuo [28]	28
1.16 pav. Temperatūros izokontūrai [33]	29
1.17 pav. Tekėjimo struktūra a) cilindro; b) trikampio; c) lašo formos kliūčių masyve [33]	30
1.18 pav. Momentiniai sukūringumo izo-paviršiai, skalėje parodomas greitis tekėjimo kryptimi pro a) cilindro formos; b) mišrias kliūtis [36]	30
1.19 pav. Nuselto skaičiaus santykis esant skirtingam Re ir užgriozdinimui [37]	31
1.20 pav. a) Nuselto skaičiaus ir b) slėgio kritimo priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus [40] ...	32
1.21 pav. Slėgio kritimo kanale priklausomybė nuo masinio debito [41]	33
1.22 pav. Tipinės tekėjimo už kliūčių struktūros esant skirtingos formos kliūtims ir jų išdėstymui [41]	34
1.23 pav. Įstrižai išdėstytų kliūčių masyvo dalis [43]	35
1.24 pav. P/D santykio ($P/D = 2,16; 2,6$ ir $3,03$) įtaka šilumos perdavimo koeficientui [48]	35
1.25 pav. Sienelių ir kliūčių perduodamos šilumos procentinis santykis [19]	36
1.26 pav. Trinties koeficiento ir Nuselto skaičiaus priklausomybė nuo kliūties H/D santykio esant skirtingam Reinoldso skaičiui [52]	37
1.27 pav. Slėgio kritimo koeficiento (parametrinis slėgio nuostolio įvertinimas, atsižvelgiant į kinetinę energiją) kanale priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus kai $H/D = 10$ [53]	37
1.28 pav. a) Nuselto skaičiaus priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus; b) trinties koeficiento priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus [54]	38
1.29 pav. Mikrokanalai su skirtinga vidine struktūra a) kvadratinių kliūčių; b) BCC ; c) VC [55] ...	38

1.30 pav. Termohidraulinio indekso priklausomybė nuo įtekėjimo greičio a) laminariniu; b) turbulentiiniu atveju [55].....	39
1.31 pav. Piranijos formos kliūčių masyvas [57].....	39
1.32 pav. Tekėjimo struktūros ir greičių laukai, kai $Re = 5000$ ir 10000 [59].....	40
1.33 pav. Temperatūros laukai ir perduodamos šilumos srauto tankis esant skirtingam tekėjimo režimui: a) laminarinis su stacionaria recirkuliacine sritimi; b) laminarinis su nestacionaria recirkuliacine sritimi; c) turbulentiinis [60].....	41
1.34 pav. Recirkuliacijos srities kryžminio maišymosi priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus [61]	41
1.35 pav. Strouhalio skaičiaus priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus [62]	42
1.36 pav. Normalizuoti Λ^2 kriterijaus izopaviršiai, kai: a) $Re = 240$; b) $Re = 270$; c) $Re = 270$ (tolesnis laiko momentas nei b)); d) $Re = 300$; e) $Re = 390$, spalvų skalė rodo sukurių kryptį [62].	43
1.37 pav. Srauto pokyčiai linijiniame kliūčių išdėstyme [15].....	43
1.38 pav. Sūkuringumo kontūrai, kai: a) $Re = 100$, $G = 1,2$; b) $Re = 100$, $G = 1,7$; c) $Re = 100$, $G = 2,5$; d) $Re = 100$, $G = 4$; e) $Re = 40$, $G = 2$ [63].....	44
1.39 pav. Vidiniai mikrokanalo paviršiai priklausomai nuo gamybos metodo: a) <i>L-PBF</i> [65]; b) mikromechaninis apdirbimas [40]	45
2.1 pav. Modeliavimo eiga.....	46
2.2 pav. Mikrokanalo vaizdas gautas naudojantis skenuojančiu elektroniniu mikroskopu [69]	47
2.3 pav. Santykinio slėgio perkryčio priklausomybė nuo Re_d esant linijiniam ir šachmatiniam kliūčių išdėstymui tiriamame mikrokanalų masyve [69].....	48
2.4 pav. OpenFOAM bylos struktūra.....	49
2.5 pav. Turbulencijos modeliai.....	51
2.6 pav. Sugeneruoto a) linijinio ir b) šachmatinio kliūčių išdėstymo kanalo tinklelio (Nr. 2 žr. 2.2 lentelėje) fragmentai	53
2.7 pav. Mikrokanalo dalies geometrija.....	54
2.8 pav. Slėgio skirtumo priklausomybė nuo tinklelio celių skaičiaus esant skirtingiems Re_d	55
2.9 pav. y^+ kriterijaus priklausomybė nuo tinklelio celių skaičiaus esant skirtingiems Re_d	56
2.10 pav. Linijinio kliūčių išdėstymo mikrokanalas a) pilnas, b) pusė, c) dalis	56
2.11 pav. Kanalo pradžios slėgio ir greičio statmeni srautui profiliai ($Re_d = 45$) (dešinėje pjūvio vieta)	57
2.12 pav. Greičio ir slėgio profiliai kanalo pradžioje (sumodeliuoti esant $Re_d = 45$).....	57
2.13 pav. Greičio ir slėgio profiliai kanalo viduryje (sumodeliuoti esant $Re_d = 45$)	58
2.14 pav. Sumodeliuoto ir eksperimente išmatuoto slėgio perkryčio kanale priklausomybė nuo Re_d	58
2.15 pav. Greičio laukai, kai $Re_d = 150$	59
2.16 pav. Kanalo pradžios srauto linijos ($Re_d = 250$) a) eksperimentas [69]; b) modeliavimas	59
2.17 pav. Kanalo vidurio srauto linijos ($Re_d = 250$) a) eksperimentas [69]; b) modeliavimas	59
2.18 pav. Sraute stebimos skirtingos sukurių struktūros a) eksperimentas [69]; b) modeliavimas ..	60
3.1 pav. Slėgio perkrytis, kai cilindro formos kliūčių išdėstymas a) linijinis; b) šachmatinis	62
3.2 pav. Greičio lauko ir nestabilumo pradžios vietos priklausomybė nuo cilindro formos kliūčių skersmens, kai $Re_d = 210$	63
3.3 pav. Greičio profilis tarp dviejų 10 eilės kliūčių, kai $Re_d = 210$	63
3.4 pav. Srauto linijos kanalo pabaigoje, kai $Re_d = 210$	64

3.5 pav. Greičio ir nestabilumo pradžios vietos priklausomybė nuo cilindro formos kliūčių žingsnio, kai $Re_d = 210$	64
3.6 pav. Srauto linijos skirtingais laiko momentais, kai $Re_d = 90$	65
3.7 pav. Srauto linijos, kai $Re_d = 210$	65
3.8 pav. Srauto linijos, kai $Re_d = 180$	66
3.9 pav. Dviejų gretimų cilindro formos kliūčių kuriama tėkmės sūkurių interferencija: (a) pasienio zona; (b) kintamas prisijungimas; (c) kvazipastovus prisijungimas; (d) protarpinis sūkurių slinkimas; (e) netolydus šuolis; (f) dvilypė sūkurių eilutė [76]	66
3.10 pav. Srauto struktūros modelių priklausomybė nuo Re ir g^* parametrų [78].....	67
3.11 pav. Sūkurių slinkimo schema	67
3.12 pav. Sūkuringumo, greičio ir slėgio laukai, kai $Re_d = 180$, a) sūkuringumo kanalo pradžioje priklausomybė nuo išdėstymo rašto; b) laukai nurodytoje srityje (prasideda nuo 0,034 m); c) laukai srityje, kuri prasideda nuo 0,094 m	68
3.13 pav. Artimiausias atstumas iki kitos eilės kliūtis priklausomai nuo išdėstymo: a) linijinis, b) šachmatinis	69
3.14 pav. Laukai apie 10-ą kliūtį, kai $Re_d = 180$: a) greičio; b) greičio dedamosios statmenai tekėjimo krypčiai (y); c) slėgio.....	69
3.15 pav. Normalizuoto slėgio perkryčio priklausomybė nuo Re_d esant skirtingam šachmatiniam kliūčių išdėstymui.....	70
3.16 pav. Srauto linijos ir greičio laukas esant skirtingam šachmatiniam išdėstymui, kai $Re_d = 270$	71
3.17 pav. Srauto linijos ir greičio laukas S-D100-Px400-Py100, esant skirtingiems Re_d	71
3.18 pav. Slėgio perkrytis, kai elipsės formos kliūčių išdėstymas a) linijinis; b) šachmatinis	72
3.19 pav. Greičio lauko ir nestabilumo pradžios vietos priklausomybė nuo elipsės formos kliūčių ilgojo / trumpojo pusašio, kai $Re_d = 210$	72
3.20 pav. Srauto linijos Dx80-Dy100 atveju, kai $Re_d = 180$ ir 210	73
3.21 pav. Srauto linijų kanalo pabaigoje priklausomybė nuo kliūčių, kai $Re_d = 60, 150$ ir 270.....	74
3.22 pav. Srauto linijų kanalo pradžioje ir pabaigoje priklausomybė nuo kliūčių, kai $Re_d = 60, 150$ ir 270	76
3.23 pav. Simetriškų ir asimetriškų sūkurių schema.....	76
3.24 pav. Sūkurių sinchronizacijos žemėlapis: a) visas; b) siauresnė sritis su sūkurių schemomis [79]	77
3.25 pav. Periodinis sūkurių krypties pasikeitimas.....	78
3.26 pav. Greičio, greičio dedamosios statmenai tekėjimo krypčiai (y), sūkuringumo ir slėgio laukai, kai $Re_d = 270$	79
3.27 pav. Trimatė slėgio nuostolių ir tėkmės nestabilumo pradžios diagrama	80

Lentelių sąrašas

1.1 lentelė. Kanalų klasifikacija pagal Kandlikar'ą ir Grande'ą [3]	19
2.1 lentelė. Eksperimentinio prietaiso matmenys	46
2.2 lentelė. Tinklelių charakteristikos	54
2.3 lentelė. Naudotos kraštinės sąlygos	54
2.4 lentelė. Slėgio skirtumai esant skirtingiems tinkleliams ir Re_d	55
2.5 lentelė. Vidutinės y^+ kriterijaus vertės esant skirtingiems tinkleliams ir Re_d	56
2.6 lentelė. Slėgio perkryčio kanale priklausomai Re_d palyginimas modeliuojant tik dalį kanalo ...	57
3.1 lentelė. Ištirtų mikrokanalų konfigūracijos	61
3.2 lentelė. Kanalo sričių aprašymas.....	62
3.3 lentelė. Tekėjimo nestabilumo pasireiškimo vieta mikrokanale su cilindro formos kliūtimis ...	62
3.4 lentelė. Tekėjimo nestabilumo pasireiškimo vieta mikrokanale su elipsės formos kliūtimis	72
3.5 lentelė. Kliūčių santykinis naudingas paviršiaus plotas mikrokanaluose	80

Terminų sąrašas

Terminai:

Sūkurių slinkimas (angl. *vortex shedding*) – tėkmės svyravimas už kliūties, kai generuojami sūkurių periodiškai atitrūksta vis nuo priešingo kliūties paviršiaus, taip suformuodami Von Karmano sūkurių eilutę.

Recirkuliacinė sritis (angl. *recirculation zone*) – už kliūties susidaręs stovintis sūkurys.

Sužadintas regionas (angl. *wake region*) – sūkurių apimta tėkmės dalis.

Sūkuringimas (angl. *vorticity*) – tai pseudo vektorinis laukas, išreiškiamas sūkais per sekundę, jo matavimo vienetai s^{-1} . Matematiškai išreiškiamas: $rot v = \nabla \times v$ – greičio lauko sukamasis judesys.

Įvadas

Aktualumas. Nuolat tobulėjant elektroniniams prietaisams, siekiama padaryti juos kuo mažesnius ir našesnius, tuomet susiduriama su šilumos išsklaidymo problema. Jėgos elektronika ir mikrolustai – integrinės mikroschemos ir / ar grandynai, naudojami kompiuteriuose, medicinos aparatuose, informacijos perdavimo sistemose, erdvėlaiviuose ir kitur, susideda iš kelių didelės galios ar daugybės mažų elektroninę-skylinę (p-n) sandūrą turinčių elementų. Deja, jų veikimo energijos nuostoliai išskiria šilumą, o nuo temperatūros režimo priklauso maksimalus veikimo dažnis, efektyvumas ir ilgaamžiškumas. Siekiant elektroninių prietaisų temperatūrą palaikyti tinkamose ribose, buvo pasiūlyti įvairūs aušinimo sprendimai. Vienas iš jų - nebrangūs beklūčiai mikrokanalai (tiesūs kanalai). Tačiau jų termohidraulinis efektyvumas prastas. Priimtinu slėgio kritimu kanale pasiekiamas debito ir perduodamo šilumos srauto tankio derinys palieka per didelį temperatūros skirtumą tarp mikrošilumokaičio įtekėjimo ir ištekėjimo vietų. Tai neužtikrina tolygaus prietaiso aušinimo, todėl negali reikšmingai padidinti eksploataavimo laiko ir patikimumo. Sudėtingi mikrokanalai su kliūtimis šiuo atžvilgiu pranašesni. Plačiai išnagrinėtos įvairių mikrokanalų termohidraulinės savybės labai priklauso nuo šilumnešio tekėjimo jais hidrodinaminių sąlygų. Būtent jų tyrimų šiuo metu vis dar labai trūksta. Vienas plačiai ištirtų ir vis dar tebetiriamų kertinių hidrodinamikos uždavinių – cilindro aptekėjimas, jis yra glaudžiai susijęs su tekėjimu cilindrinėse kliūčių masyvu. Tačiau vien jo nepakanka, norint išnagrinėti visus tekėjimo sudėtingu mikrokanalu aspektus, nes pasroviui periodiškai nuolat trikdoma tėkmė tampa ypač sudėtinga. Todėl siekiant projektuoti mikrokanalų termohidraulines savybes, reikia pirma ištirti ir gebėti prognozuoti tekėjimo struktūros savybes bei kitimo dėsningumus.

Skaitiniai modeliavimo metodai yra vis dažniau taikomi norint optimizuoti įvairius procesus ar gilinti fizikinių reiškinių supratimą, kai jų eksperimentiniai tyrimai labai sudėtingi ar net neįmanomi. Tačiau kuo sudėtingesnis skaičiuojamosios fluidų dinamikos uždavinys, tuo jo sprendimui sunkiau parinkti optimalaus santykio tarp realybės atspindėjimo ir skaičiavimo spartos metodus ir algoritmus.

Tyrimo tikslas – skaitiniais metodais ištirti skysčio tekėjimą sudėtingame mikrokanale ir jį optimizuoti.

Tyrimo objektas – mikrokanalų, su cilindro ir elipsės formos kliūtimis, srauto struktūra ir hidraulinės savybės.

Tyrimo uždaviniai:

1. atlikti literatūros apie mikrokanalus ir jau atliktus optimizavimo darbus analizę;
2. aprašyti geometrinę tekėjimo sudėtingame kanale struktūrą ir sukurti erdvės diskretizacijos tinklą;
3. pasirinkti skaitinius metodus norimam modeliuoti tekėjimui;
4. skaitiškai sumodeliuoti realų eksperimentą naudojantis *OpenFOAM* programine įranga;
5. ištirti skysčių tekėjimo skirtingų geometrinių konfigūracijų mikrokanaluose dėsningumus, juos palyginti tarpusavyje.

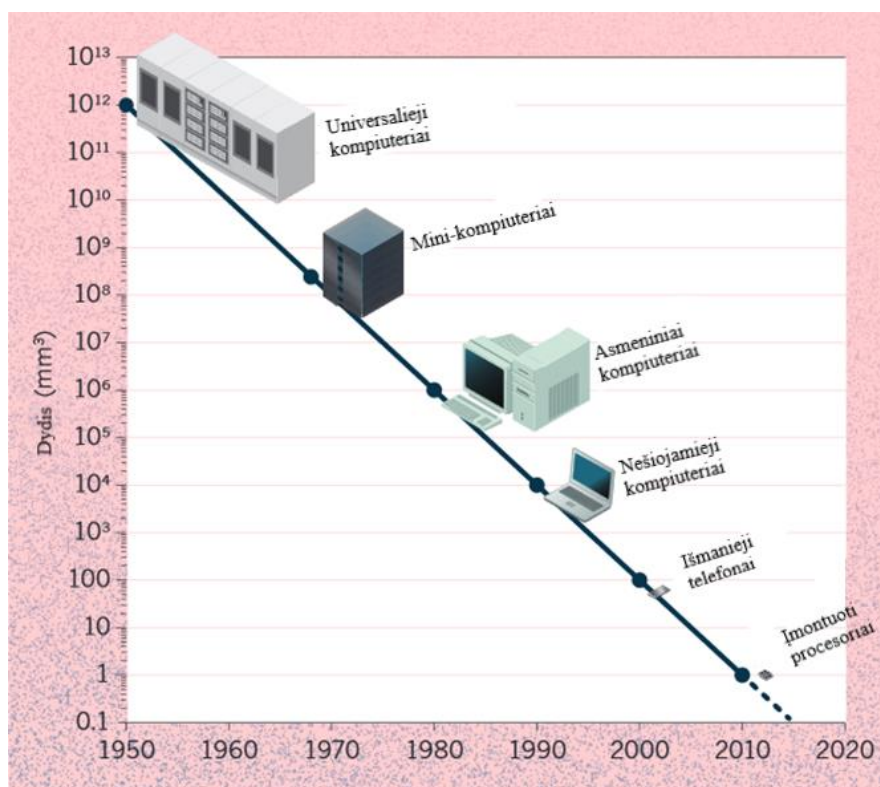
Tyrimo metodai – skaitiniai skaičiuojamosios skysčių ir dujų dinamikos modeliavimo metodai, naudojantis *OpenFOAM* programine įranga.

Darbo struktūra. Magisto darbą sudaro įvadas, trys skyriai, santrauka. Pirmame skyriuje išnagrinėta literatūra, kitų autorių atlikti darbai mikrokanalų tematika. Antrame skyriuje aprašyta atlikta skaitinio metodo validacija. Trečiame skyriuje pateikti mikrokanalo optimizacijos skaitiniai rezultatai.

Darbo rezultatai buvo pristatyti dviejose konferencijose (žr. 1 Priedas).

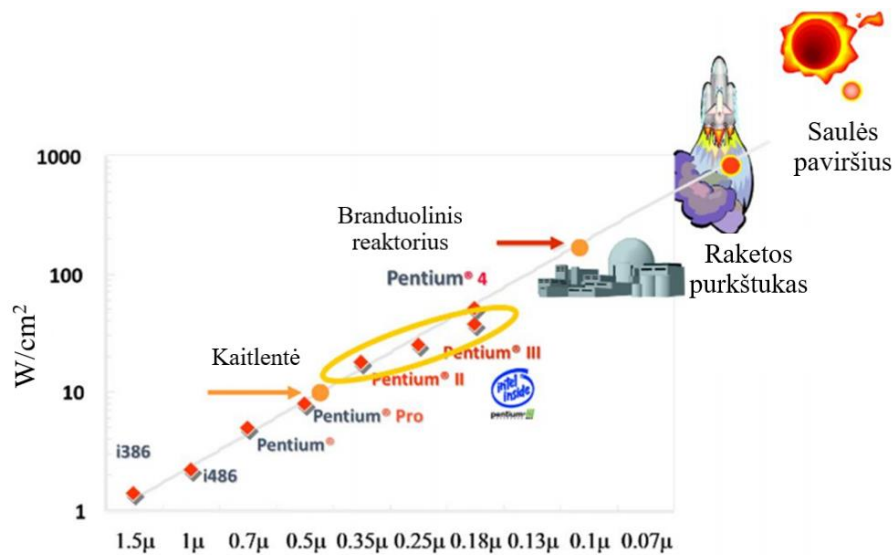
1. Literatūros apžvalga

Technologinė pažanga per pastaruosius metus ir dešimtmečius privedė prie gerokai sumažėjusių elektroninių prietaisų matmenų ir visų šilumos technologijų tobulėjimo. Viena iš prognozių buvo pristatyta Moore'o dėsnio pavadinimu, kuris teigia, kad tranzistorių skaičius integrinėse schemose dvigubėja kas 18 mėnesių [1]. Vadinasi, elektroninių prietaisų galia didėja, o dydis mažėja. Nors matmenys ir sumažėjo, tai nesumažino, o net padidino išskiriamos šilumos kiekį. Todėl gaminant įvairius elektroninius prietaisus tenka užtikrinti gerą vis didesnio šilumos kiekio išsklaidymą, nuo vis mažesnio šilumą išskiriančio paviršiaus.



1.1 pav. Moore'o dėsnis [1]

Šiuo metu maksimalus procesoriaus branduolių dažnis siekia 3-4 GHz, 1.2 pav. aukščiausiai esančio Intel Pentium 4 siekia 3,8 GHz. Kuo didesnis dažnis, tuo labiau jis kaista. Šiuolaikinės technologijos jau leistų naudoti dešimčių GHz dažnius, bet susiduriama su energijos išsklaidymo problema. Maksimalūs dažniai yra ribojami, kad būtų išlaikyti komponentų saugumo reikalavimai. Dėl ribojimo buvo surastas būdas, kaip nedidinant procesorių dažnio kelti jų našumą, tai kelių branduolių procesoriai bei jų darbas vykdamas kelių gijų programą (angl. *multi-tread*). Taigi, Moore'o dėsnis yra išlaikomas didinant elektroninių komponentų skaičių, jų matmenis mažinant ar keičiant branduolių procesorių darbo režimą. Vis tik yra sudėtinga sugalvoti naują našumo padidinimo būdą, todėl reikia grįžti prie senos problemos ir užtikrinti efektyvų šilumos nuvedimo būdą.



1.2 pav. Galios tankis paeiliui einantiems mazgams [2]

Labiausiai paplitę šilumos perdavimo įrenginiai yra įvairūs šilumokaičiai. Pagrindiniai siekiai projektuojant šilumokaičius yra didelis perduodamo šilumos srauto ir slėgio kritimo santykis bei kuo paprastesnė konstrukcija ir gamyba. Nuolat siekiama juos pagerinti, t. y. optimizuoti mažinant šiluminę ir hidraulinę varžas, gamybos kaštus ir eksploatacijos išlaidas.

Veiksniai, nuo kurių priklauso šilumokaičių eksploatacinės savybės:

- šilumnešio savybės ir tekėjimo greitis;
- šilumokaičio medžiagos savybės ir šilumokaitos paviršių šiurkštumas;
- geometrinė šilumnešio tekėjimą nukreipiančių šilumokaitos paviršių forma.

1.1. Šilumokaičių klasifikacija pagal dydį

Srauto ir šilumos perdavimo charakteristikos kinta priklausomai nuo šilumokaičių dydžio. Vieną iš šilumokaičių tipų – kanalus, Kandlikar'as ir Grande'as [3] suskirstė pagal jų hidraulinį skersmenį D_h (žr. 1.1 lentelė).

1.1 lentelė. Kanalų klasifikacija pagal Kandlikar'ą ir Grande'ą [3]

Tradiciniai kanalai	$D_h > 3 \text{ mm}$
Mini-kanalai	$3 \text{ mm} > D_h > 200 \text{ } \mu\text{m}$
Mikrokanalai	$200 \text{ } \mu\text{m} > D_h > 10 \text{ } \mu\text{m}$
Pereinamieji mikrokanalai	$10 \text{ } \mu\text{m} > D_h > 1 \text{ } \mu\text{m}$
Pereinamieji nanokanalai	$1 \text{ } \mu\text{m} > D_h > 0,1 \text{ } \mu\text{m}$
Molekuliniai nanokanalai	$0,1 \text{ } \mu\text{m} > D_h$

Ilgio skalei kanale siekiant mikro- ar nanometrų, klasikinis modeliavimas gali būti netinkamas. Patikrinimas vyksta pasitelkiant Knudseno skaičių, kuris apibrėžiamas kaip vidutinio molekulinio laisvojo kelio λ ir būdingojo matmens santykis:

$$Kn = \frac{\lambda}{D_h} \quad (1)$$

- jeigu $Kn \leq 10^{-3}$ tekėjimas gali būti laikomas kontinuumu (t. y., galioja neslydimo (angl. *nonslip*) sąlyga);
- kai $0,001 \leq Kn \leq 0,1$ galioja slydimo (angl. *slip*) režimas;
- kai $Kn \leq 10$ – laisvasis molekulinis tekėjimas.

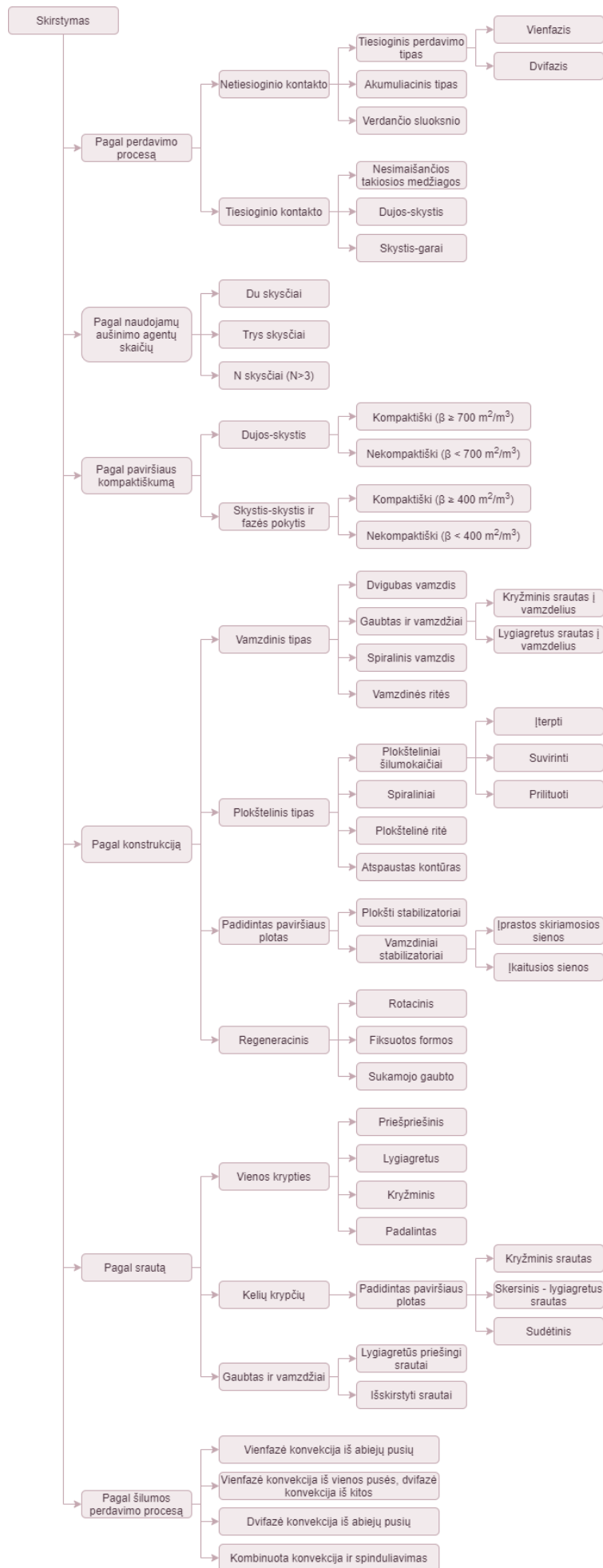
Navjė-Stokso lygtys pateikia tikslų sprendinį, kai vidutinis molekulinis kelias yra daug mažesnis už būdingą ilgį. Esant slydimo režimui Navjė-Stokso lygtys sprendžiamos su modifikuotomis kraštinėmis sąlygomis (angl. *boundary conditions*). Kieto kūno – skysčio riboje taikomos slydimo ir temperatūros šuolio kraštinės sąlygos, nors jų rezultatai esant dujų tekėjimui patenkinami, nėra bendro sutarimo dėl skysčių tekėjimo. Kadangi Knudseno vertė yra daug mažesnė skysčiams, nei dujoms, juose galima taikyti tolydziosios terpės (kontinuumo) modelį.

1.1. Mikrošilumokaičiai

Elektronikos prietaisai su mikroprocesoriais, baterijomis, įvairias diodais ir tranzistoriais tapo svarbia šiuolaikinio gyvenimo dalimi. Prietaisų komponentais tekant elektros srovei yra išskiriama šiluma. Didėjant temperatūrai, didėja elektronikos komponentų medžiagų elektrinė varža ir šilumos yra išskiriama dar daugiau. Tačiau temperatūros režimas ne tik turi įtakos prietaisų veikimo parametrams, bet lemia jų patikimumą. Temperatūrai viršijus leistinas ribas, pradeda irti vidinė komponentų struktūra (konstrukcinės medžiagos keičia savo būvį, perkaista puslaidininkių kristalai). Nepaisant gerėjančių energetinio efektyvumo ir apsaugos nuo perkaitimo, aukštųjų technologijų pramonė susiduria su sunkiai sprendžiama šilumos nuvedimo problema. Šiuo metu yra keliamas ambicingas tikslas pasiekti nuvedamos šilumos srauto tankį lygų 1000 W/cm^2 , aušinamo paviršiaus temperatūrai neviršijant $100 \text{ }^\circ\text{C}$ [4]. Didelės galios lazerių aušinimui reikia net 10000 W/cm^2 . Taigi, norint išspręsti problemą, reikalingas didelio našumo ir ekonomiškai patrauklus aušinimo sprendimas.

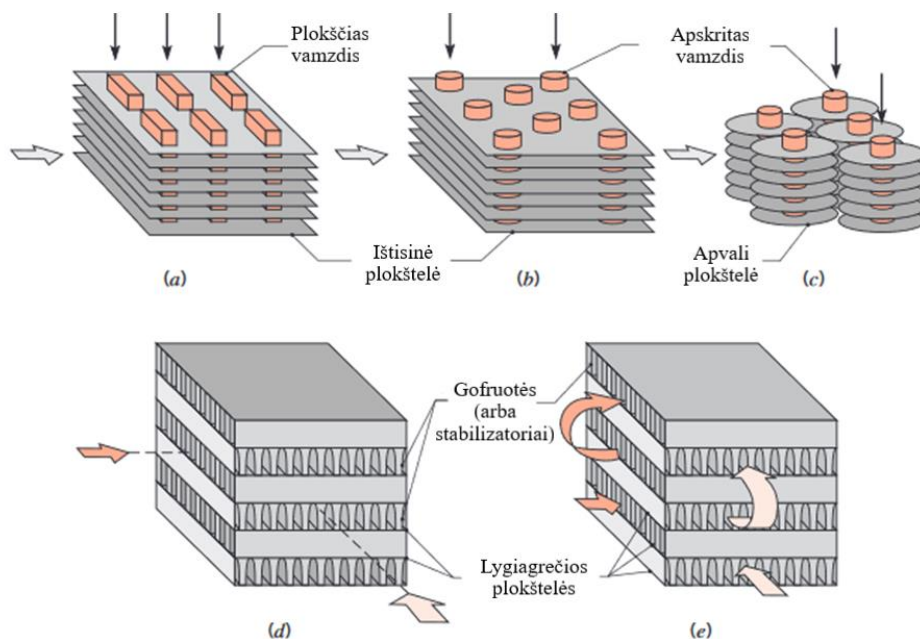
Šilumos nuvedimo būdai gali būti grupuojami į pasyvius ir aktyvius. Aktyvus šilumos perdavimo metodas pagrįstas išorinės energijos naudojimu: priverčiant tekėti šilumnešius, sukant šilumos perdavimo paviršius, sukelti vibracijas ar generuojant elektrostatiškus laukus. Paprasčiausi pasyvūs šilumokaičiai veikia kaip radiatoriai ir naudoja natūralią aplinkos oro konvekciją. Žemės traukos ir šilumnešio tankio kitimu varoma natūrali cirkuliacija patraukli kaip ekonomiškai ir energiją taupantis sprendimas. Tačiau priverstine konvekcija, priklausomai nuo šilumnešio savybių ir temperatūros skirtumo, galima perduoti daug daugiau šilumos nei natūralia. Nuo vietinių klamos, greičio ir su tėkme besiribojančių paviršių priklausantis tekėjimo režimas turi didžiulę įtaką šilumos perdavimui. Laminarinio režimo šilumos perdavimo koeficientas nedidelis – tolyn nuo šilumokaitos paviršių šiluma perduodama laidumu. Pereinamuoju ar turbulentišku režimu generuojamais sukurtais šiluma nuo paviršių perduodama gerokai efektyviau, bet reikšmingai didėja ir slėgio nuostoliai [5].

Šilumokaičiai gali būti klasifikuojami įvairiai: pagal perdavimo procesą, tipą, konstrukciją, tėkmės struktūrą ir t. t., tai apibendrinta 1.3 pav.



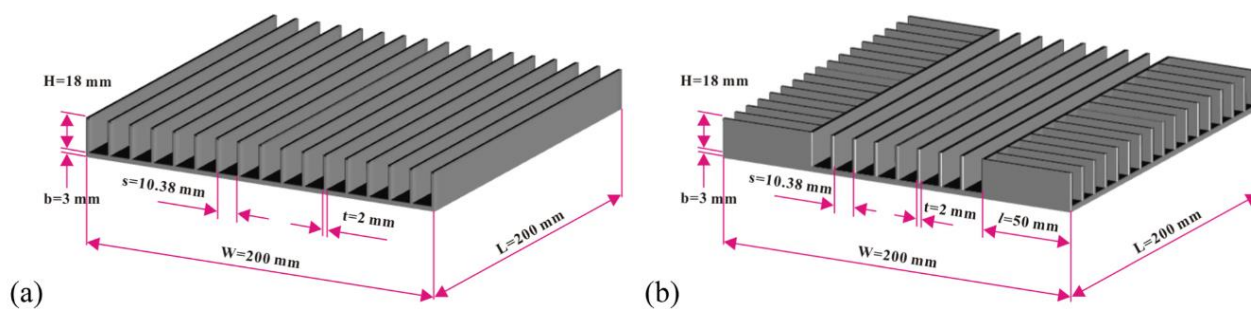
1.3 pav. Šilumokaičių tipai (parengta pagal [5])

Elektronikos aušinimui labiausiai paplitę kompaktiški šilumokaičiai – šie įtaisai turi tankias vamzdelių ar plokštelių matricas [6]. Jie vadinami kompaktiškais, nes paviršiaus ploto tankis β (paviršiaus ploto ir tūrio santykis) yra didesnis nei $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Jie priskiriami laminarinio tekėjimo šilumokaičiams, kai $\beta > 3000 \text{ m}^2/\text{m}^3$, o kai $\beta > 10000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ jau laikomi mikrošilumokaičiais [7].

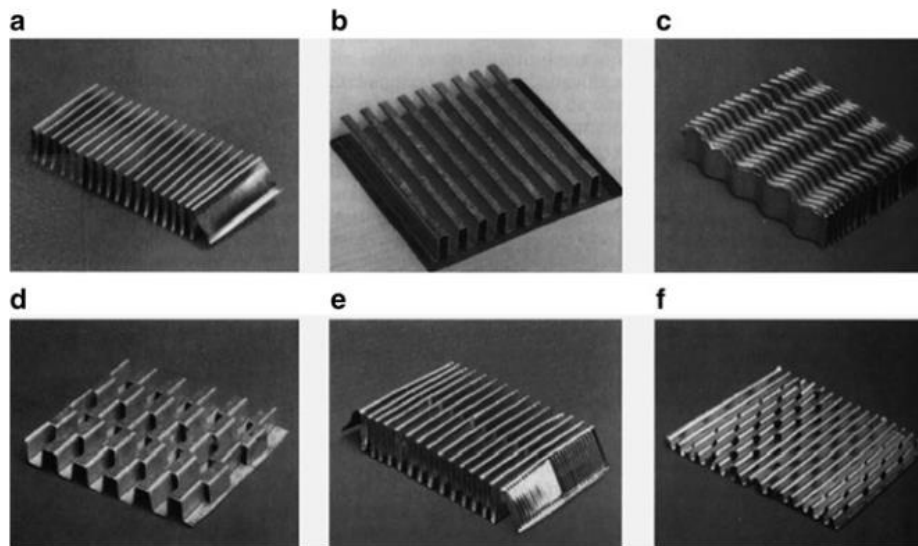


1.4 pav. Kompaktiški šilumokaičiai: a) plokštelė-vamzdis (plokšti vamzdžiai, ištisinės plokštelės); b) plokštelė-vamzdis (apvalūs vamzdeliai, ištisinės plokštelės); c) plokštelė-vamzdis (apvalūs vamzdeliai, apvalios plokštelės); d) plokštelė-stabilizatoriai (vieno perdavimo); e) plokštelė-stabilizatoriai (kelių perdavimų) [6]

Plokštelinio tipo šilumokaičiuose didelis paviršiaus ploto tankis sukuriamas panaudojant daugybę plokštelių, taip sutankinant ir padidinant šilumokaitos paviršius [8]. Plokštelės gali būti įvairių formų (pavyzdžiui, 1.5 pav. ir 1.6 pav.) ir jų išdėstymas kisti tam, kad tėkmė būtų priversta tekėti norima kryptimi.



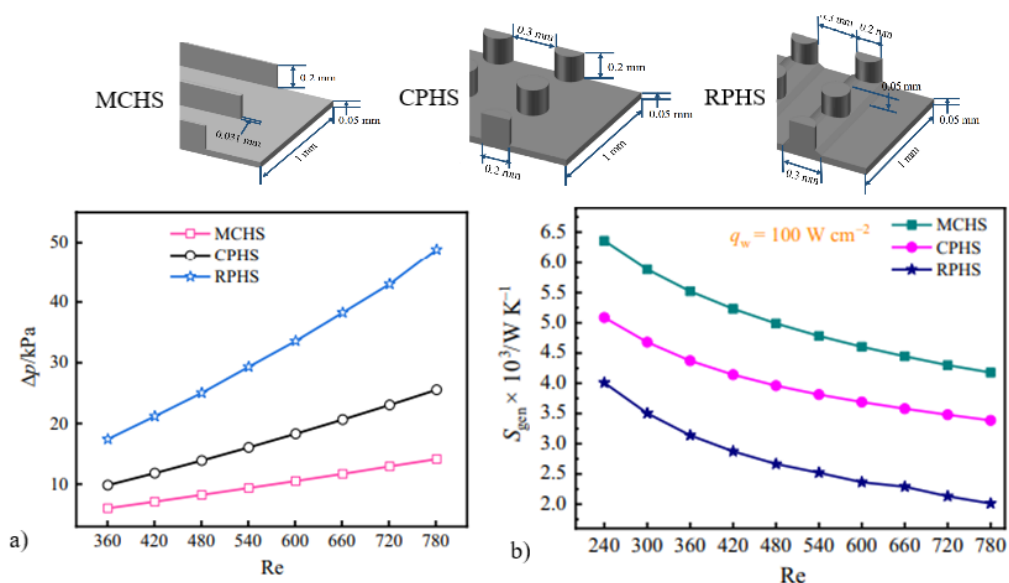
1.5 pav. a) Įprastas plokštelinis šilumokaitis; b) kryžminis plokštelinis šilumokaitis [8]



1.6 pav. Gofruoti plokšteliniai šilumokaičiai: a) paprastas trikampis; b) paprastas keturkampis; c) banguotas; d) kontrastingų smulkių juostų; e) daugiasluoksnis; f) perforuotas [7]

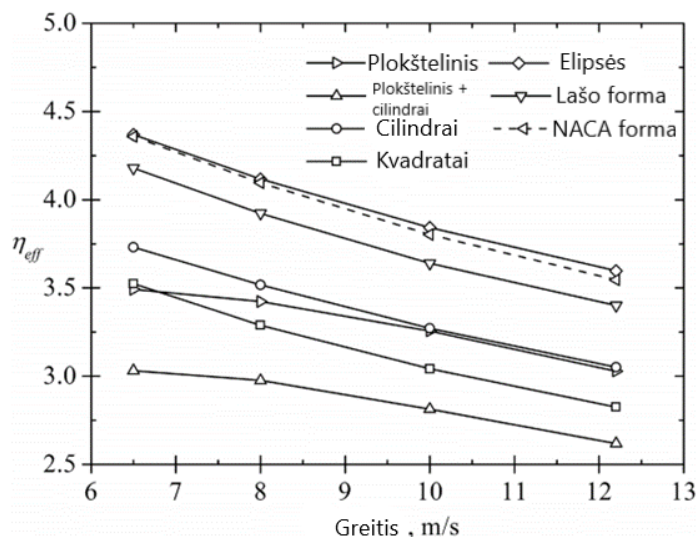
Gofruota plokštelių forma priverčia tekėti vis keisti savo kryptį, taip sukuriant didelius šilumnešio tekėjimo greičio ir temperatūros gradientus. Tai gerokai padidina vietinį šilumos perdavimo koeficientą. Visgi tokio šilumos koeficiento padidinimo kaina yra slėgio nuostoliai [7].

Kadangi dažniausiai naudojami mikrošilumokaičiai yra arba plokšteliniai, arba kanalai, turintys kliūtis, buvo atlikti tyrimai siekiant išsiaiškinti, kuris tipas yra efektyvesnis [9]. Išsiaiškinta, kad plokštelinio šilumokaičio tūryje perduodama daugiau šilumos, tačiau analogišką šilumos srautą perduodantys kanalai su kliūtimis yra lengvesni. Kiti tyrimai parodė, jog dėl kliūčių kintant kanalo skerspjūvio plotui susidaro neigiamo slėgio gradiento zonos ir gerokai padidėja slėgio nuostoliai (žr. 1.7 pav. a)) [10, 11]. Nors nuostoliai didesni, juos atsveria mažesnis entropijos didėjimas (žr. 1.7 pav. b)). Tai parodo, kad kanalai su kliūtimis turi geresnes eksploatacines savybes už plokštelines šilumokaičius.



1.7 pav. Slėgio nuostolių (a) ir entropijos (b) didėjimo priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus [10]

Dar buvo palygintas plokštelių šilumokaičių ir kanalų su įvairiomis kliūtimis termohidraulinis efektyvumas (šilumos srauto santykis su darbu sunaudojamu šilumnešio tekėjimui). Pastebėta, kad plokštelinis ir kanalas su cilindrinėmis kliūtimis yra panašūs. Tačiau, skirtingai nei kitokių formų, aptakių kliūčių termohidraulinis efektyvumas gerokai didesnis. Jos užtikrina didelį šilumokaitos plotą su mažais hidrauliniiais nuostoliais, nes generuoja mažiau sūkurių [12]. Dėl tokio mikrokanalų pranašumo, jie nagrinėjami toliau.

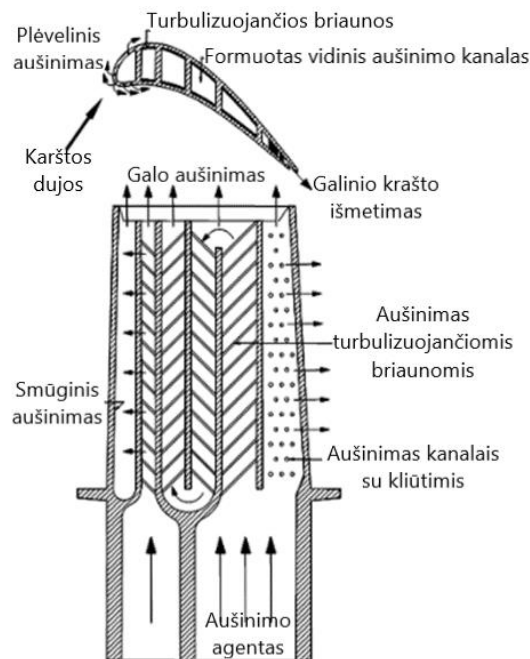


1.8 pav. Šilumokaičių efektyvumo priklausomybė šilumnešio nuo greičio [12]

1.2. Mikrokanalai

Vienas iš efektyvesnių aušinimo sprendimų yra mikrokanalai. Iš jų masyvių konstruojami mažo dydžio šilumokaičiai, naudojami didelio energijos tankio prietaisuose, tokiuose kaip mikroelektroninės mechaninės sistemos (angl. *Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*), mikroprocesoriai, šviesos diodai (angl. *Light Emitting Diodes (LED)*) [13]. Būtent maži matmenys užtikrina didesnę šilumos perdavimo koeficientą, palyginti su didesniu kanalu. Mikrokanalų šilumos perdavimo efektyvumui turi įtakos daugybė veiksnių, tokių kaip: kanalo geometrinė struktūra, paviršiaus šiurkštumas, aušinimo skysčio savybės, elektrostatinių jėgų poveikis, kanalo sienelių ašinis šilumos laidumas ir kt. Todėl į šiuos faktorius reikia atsižvelgti kuriant mikrokanalų šilumokaičius.

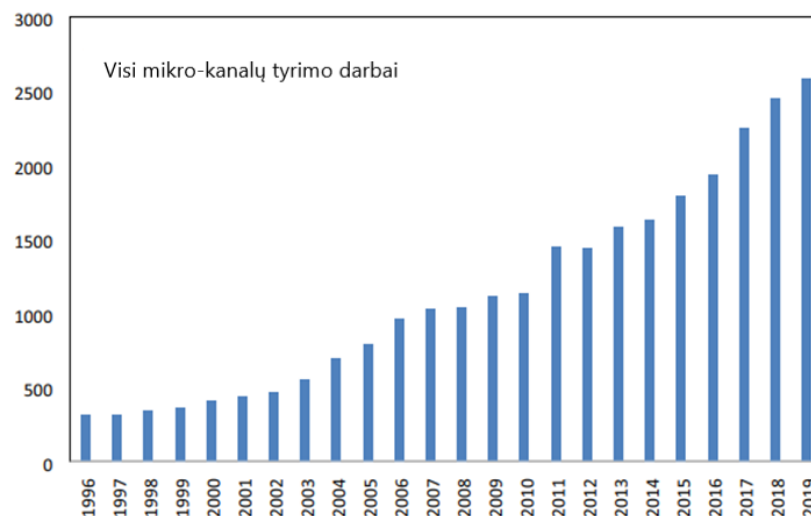
Mikrokanalai naudojami ne tik elektroniniams prietaisams aušinti, bet ir moderniose turbinų mentėse [14], čia kaip vidiniai aušinimo būdai naudojami turbulizuojančios briaunos ir mikrokanalai su kliūtimis. Skirtingoje mentės vietoje, priklausomai nuo reikalingo nuvesti šilumos kiekio, naudojamas skirtingas metodas. Mikrokanalai dažniausiai naudojami menčių galiniame krašte, kur mikrokliūtys ne tik padidina vidinio paviršiaus plotą, bet ir sutvirtina tuščiavidurę konstrukciją.



1.9 pav. Modernios dujų turbinos mentė [14]

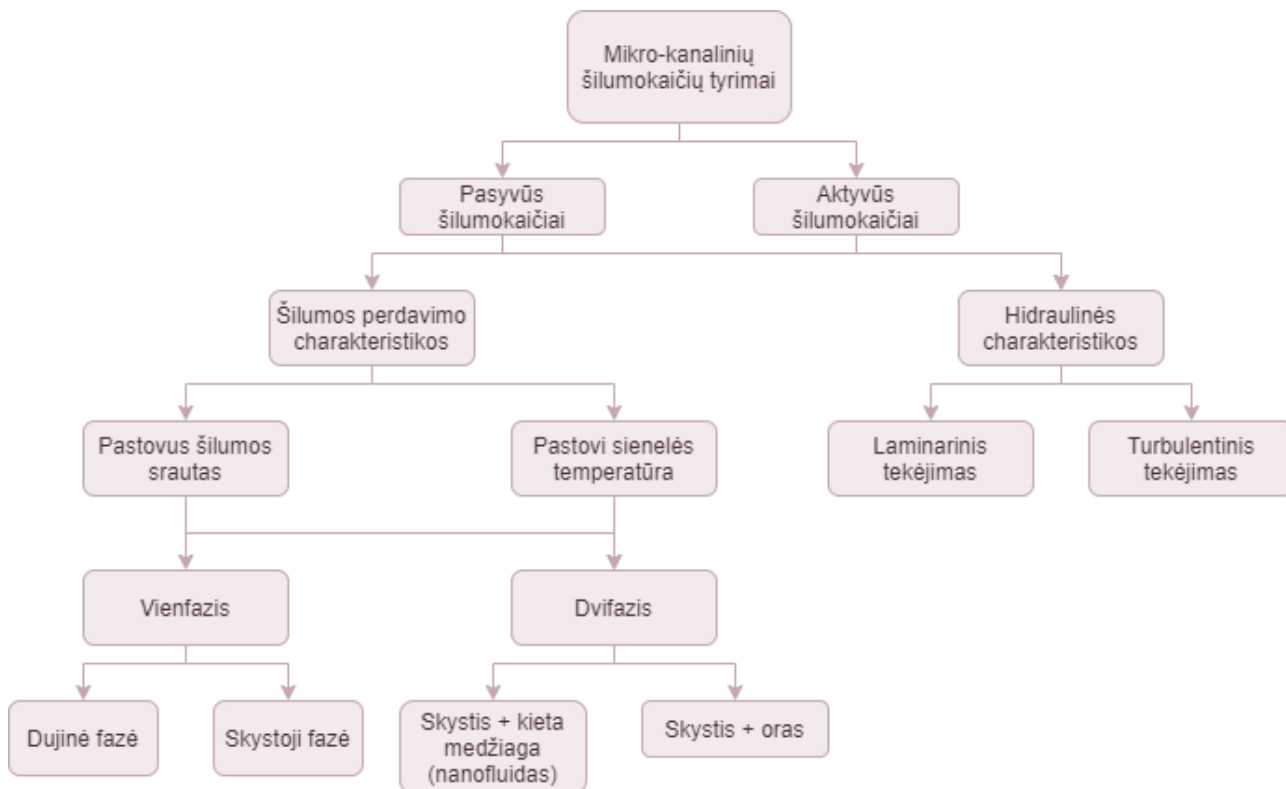
Nors tyrimai, siekiant optimizuoti šiuos šilumokaičius, pradėti gan senai, jie tebetęsiami dėl plataus mikrokanalų pritaikymo. Bene pirmasis mokslininkas, susijęs su kanalais, turinčiais kliūtis, pradėjo Žukauskas [15] dar 1972 metais. Jo darbo tikslas buvo patobulinti branduolinio reaktoriaus šilumokaičius. Nors nenaudojo mikromatmenų skalės, o kliūčių aukščio / skersmens santykis buvo didelis (toks, kad skersinius cilindrus galima laikyti be galo ilgais – viršutinė ir apatinė kanalo sienos neturi didelės įtakos), bet jo darbas buvo gera atspirtis kitiems. Po beveik dešimtmečio Tuckerman'as ir kt. [16] atliko mikrokanalų tyrimą ir pastebėjo, kad mažiuose tūriuose jie labai efektyvūs. Todėl po to sekė vis daugiau tyrimų, skirtų mikrokanalams.

Šiuo metu mikrokanalų tyrimai yra gan paplitę, mokslinių straipsnių pastaraisiais metais per metus parašoma daugiau nei 2000 (žr. 1.10 pav.). Tai parodo, kad ši sritis yra progresyvi ir vis dar neištirta pakankamai.



1.10 pav. Moksliniai straipsniai rasti įvedus raktažodį *micro-channels* nuo 1996 iki 2019 metų (duomenys surinkti iš Elsevier) [17]

Su mikrokanalais, kaip šilumokaičiais, susijusių tyrimo sričių yra daug, bet jos yra skirstomos į šiluminių ir hidraulinių savybių analizę (žr. 1.11 pav.). Toliau bus aptartos abi grupės charakteristikų, esant skirtingoms kanalų geometrijos ypatybėms, tokioms kaip: kliūčių forma, jų išdėstymas, kanalo aukščio (ar kliūčių aukščio) santykis su kliūčių skersmeniu, bei pristatyti įdomesni mikrokanalų struktūros atvejai.



1.11 pav. Mikrokanalų tyrimo sritys [17]

1.3. Geometrinė struktūra

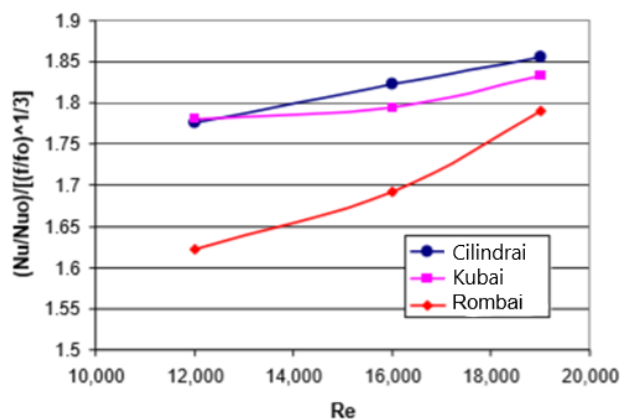
Vieni iš labiausiai paplitusių elektroninių prietaisų aušinimo priemonių yra mikrokanalai su įvairios formos kliūčių masyvais. Yra įvairių mikrokanalų, atsižvelgiant į kliūčių formą, išdėstymo schemą ir kryptį pagrindinės tėkmės atžvilgiu. Dažniausiai naudojama kliūčių forma yra cilindrinė, stačiakampė arba kūginė. Bet esama ir kitokių – elipsinių, trikampių, šešiakampių, lašo formos ar net piranijos peleko formos. Tiriami ir mikrokanalai su kliūčių masyvais imituojančiais kristalinių gardelių struktūrą. Pavyzdžiui, kubinės: centruoto tūrio (angl. *body-centred cubic (BCC)*), viršūnės (angl. *vertex cubic (VC)*) ar centruotų paviršių (*FCC*) (angl. *face centered cubic*). Išdėstymas taip pat kinta, jis gali būti šachmatinis (angl. *staggered*) arba linijinis (angl. *in-line*).

1.3.1. Kliūčių forma (formos / matmens kitimas)

Tiek šiluminės, tiek hidraulinės savybės nuo kliūčių formos priklauso gan aiškiai ir intuityviai galima nuspėti, kad kuo aptakesnė kliūtis forma, tuo efektyvesnis bus aušinimas, dėl sumažėjusių slėgio nuostolių ir mažesnių susidarančių recirkuliacinių stagnacijos sričių.

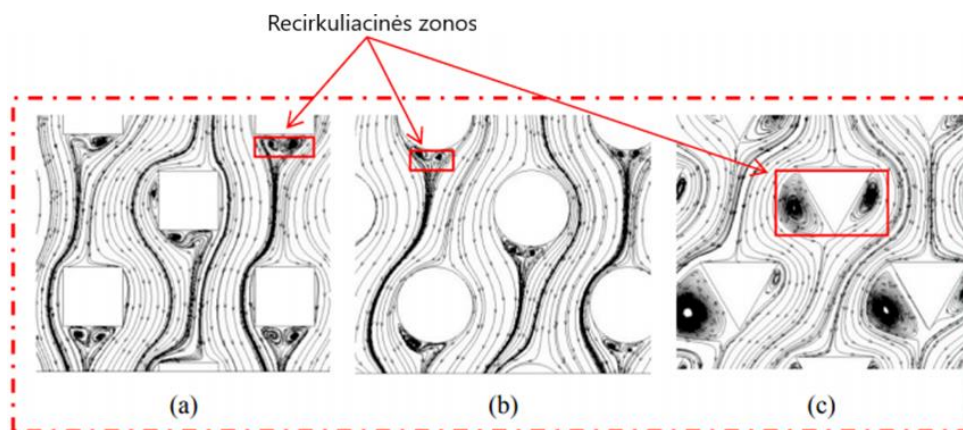
Daugiausia tirti cilindrinę kliūčių mikrokanalai. Siekdami išsiaiškinti jų šiluminės eksploatacines savybes Chyu'us ir kt. atliko kelis tyrimus [18, 19, 20]. Viename tyrime buvo palyginta cilindro, kubo ir rombo formos kliūčių įtaka. Pastarųjų kliūčių masyvas šilumą perdavė geriausiai, o cilindro

prasčiausiai. Kita vertus, cilindro formos kliūtis sukuriama slėgio nuostoliai buvo mažiausi, o termohidraulinis efektyvumas didžiausias (žr. 1.12 pav.) [18].



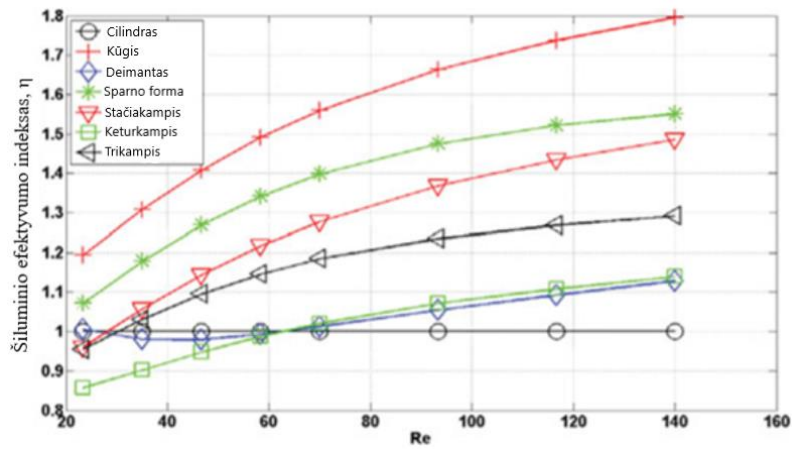
1.12 pav. Efektyvumo indekso priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus [18]

Kitų mokslininkų atliktuose tyrimuose cilindro formos kliūčių mikrokanalo slėgio perkrytis buvo didžiausias, net lyginant su deimanto ar trikampio [21]. Ambreen ir kt. [22] skaitiniais tyrimais palygino cilindro, rombo ir elipsės formos kliūtis. Vėlgi, buvo gauta, kad efektyvesnis mikrokanalas su cilindro arba elipsės formų kliūtėmis. Vėliau Ambreen ir kt. [23, 24] atliko tolesnius tyrimus, tik jau palygino cilindro su stačiakampio ir trikampio arba šešiakampio formos kliūtėmis. Geriausi rezultatai gauti su cilindro formos kliūtėmis, jas sekė šešiakampio, kvadrato ir trikampio. Kaip teigiama straipsniuose, nuo cilindro formos kliūtės, priešingai nei kvadrato, trikampio ar šešiakampio, stebimas mažesnis pasienio sluoksnio atsiskyrimas. Aptaki forma taip pat leidžia susidaryti stipresniam antriniam tekėjimui (žr. 2.12 pav.) tiek skersai, tiek išilgai aptekamų kliūčių paviršių. Geresnis visų kontaktinių paviršių aptekėjimas lemia geresnį šilumos perdavimą į pasienio sluoksnį, o intensyvesnė konvekcija – pernašą į šilumnešio gilumą.



1.13 pav. Srauto linijos a) kvadratinių; b) cilindrinė; c) trikampių kliūčių masyvuose, kai $\Delta p = 2760$ Pa [23]

Izci'is ir kt. [25] tyrė tekėjimą mikrokanaluose su cilindro, kūgio, deimanto, sparno, stačiakampio, keturkampio ir trikampio formos kliūtėmis. Didžiausias šilumos perdavimo koeficientas gautas stačiakampio formos kliūčių masyvu. Jame šilumokaitos paviršių plotas pats didžiausias, o tėkmės pasienio sluoksnis lengvai atsiskiria nuo aštrių kliūčių kampų. Tačiau jo šiluminis efektyvumas nėra didžiausias. Didėjant Reinoldso skaičiui (žr. 1.14 pav.), kūgio formos kliūtys (čia kūgio forma yra kliūtės skerspjūvis – pusė skerspjūvio atitinka apskritimą, o kita pusė trikampį, bet nenurodo jo kitimo tėkmei statmena kryptimi) buvo efektyviausios.

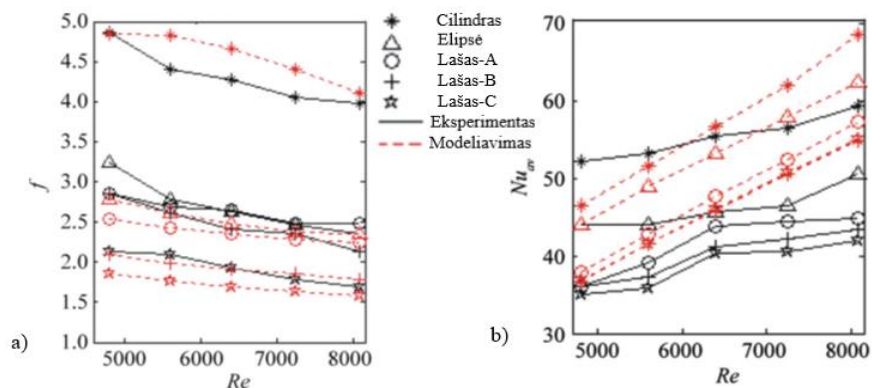


1.14 pav. Skirtingiems mikrokanalų šiluminio efektyvumo priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus [25]

Wang'as ir kt. [26] taip pat tyrė įvairių kliūčių masių mikrokanalus. Kliūtys buvo labai panašios kaip ir [25] tyrime – cilindro, kvadrato, rombo ir sparno formos. Esant mažam Reinoldso skaičiui visų kliūčių masių rezultatai buvo daugmaž panašūs, skirtumai išryškėjo didinant debitą. Aptakiausias – sparno formos kliūčių, mikrokanalas nebuvo optimalus. Efektyviausiu buvo kanalas su rombo formos kliūtėmis, kuriame, nepaisant aštrių jų kampų, išmatuotas mažiausias slėgio kritimas.

Dar vieną įvairių kliūčių tyrimą atliko Siw'as ir kt. [27]. Jie palygino cilindro, pusės cilindro ir trikampio formos kliūčių įtaką šilumos perdavimui, kai Reinoldso skaičius didelis. Šiuo atveju geriausia kliūčių forma buvo trikampė. Jų aštrūs kampai suintensyvina turbulenciją, todėl šilumos srautas padidėjo net 10-20 %, o pusės cilindro formos kliūčių naudingumas buvo mažiausias.

Nors cilindro forma lyg ir atrodo efektyviausia bei paprasčiausia, Wang'as ir kt. [28] manė, kad didžiausias jos trūkumas yra ankstyvas pasienio sluoksnio atitrūkimas nuo kliūties paviršiaus. Aptakesnė kliūties forma sumažintų už jos susidarančios nenaudingos recirkuliacijos srities plotį. Tam pagrįsti jie ištyrė skirtingo hidraulinio skersmens lašo formos kliūčių įtaką ir ją palygino su cilindro ir elipsės. Rezultatai parodė, kad kuo aptakesnė kliūties forma, tuo toliau ar mažiau nuo jos paviršiaus atitrūksta pasienio sluoksnis ir tuo mažesni slėgio nuostoliai (žr. 1.15 pav. a)). Vis dėlto, šilumos perdavimas lašo formos kliūčių masyve yra prastesnis nei elipsės ar cilindro (žr. 1.15 pav. b)).

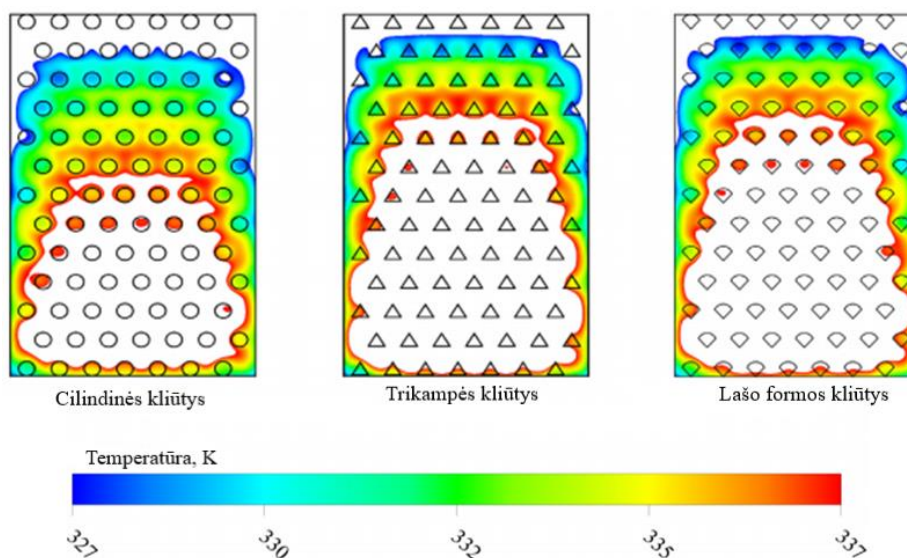


1.15 pav. a) Slėgio nuostolių; b) vidutinio Nuselto skaičiaus priklausomybės nuo Reinoldso skaičiaus. A, B, C – vis mažesnis lašo formos kliūčių hidraulinis skersmuo [28]

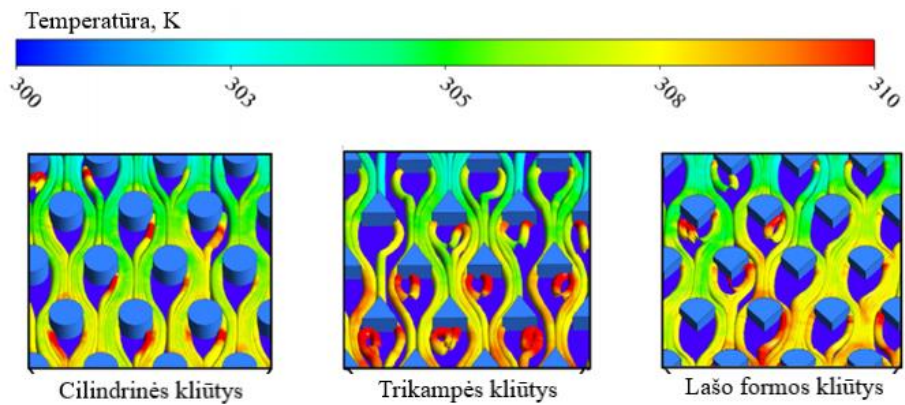
Qin ir kt. [29] tyrimuose taip pat buvo prieita prie išvados, jog, nepaisant geresnio elipsių formos kliūčių aptakumo ir mažesnių slėgio nuostolių, cilindro forma yra efektyvesnė. Jų nuomone, tai dėl geresnės šilumnešio konvekcijos už cilindro formos kliūčių susidarant didesniems sūkuriams. O už elipsių susidaro stovintys sūkuriai ir tose zonose šilumokaitos paviršiai dirba neefektyviai. Tokį elipsės formos kliūčių neefektyvumą patvirtina ir kitas tyrimas, atliktas Uzol'io ir kt. [30]. Jie palygino cilindro, elipsės ir išstętos elipsės formų kliūtis. Didžiausias perduodamos šilumos srautas gautas tekėjime pro cilindro formos kliūtis. Tačiau išstėtų elipsių slėgio nuostoliai šiek tiek mažesni, o perduodamos šilumos srautas didesnis nei neištėtų. Tai dar kartą patvirtina prielaidą, kad optimali forma dar neatrasta, t. y. galbūt efektyviausia būtų ne cilindro forma.

Kiti mokslininkai taip pat stengėsi išsiaiškinti, kokia forma cilindrinė ar lašo yra efektyvesnė. Abdoli'is ir kt. [31] tyrimas parodė 3,2 % šilumos perdavimo konvekcija padidėjimą naudojant sparno formos kliūtis palyginti su cilindro. Na, o dar šiek tiek optimizavus sparno formą buvo gautas net 6,4 °C maksimalios aušinamo paviršiaus temperatūros sumažėjimas. Reddy'is ir kt. [32] atliko aptakių formų kliūčių tyrimą. Buvo pastebėta, kad sparno ar elipsės formos kliūtys gali beveik visiškai neturėti recirkuliacinės srities, kuri visuomet yra cilindro formos atveju. Nepaisant recirkuliacinių sričių dydžio, visų tiriamų masių šiluminės ir hidrodinaminės savybės buvo patenkinamos.

Dar vienas palyginamasis cilindro, trikampio pleišto ir lašo, su pasroviui nukreipta smaile, formų masių mikrokanalų tyrimas parodė, kad lašo forma, nors ir aptaki, ne daug kuo geresnė už trikampes kliūtis [33]. 1.16 pav. pavaizduoti temperatūros laukai intervale, kur prie įtekėjimo / ištekėjimo ji mažesnė nei 327 K, o viduryje didesnė nei 337 K. 1.17 pav. parodo kodėl neaptakios galinės dalies lašo su pasroviui nukreipta smaile forma nėra efektyvi – už aptakaus priekinio paviršiaus pabaigos srautas atitrūksta nuo briaunų ir susidaro recirkuliacinės sritys. Jos mažesnės nei susidaranti už trikampio pleišto formos kliūčių, bet šiluminį efektyvumą vis tiek gerokai sumažina.



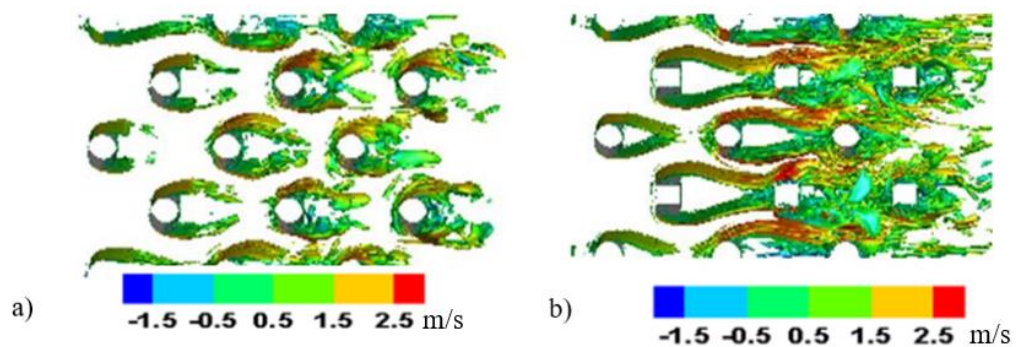
1.16 pav. Temperatūros izokontūrai [33]



1.17 pav. Tekėjimo struktūra a) cilindro; b) trikampio; c) lašo formos kliūčių masyve [33]

Siaurėjančias arba kūgio formos kliūtis tyrė Pati'is ir kt. [34], jų rezultatai rodo, kad kūgio formos kliūtys pagerina šilumines savybes ir sumažina slėgio nuostolius. Detaliau įvairiausių kintamų lašo su pasroviui nukreipta smaile formų įtaką nagrinėjo Cohen'as ir kt. [35]. Jie sukūrė modelius ir išanalizavo tekėjimą net per 21-os skirtingos lašo formos kliūčių masyvus. Didesnis užgriozdinimas pagreitina tekėjimą tarp kliūčių, sukelia didesnę turbulenciją už jų, o labiau išštos kliūtys sumažina tėkmės atsiskyrimą. Statmena tekėjimui kryptimi geriausia gauta netiesinio įgaubto kūgio forma. Tokios tiek išilgai, tiek skersai tėkmės kintančio skerspjūvio kliūtys sukelia mažesnius slėgio nuostolius, sumažina turbulenciją, bet sustiprina antrinius tekėjimus taip pagerinant šiluminį efektyvumą.

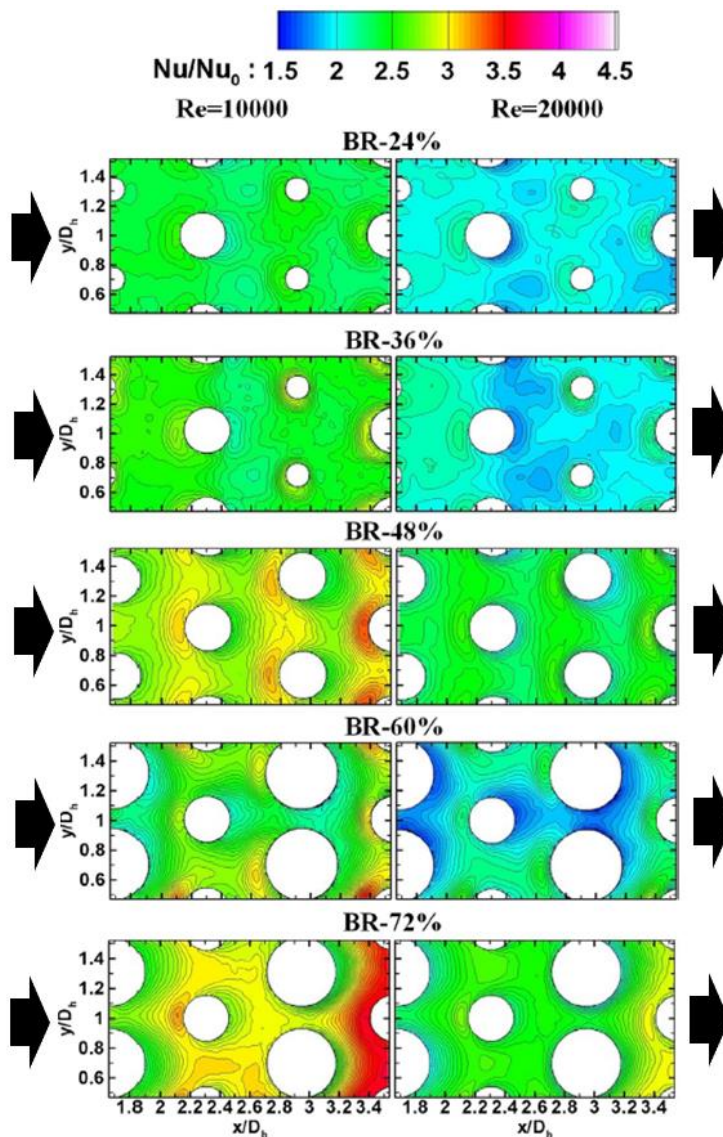
Bedrouni'is ir kt. [36] tyrė kanalą su skersai tekėjimo kryptimi mišriomis kliūtimis, kai viena kliūčių eilė cilindro, o kita kvadrato formos. Tekėjimo struktūros vizualizacija 1.18 pav. rodo, kad tarp mišrių kliūčių susidaro daugiau ir didesnės kinetinės energijos sūkuriai, kurie tėkmę padaro nestabilią. Slėgio perkritis nebuvo išmatuotas, bet tikėtina, kad mišriu atveju jis būtų gerokai didesnis, kuris galbūt lemtų tokių kliūčių masyvo neefektyvumą.



1.18 pav. Momentiniai sūkuringumo izo-paviršiai, skalėje parodomas greitis tekėjimo kryptimi pro a) cilindro formos; b) mišrias kliūtis [36]

Hung'as ir kt. [37] tyrė dujų turbino menčių aušinimą, pasitelkiant šachmatine tvarka išdėstytų cilindrinė kliūčių masyvą. Šį kartą cilindro skersmuo buvo skirtingas – 3, 6 ir 9 mm. Tiriama atvejai buvo suskirstyti pagal skirtingas užgriozdinimo (angl. *blockage ratio (BR)*) vertes, kurios apibrėžiamos kaip kliūčių ir kanalo skerspjūvio plotų santykis. Suprantama, kad tekėjimo tarp didesnio skersmens kliūčių greitis labiau padidėja ir tai pagerina vietinį šilumos perdavimą. Tačiau, nors cilindro skersmuo ir paveikė perduodamos šilumos srauto tankio pasiskirstymą, Nuselto kriterijaus laukas buvo simetriškas išilgai $y/D_h = 1$ ašies, o mažesnio skersmens kliūtys neužtikrina

tėkmės stacionarumo (žr. 1.19 pav.). Nepriklausomai nuo kliūčių dydžio, šalia tekėjimo stagnacijos taškų buvo pastebėtos padidėjusio šilumos perdavimo sritys. Alink 6 mm cilindrus matomi dideli Nu skaičiaus pokyčiai, rodantys tėkmės atsiskyrimą ir turbulentinės srities už kliūtis susidarymą. Darbe taip pat tirti stacionarių ir besisukančių kanalų šiluminių savybių skirtumai. Sukant kanalą, įcentrinė jėga paveikia netolygaus tankio tėkmės struktūrą ir didina perduodamos šilumos srauto tankio netolygumą. Bet kuriuo atveju, efektyviau šilumą perdavė masyvas su vienodo skersmens kliūtimis (1.19 pav., $BR = 48\%$).



1.19 pav. Nuselto skaičiaus santykis esant skirtingam Re ir užgriozdinimui [37]

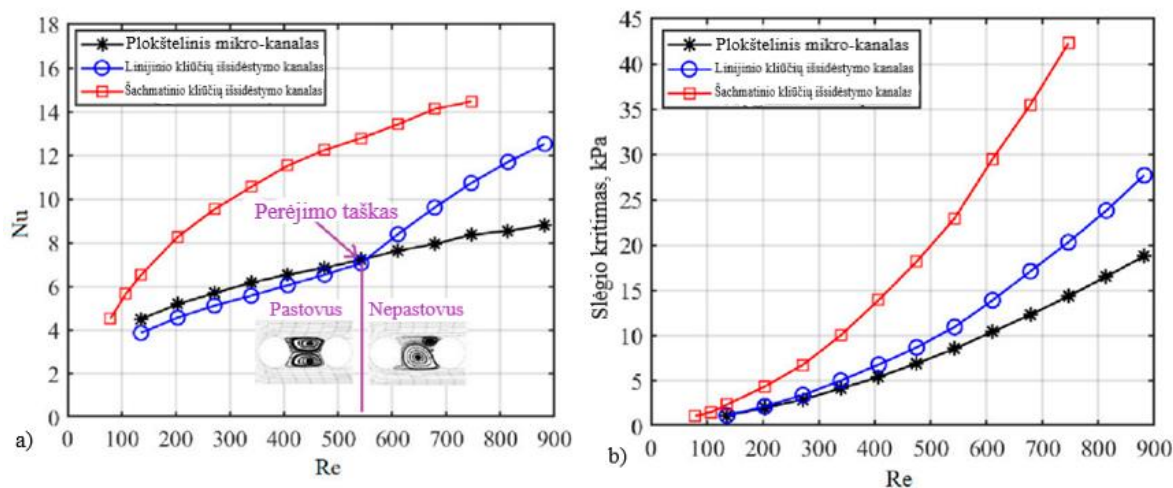
1.3.2. Kliūčių išdėstymas

Kliūčių išdėstymas lemia tiek šilumines, tiek hidrodinamines savybes. Paprastai palyginami du išdėstymo tipai – linijinis ir šachmatinis. Kiekvienas turi savo privalumų – linijiniame slėgio nuostoliai dažniausiai mažesni, bet šachmatiniame kliūčių aptekėjimas sklandesnis. Dar prieš du dešimtmečius Chyu’as ir kt. [38, 20] ištyrė išdėstymo įtaką šilumos perdavimui ir slėgio kritimui. Buvo pastebėta, kad šachmatinio išdėstymo kliūčių masyvu aušinama daug geriau nei atitinkamu linijiniu.

Iki pat dabar vis tikrinama, kuris išdėstymas yra efektyvesnis. Tiesa, skirtingas išdėstymas gali įvairiai paveikti skirtingų formų kliūčių masyvus. Tai įrodė Yang'as ir kt. [39] tirdami cilindro, elipsės ir stačiakampio formos kliūčių masyvus su linijiniu ir šachmatiniu išdėstymu. Jų tyrime linijiniame išdėstyme cilindrinė kliūčių skaičiaus padidėjimas turėjo įtakos šilumos perdavimui, o kvadratinė ne. Tai siejama su Coanda efektu, kai greitesnės tėkmės šuoras „prilimpa“ prie jam lygiagreto ar beveik lygiagreto paviršiaus. Sklandesnis cilindro paviršių aptekėjimas, keičiant kryptį, pakeičia sukurių struktūrą už kliūčių ir sukelia antrinį tekėjimą, t. y. geresnę konvekciją ir šilumos perdavimą. Esant šachmatiniam išdėstymui, šilumos perdavimo koeficientą didino bet kokių kliūčių skaičiaus padidėjimas.

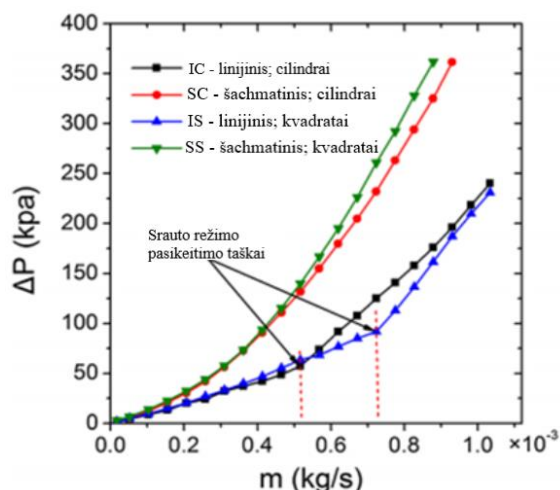
Qiu ir kt. [40] tyrė tekėjimo režimo pasikeitimą iš laminarinio į turbulentinį šachmatinio ir linijinio kliūčių išdėstymo masyvuose bei kokią tai daro įtaką šilumos perdavimui ir hidrauliam pasipriešinimui. Šachmatinio kliūčių išdėstymo Nuselto skaičius gerokai didesnis visame tyrime aprėptų Reinoldso reikšmių intervale. Vis dėlto, mažėjant Re nuo ~ 300 šis pranašumas vis labiau nyksta (žr. 1.20 pav. a). Taip atsitinka, nes esant mažam Re , kliūtys labiau stabdo tekėjimą dėl storo pasienio sluoksnio. Didėjant Re pasienio sluoksnis plonėja, sienų poveikis mažėja, o tai gana staigiai padidina šilumos perdavimo našumą. Linijinio kliūčių išdėstymo atveju tol, kol neįvyksta perėjimas į turbulentinį režimą, už kliūties būna susiformavusi stacionari didelių sukurių pora. Mažas sukimosi greitis bei lėti masės mainai su pagrindine tekme paverčia juos stagnacijos sritimis. Būtent todėl, turbulentiame režime kanalo su šachmatiniu kliūčių išdėstymu šilumos perdavimas yra prastesnis net už kanalą be kliūčių.

Slėgio priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus (žr. 1.20 pav. b)) rodo, kad šachmatinis išdėstymas sukelia gerokai didesnius slėgio nuostolius nei linijinis. Priverstinis tėkmės vingiavimas ne tik padidina hidraulinį pasipriešinimą trinčiai, bet ir suplonina pasienio sluoksnį bei paankstina jo atsiskyrimą.



1.20 pav. a) Nuselto skaičiaus ir b) slėgio kritimo priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus [40]

Xu ir kt. [41] (žr. 1.21 pav.) atlikę kiek platesnį tyrimą gavo panašius kliūčių išdėstymo įtakos rezultatus. Čia taip pat nėra aiškiai matomo tekėjimo režimo perėjimo šachmatinio išdėstymo atveju, bet slėgio perkryčio kreivė aiškiai parodo perėjimą iš laminarinio į turbulentinį režimą linijinio kliūčių išdėstymo atveju. Pasikeitęs kreivių polinkis parodo tekėjimo režimo pasikeitimą, tačiau sklandus Nuselto ar slėgio perkryčio kitimas nebūtinai rodo, kad režimas nepakitė.

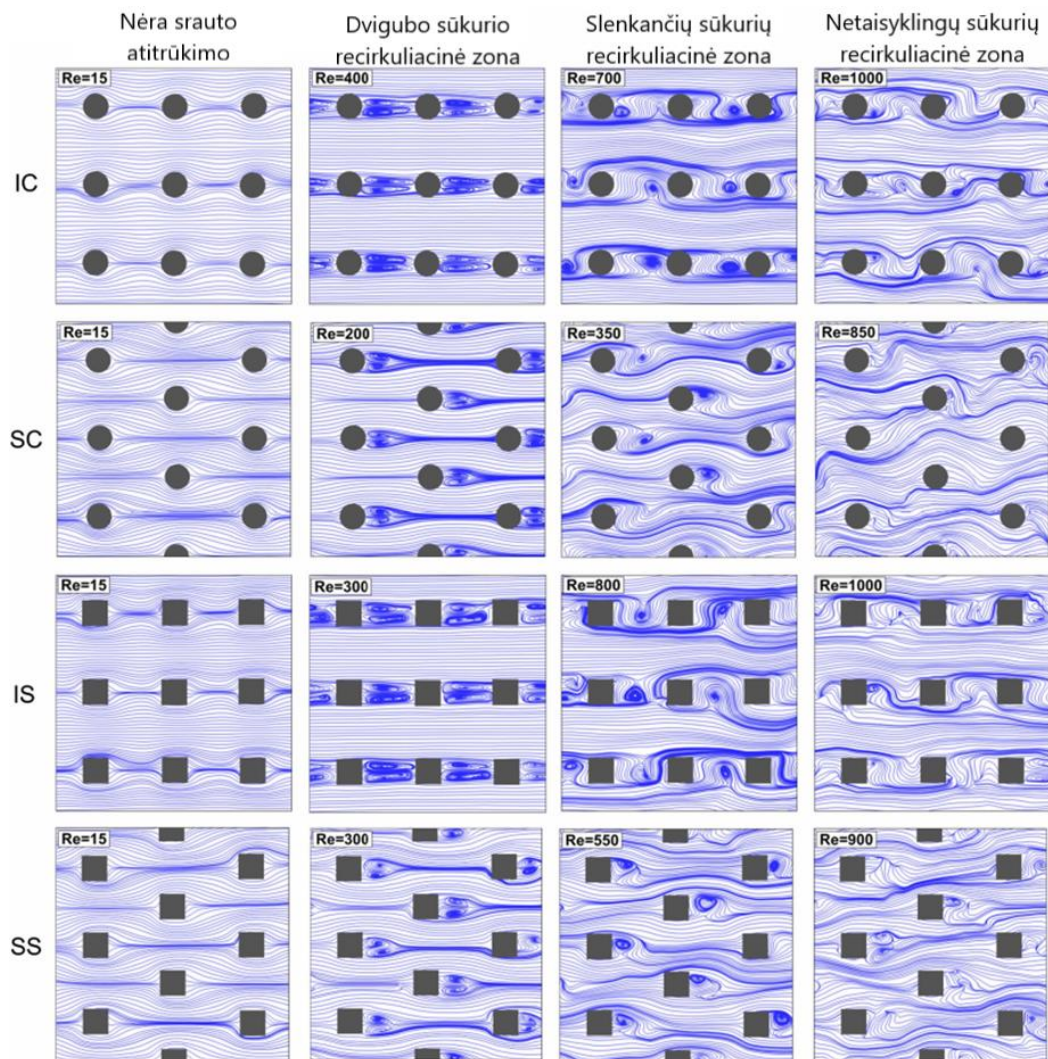


1.21 pav. Slėgio kritimo kanale priklausomybė nuo masinio debito [41]

Šiame mikrokanalų tyrime dar buvo išnagrinėta tekėjimo už kliūčių struktūra (žr. 1.22 pav.). Ji suskirstyta į keturis tipus: be atitrūkimo, dvigubo sūkurių, slenkančių sūkurių ir netaisyklingų sūkurių:

- esant mažam Reinoldso skaičiui tėkmė apteka kliūtis neatitrūkdama;
- didėjant Re susidaro pastovi recirkuliacinė sritis su pora simetriškų sūkurių;
- toliau didėjant Re dvigubi sūkurių tampa nestabilūs, dėl padidėjusio jų sukimosi greičio ir trikdžių pasiekiančių juos nuo sienų ir gretimų kliūčių. Vienas iš buvusių simetrinių sūkurių pasidaro didesnis, o kitas, tapęs mažesniu, tada lengviau atitrūksta. Taip vis atitrūkstant naujai susidaranti mažesniajam sūkuriui, didesnis mėtosi už kliūtis į priešingą jos puses.
- pasiekus kritinį Re susidarantys sūkurių tampa netaisyklingi, o jų atsiskyrimas nuo kliūčių ir slinkimas kanalu tampa nesinchroniškais.

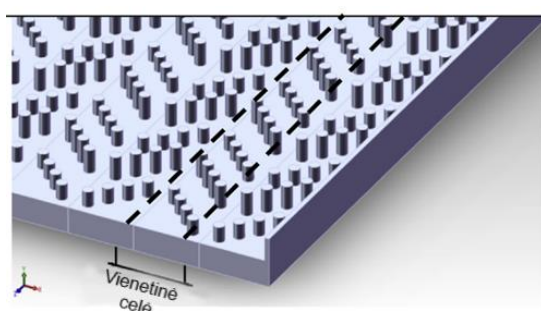
Šių tyrimų rezultatai parodė, kad mikrokanaluose su linijiniu kliūčių išdėstymu slėgio perkryčio kitimas (1.21 pav.) aiškiai parodo tekėjimo režimo pasikeitimą (1.22 pav.). Tačiau esant šachmatiniam kliūčių išdėstymui, tėkmės struktūros pasikeitimas pastebimai nepakeičia slėgio perkryčio kanale kitimo.



1.22 pav. Tipinės tekėjimo už kliūčių struktūros esant skirtingos formos kliūtims ir jų išdėstymui [41]

Kitas gan platus tyrimas atliktas Kosar'o ir kt. [42] parodė, kad makro- ir minikanaluose gautos kriterinės lygtys labai prastai koreliuoja su slėgio perkryčiu mikrokanaluose – vidutinė absoliuti paklaida didesnė nei 30 %. Šie neatitikimai siejami su mikroskale nes, kai kanalo aukštis yra labai mažas, didele jo dalimi vyksta laminarinis tekėjimas. Remiantis savo atliktų eksperimentų rezultatais, jie pasiūlė kriterinę lygtį, su priklausomybe nuo mikrokanalo aukščio ir kliūčių išdėstymo. Kaip ir ankstesniuose tyrimuose, šachmatinio kliūčių išdėstymo hidrauliniai nuostoliai buvo didesni, palyginti su linijinio bei šis skirtumas mažėjo didėjant Reinoldso skaičiui. Tai pat jų rezultatai rodo, kad mažesnis aukščio ir kliūčių skersmens santykis (H/D) sukelia didesnius trinties nuostolius.

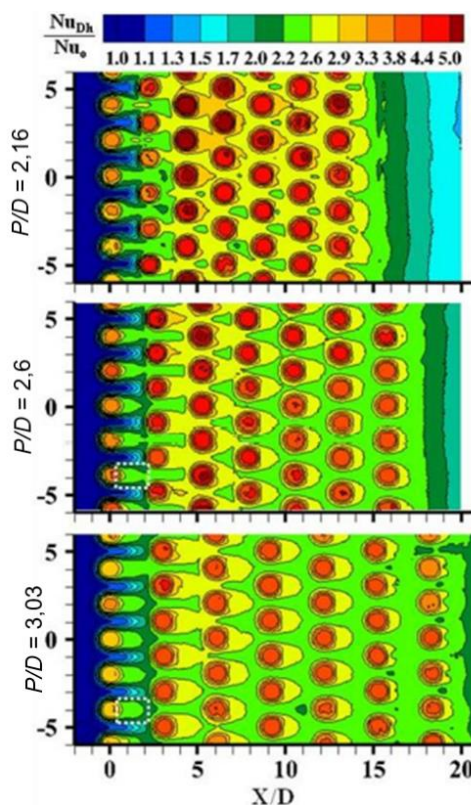
Shafeie ir kt. [43] nagrinėjo ne tik labiausiai paplitusius – linijinį ir šachmatinį išdėstymą, bet ir įstrižą, kurio dalis pavaizduota 1.23 pav. Iš visų nagrinėtų atvejų, nedidelio aukščio kanalas su įstrižai orientuotomis kliūtėmis aušino geriausiai. Tačiau kliūčių išdėstymo įtaka buvo daug mažesnė nei kanalo ir kliūčių aukštis.



1.23 pav. Įstrižai išdėstyto kliūčių masyvo dalis [43]

Atstumo tarp gretimų kliūčių įtaka tekėjimui taip pat buvo tiriama. Choudhary'is ir kt. [44] išsiaiškino, kad mažėjant atstumo tarp kliūčių ir jų pačių skersmens santykiui proporcingai didėja tiek Nuselto skaičius, tiek hidrauliniai nuostoliai. Guan'as ir kt. [45] ištyrė, jog sumažinus kanalo pločio santykį su kliūčių skersmeniu, pasienio sluoksnio atsiskyrimas įvyksta vėliau ir recirkuliacinė sritis sumažėja. O šį santykį padidinus, atsiskyrimo kampas ir recirkuliacinė sritis padidėja. Lyall'is ir kt. [46] bei Rasouli'is ir kt. [47] teigia, jog padidinus kliūčių tarpusavio atstumą, slėgio nuostoliai gerokai sumažėja todėl, kad kliūtis aptekėjimas tampa nepriklausomu, t. y. nebėra veikiamas šalia esančių kliūčių.

Ostanek'as ir kt. [48] nagrinėjo atstumo tarp kliūčių įtaką. Skirtingus variantus apibūdino P/D santykiu, kur P – atstumas tarp eilių, o D – kliūčių skersmuo (žr. 1.24 pav.). Esant tankiausiai išdėliotoms kliūčių eilėms, t. y. mažiausiam P/D santykiui, sukūriai nebegeneruojami ir greičio fliktuacijos gerokai sumažėja. Dėl sumažėjusio maišymosi, mažesnio P/D kanalų šilumos perdavimo koeficientas kanalo pradžioje yra mažesnis, bet pabaigoje didėja ir pralenkia turinčius didelį P/D .



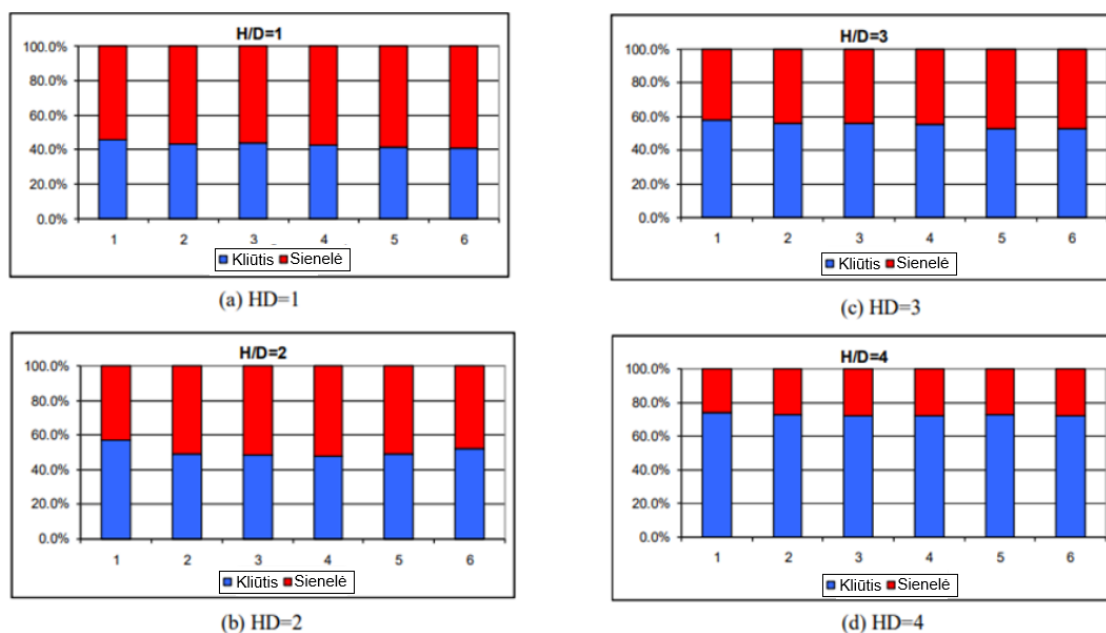
1.24 pav. P/D santykio ($P/D = 2,16; 2,6$ ir $3,03$) įtaka šilumos perdavimo koeficientui [48]

Kaip matyti 1.24 pav., pirmųjų kliūčių eilių tarpusavio atstumas neturi reikšmingos įtakos, o tolesnių sutankinimas naudingas. Taigi, Ostanek'as ir kt. [49] ištyrė ir netolygiai išdėstytų kliūčių eilių įtaką, kanalo pradžioje retesnes kliūčių eiles tolygiai sutankindami tėkmės kryptimi. Tikėtasi, kad toks išdėstymas bus optimalus šilumos perdavimui. Rezultatai parodė, kad taip ir yra, bet tik esant dideliame Reinoldso skaičiui, o kai jis mažas, masyvų su trumpėjančiu kliūčių eilių žingsniu našumas buvo mažesnis, nei masyvų su vienodu eilių žingsniu.

Atlikta ir daugiau, ne tik vienokių ar kitokių konkrečių kliūčių masyvų tyrimų, bet ir bendresnių, kur gauti duomenys yra susisteminti apibendrinti kriterinėmis lygtimis. Tamayol'as ir kt. [50] modeliavo įvairių matmenų cilindrinę kliūčių mikrokanalus ir eksperimentiškai patvirtino rezultatus apibendrinančią kriterinę lygtį. Taip pat aptiko dėsningumą, kad slėgio kritimą ir tūrinį debitą, esant vidutiniam Reinoldso skaičiui, sieja parabolinis ryšys. Tokiame tekėjime yra reikšmingi tiek Darcy, tiek inercinės jėgos nariai. Ta pati mokslinė grupė ištyrė slėgio nuostolių priklausomybę nuo cilindrinę kliūčių skersmens, tarpų, kanalo aukščio ir pločio esant mažam Reinoldso skaičiui [51]. Jų pasiūlyti priklausomybės numatymo metodai atitinka atliktų eksperimentinių rezultatų duomenis. Šių abiejų tyrimų rezultatai gali pasitarnauti projektuojant termohidrauliškai efektyvius mikrokanalus, t. y. taip, kad jų šiluminės savybės būtų kuo geresnės, o slėgio nuostoliai kuo mažesni.

1.3.3. Kanalo aukščio santykis su kliūčių skersmeniu

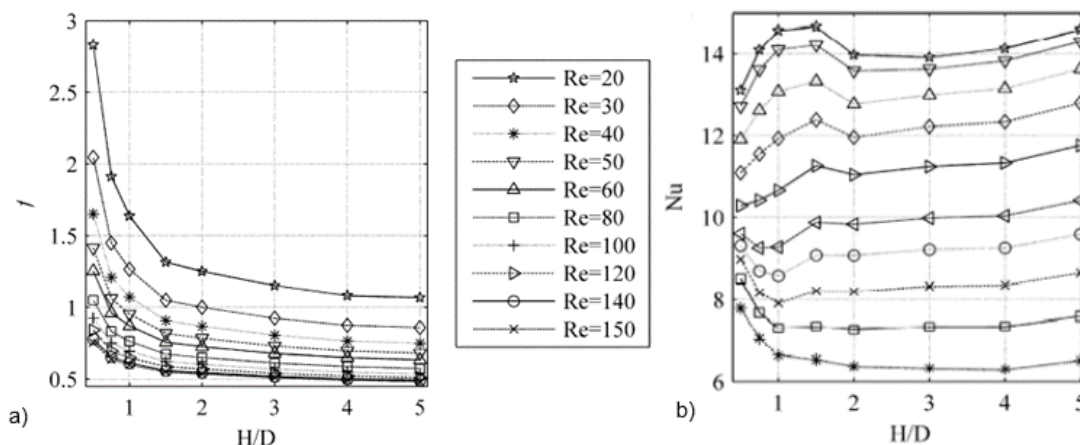
Kuo mažesnis santykis tarp kliūčių skersmens ir kanalo aukščio, tuo didesnė ribojančių sienelių įtaka tiek šiluminėms, tiek hidraulinėms savybėms. Ištyrus keturi atvejus, kai $H/D = 1, 2, 3$ ir 4 gauta, jog didėjant H/D santykiui šiluminio našumo indeksas, o ribojančių sienelių įtaka mažėja (žr. 1.25 pav.). Esant mažesniai H/D santykiui, didesnė Reinoldso skaičiaus įtaka šiluminėms savybėms [19]. Panašų eksperimentą atliko Ostanek'as ir kt. [48], bet tyrė tik du atvejus, kai $H/D = 1$ arba 2 . Abiem atvejais susidarė panašaus dydžio pasagos formos (angl. *horseshoe*) sūkuriai, nors buvo tikimasi gauti gerokai besiskiriančius jų dydžius. Atitinkamai, sūkuriai užima didesnę procentą kanalo erdvės ir Nuselto skaičius šiek tiek didesnis, kai $H/D = 1$.



1.25 pav. Sienelių ir kliūčių perduodamos šilumos procentinis santykis [19]

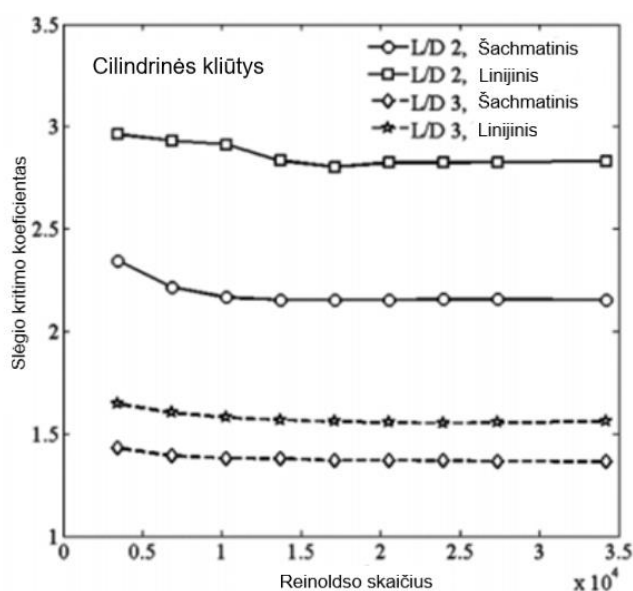
Tą pačią hipotezę – esant didesniai kanalo aukščiui, jo šiluminės ir hidraulinės savybės nusistovi, patvirtino tyrimas, kurio rezultatai parodė, jog, kai $H/D > 8$, ribojančių sienelių įtaką yra nereikšminga [42].

Koz'as ir kt. [52] tyrė skirtingo aukščio / skersmens santykio cilindrių aptekėjimą. Trinties koeficiento ir Nuselto skaičiaus priklausomybės nuo H/D santykio ir Re skaičiaus pateiktos 1.26 pav. Matyti, kad esant didesniai H/D santykiui tekėjimas mikrokanale tampa mažiau stabilus, nes sienų įtaka nebėra tokia didelė. Autoriai pastebėjo dėsningumą, kad šilumos perdavimo koeficientas tiesiogiai, o sienų įtaka atvirkščiai proporcinga H/D ir Re .



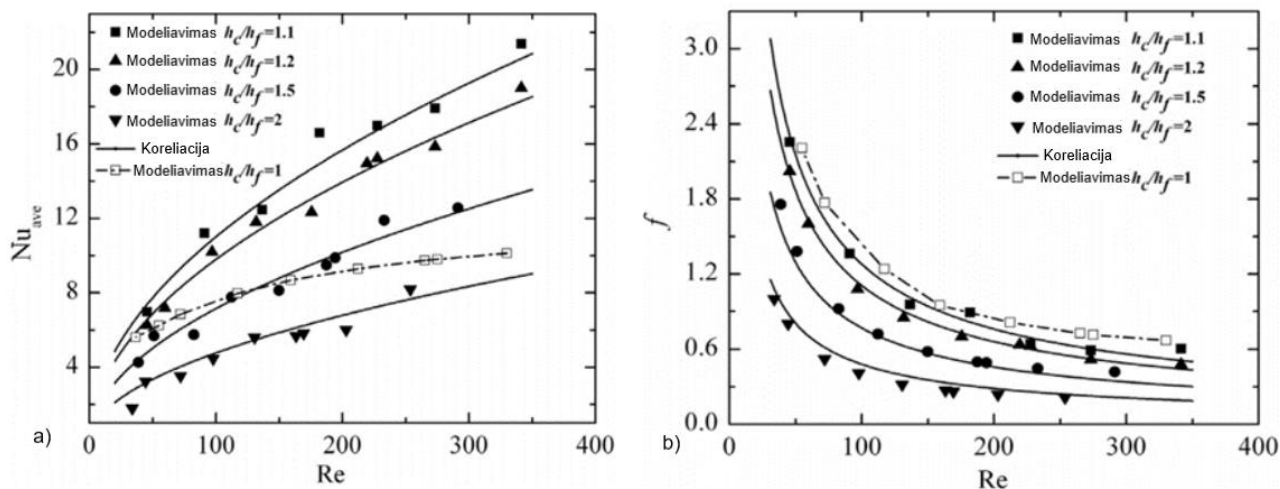
1.26 pav. Trinties koeficiento ir Nuselto skaičiaus priklausomybė nuo kliūtis H/D santykio esant skirtingam Reinoldso skaičiui [52]

Esant didesniai H/D , šachmatinės ir linijinės kliūčių išdėstymo schemų hidraulinis efektyvumas gali pasikeisti vietomis. Pavyzdžiui, tiriant kanalus su $H/D = 10$, buvo gauta, kad šachmatine tvarka išdėstytų kliūčių hidraulinis pasipriešinimas yra mažesnis [53] (žr. 1.27 pav.).



1.27 pav. Slėgio kritimo koeficiento (parametrinis slėgio nuostolio įvertinimas, atsižvelgiant į kinetinę energiją) kanale priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus kai $H/D = 10$ [53]

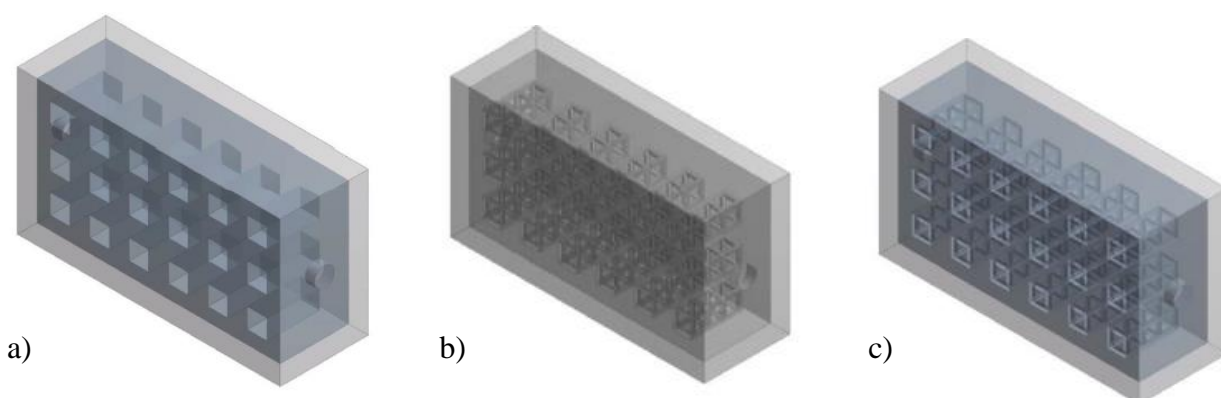
Taip pat buvo ištirta žemesnių nei kanalo aukštis kliūčių įtaka [54]. Išsiaiškinta, kad kuo platesni tarpai tarp kliūčių ir sienelės, tuo prastesnis šilumos perdavimas, bet tuo pačiu ir gerokai mažesni slėgio nuostoliai (žr. 1.28 pav.).



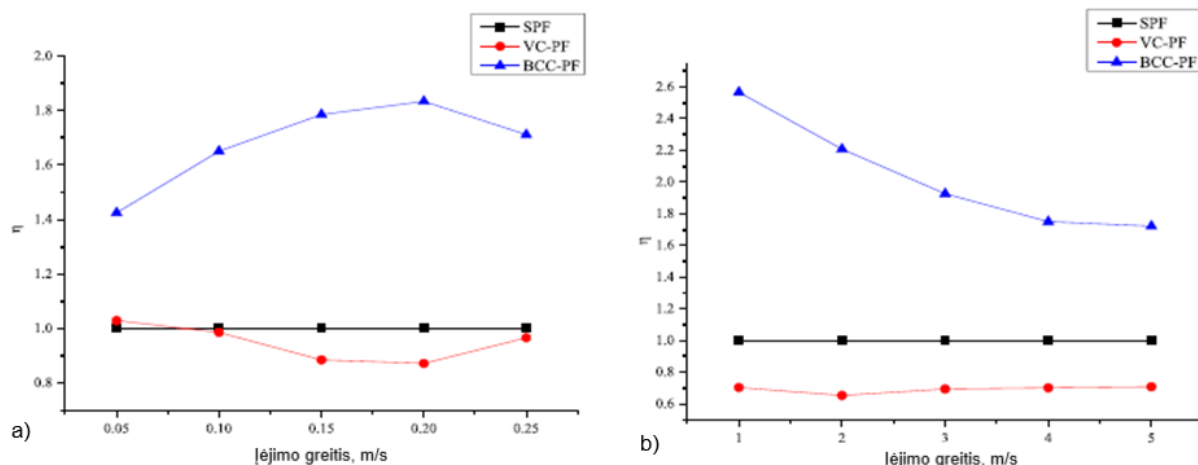
1.28 pav. a) Nuselto skaičiaus priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus; b) trinties koeficiento priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus [54]

1.3.4. Įdomesni atvejai

Wang'as ir kt. [55] skaitiškai tyrė *BCC* ir *VC* gardelės struktūrą turinčių mikrokanalų šiluminės ir hidraulinės ypatybės bei palygino su mikrokanalais, turinčiais kvadratinės kliūtis (žr. 1.29 pav.). Kristalinės gardelės struktūra mažiau užgriozdina pratekėjimo skerspjūvį, todėl slėgio nuostoliai mažesni. *VC* struktūros pasipriešinimas turbulentiniam tekėjimui buvo iki 11,4 % mažesnis, palyginti su kitais. Tačiau *BCC* efektyviau perdavė šilumą – termohidraulinio efektyvumo indeksas buvo gerokai aukštesnis, ypač pereinamajame tekėjimo režime (žr. 1.30 pav.).



1.29 pav. Mikrokanalai su skirtinga vidine struktūra a) kvadratinių kliūčių; b) *BCC*; c) *VC* [55]



1.30 pav. Termohidraulinio indekso priklausomybė nuo įtekėjimo greičio a) laminarininiu; b) turbulentinu atveju [55]

FCC gardelės tipo struktūros panaudojimą mikrokanaluose skaitiškai tyrė Liang’as ir kt. [56] ir gavo vidutiniškai net 3 kartus didesnę šilumos perdavimo srautą. Be to, darbe palygintos trys skirtingos elementų, iš kurių sudaryta struktūra, formos – apskritimo, kvadrato ir elipsės. *FCC* mikrokanaluose su elipsės ar kvadrato formos kliūtimis šilumos perdavimas 26–31 % geresnis, nei su apskritimo, dėl didesnio suminio kontakto paviršių ploto, bet tuo pačiu didesni ir slėgio nuostoliai. Todėl *FCC* tipo struktūros, iš apskritimo formos elementų, buvo termohidrauliškai efektyviausios.

Yu [57] ir Woodcock’as [58] su savo mokslinėmis grupėmis skaitiškai ir eksperimentiškai tyrė mikrokanalus su piranijos formos kliūtimis (žr. 1.31 pav.). Tokia tuščiavidurės formos kliūčių konstrukcija gerokai padidina šilumos perdavimą dėl padidinto paviršiaus ploto [57]. Vis tik, tokia kanale slėgio nuostoliai yra didesni, palyginti su tokios pat formos pilnavidurėmis kliūtimis.

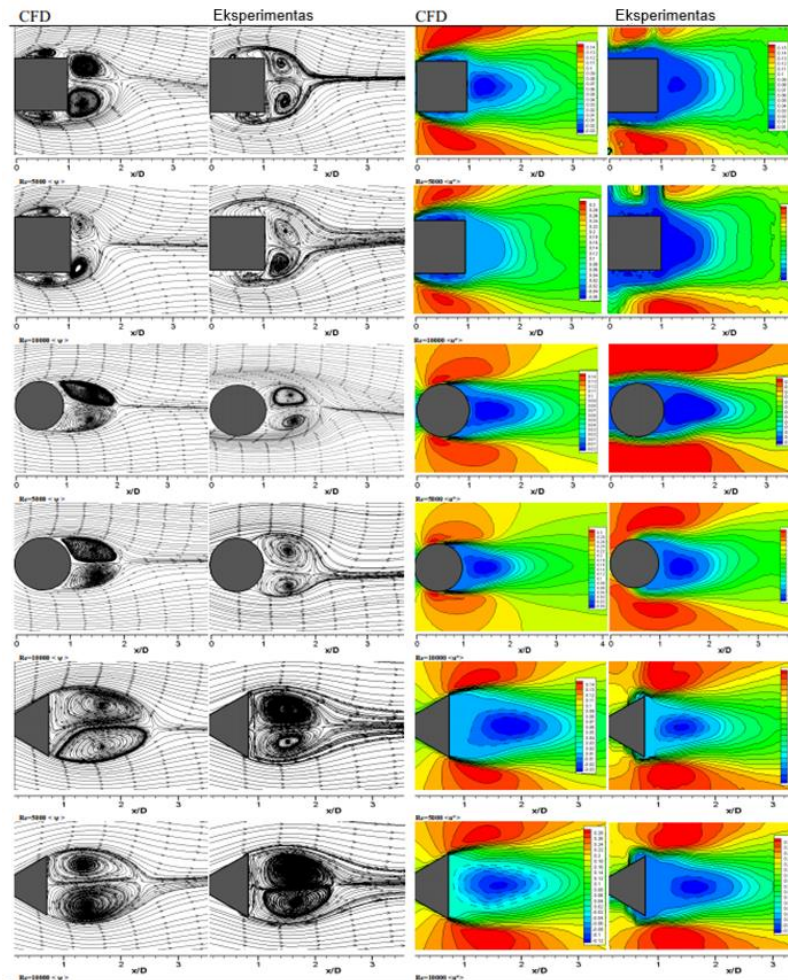


1.31 pav. Piranijos formos kliūčių masivas [57]

1.4. Tekėjimo struktūra

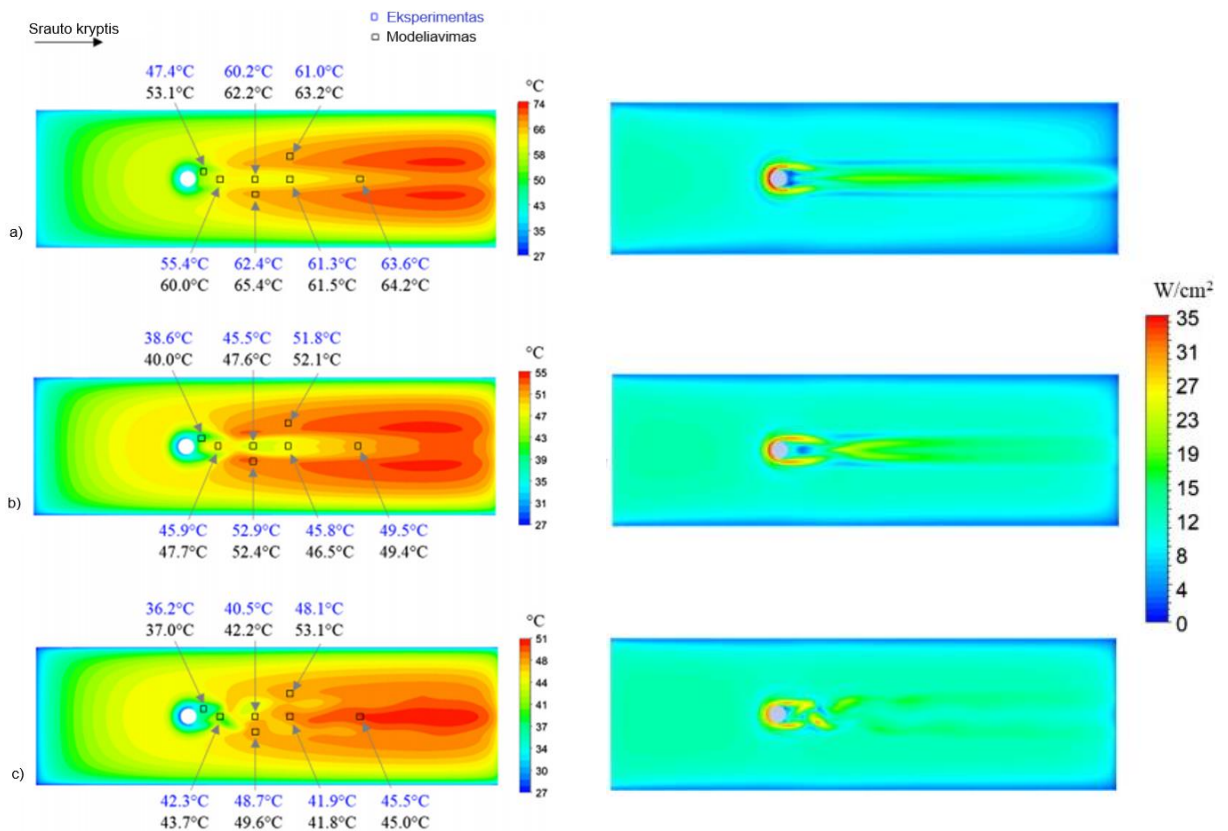
Kadangi šiame darbe yra nagrinėjamas tekėjimas mikrokanale su cilindro ar elipsės formos kliūtimis, bus aptarta tekėjimo struktūra už kliūtis ar kliūčių. Tekėjimo struktūros susidaro dėl klampios tėkmės sąveikos su besiribojančiais paviršiais. Yagmur’as ir kt. [59] tyrė aptekėjimą aplink cilindro, kvadrato ir trikampio formos kliūtis. Tėkmės struktūra, priklausomai nuo Re , matoma 1.32 pav. Nepriklausomai nuo kliūtis formos, nuo jos atsiskyres regionas yra trumpesnis esant didesniam Reinoldso skaičiui. Už kvadrato formos kliūtis susidarė du simetriški sūkuriai, taip pat už priekinių kampų, atitrūkus pasienio sluoksniui, prie tekėjimui lygiagrečių šoninių plokštumų susiformuoja mažesni sūkuriai. Už cilindro formos kliūtis aptinkami du simetriniai sūkuriai. Už trikampio pleišto

galinės plokštumos susidariusi recirkuliacinė sritis buvo pati ilgiausia iš visų tirtų atvejų. Didžiausią pasipriešinimo koeficientą turėjo kvadrato, o mažiausią cilindro formos kliūtys. Įdomu tai, kad padidinus Re nuo 5000 iki 10000 kvadrato pasipriešinimas padidėjo 0,6 %, cilindro sumažėjo 6,5 %, o trikampio sumažėjo net 16 %.



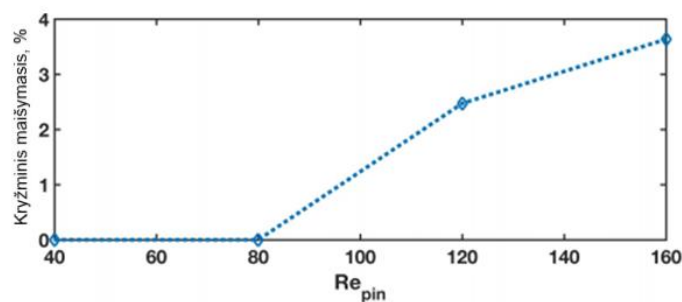
1.32 pav. Tekėjimo struktūros ir greičių laukai, kai $Re = 5000$ ir 10000 [59]

Wang'as ir kt. [60] eksperimentiškai ir skaitiškai ištyrė tris būdingus cilindro aptekėjimo atvejus: laminarinį su stacionaria recirkuliacijos sritimi ($Re = 283$), laminarinį su nestacionarios recirkuliacijos sritimi ($Re = 640$) ir turbulentinį ($Re = 854$). Mikrokanalo viduje ant kaitinančios sienelės paviršiaus buvo sumontuoti $55 \mu\text{m}$ dydžio temperatūros davikliai. Jais išmatuota, kad už cilindro susidariusių simetrinių sūkurių kraštuose vietinė temperatūra išilgai centrinės linijos visuomet buvo žemesnė, tai rodo aukštesnį vietinį šilumos perdavimo koeficientą (žr. 1.33 pav.). Stagnacijos zonų, kuriose sienelė prastai aušinama, turbulentiame tekėjime nebelieka, t. y. stovintys stacionarūs sūkurių sukuria stagnacijos zonas, o chaotiški intensyviai maišo tėkmę. Taip pat pastebėta, kad didėjant Reinoldso skaičiui recirkuliacijos sritys, t. y. sūkurių apimtos srities plotis, didėja. Didėjantys sūkurių prastina šilumos perdavimą, kol tekėjimas yra laminarinis, ir gerina, kai prasideda turbulencija.



1.33 pav. Temperatūros laukai ir perduodamos šilumos srauto tankis esant skirtingam tekėjimo režimui: a) laminarinis su stacionaria recirkuliacine sritimi; b) laminarinis su nestacionaria recirkuliacine sritimi; c) turbulentinis [60]

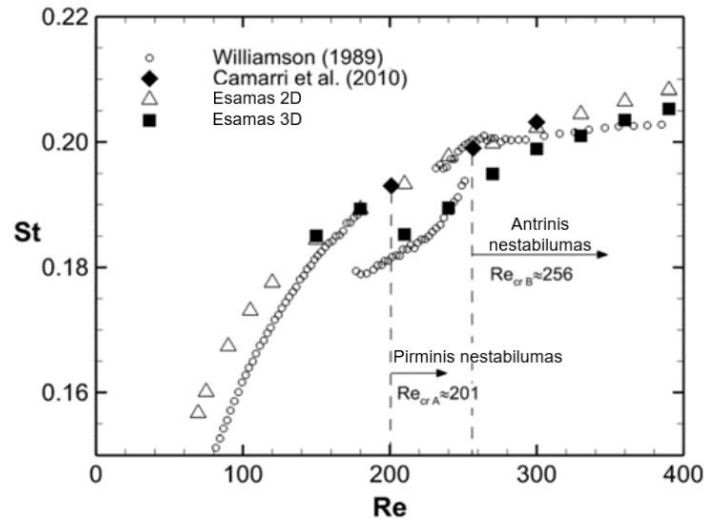
Zhang'as ir kt. [61] taip pat tyrė cilindro aptekėjimą siekdami suprasti sūkurių susidarymą ir judėjimą norint pagerinti šilumos ir masės pernašą. Buvo pastebėta, kad recirkuliacijos sritis plėtėja, didėjant Re , o kartu ir ilgėja. Kai sūkurių tampa nebestabilūs, atsiranda antriniai tekėjimai. Pernašos suintensyvėjimą rodo recirkuliacijos srities kryžminis maišymasis, kuris stiprėja didėjant Re (žr. 1.34 pav.).



1.34 pav. Recirkuliacijos srities kryžminio maišymosi priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus [61]

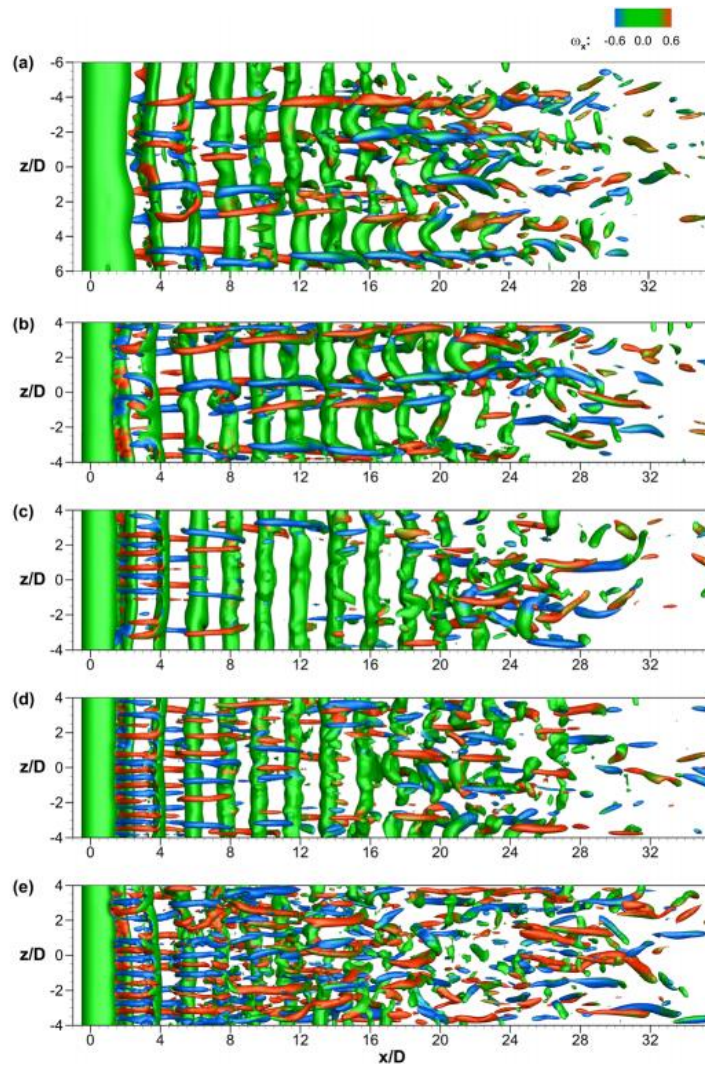
Kanaris ir kt. [62] atliko trimatį skaitinį eksperimentą pasitelkiant tiesioginį skaitmeninį modeliavimą (angl. *Direct Numerical Simulation (DNS)*). Jie modeliavo cilindro aptekėjimą uždaramame kanale. Didinant Re skaičių, recirkuliacijos srities struktūra keičiasi, o kartu ir sūkurių judėjimo dažnis bei slėgio laukas. Šiuos tekėjimo pokyčius parodo Strouhalio skaičius, kurio priklausomybė nuo Re pateikta 1.35 pav. Vertikalios brūkšninės linijos nurodo kritinius Re skaičius, kurie žymi recirkuliacijos srities skirtingo nestabilumo pradžią. Grafike matyti, kad tekėjimas išlieka dvimatis kol Re pasiekia 180, nes 2D ir 3D modeliavimo rezultatai sutampa. Vėliau, kai $Re = 210$, prasideda

trimatis tekėjimas – St skaičius nukrenta, tai tęsiasi iki $Re = 240$, toliau skirtumų beveik nelieka. Šie du trūkiai yra siejami su skirtingais nestabilumais recirkuliacijos srityje, t. y. A ir B režimais. Pirmasis pasirodo, kai $Re = 210$, antrasis – $Re = 270$. A režimo atveju pasroviui vyksta organizuotas „simetriškas“ mažo ir didelio greičio laukų maišymasis, kuris galiausiai priverčia pirmines sūkurines šerdis nuosekliai ir sistemingai suirti. B režimo atveju atsiranda netaisyklingi mažo ir didelio greičio šuorai, dėl kurių sūkurinės šerdis suskaidomos netaisyklingai.



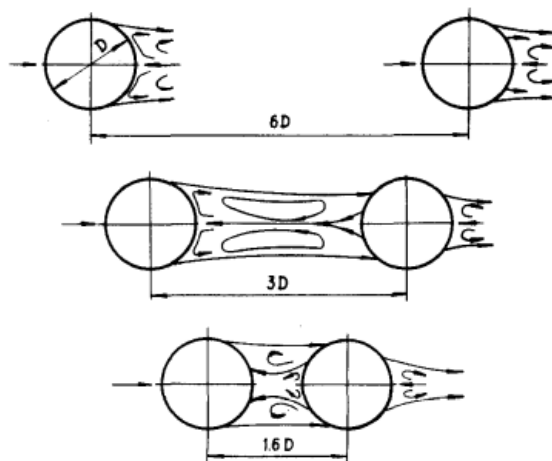
1.35 pav. Strouhalio skaičiaus priklausomybė nuo Reinoldso skaičiaus [62]

Nestabilumai ir trimatės struktūros recirkuliacijos srityje atvaizduojamos 1.36 pav. Sūkurių identifikacijai trimačiam greičio lauke pasitelktas Λ_2 kriterijus – sūkurinės šerdis linijos aptikimo algoritmas. Gerokai po pirmojo nestabilumo pradžios, ties $Re = 240$, pasirodo išilginis pirminių sūkurių šerdzių bangavimas, kartu su pasroviui susidarančiomis priešingos krypties sūkurių poromis. Ši periodinė, nesutampančių fazių, trimatė tekėjimo struktūra yra panaši į A režimo tekėjimo modelį. Kai $Re = 300$ ir didesnis, tėkmėje matomos smulkesnės skalės sūkurių poros, kurių bangos ilgis taip pat mažesnis. Sūkurių poros gretimuose jų pynės sluoksniuose įgyja vienodą orientaciją, taip pasroviui suformuodamos suderintos fazės sūkurių rašto struktūrą. Šis nestabilumas, priešingai nei A režimas, būdingas tik artimiausiam sūkuriui ir toliau pasroviui nepasirodo. Didėjant Re , pasroviui sūkurių skaičius padidėja, dėl ko tekėjimas vis labiau iškraipomas. Toks tekėjimo nestabilumas atitinka B režimą. 1.36 pav. b) ir c) yra ties antro nestabilumo pasireiškimo riba, todėl turi tiek A, tiek B nestabilumo bruožų. Toks hidrodinaminis sūkurių susidarymo ir vystymo perpratimas padeda tinkamai numatyti vietinius reiškinius, tokius kaip šilumos perdavimas ir korozija.



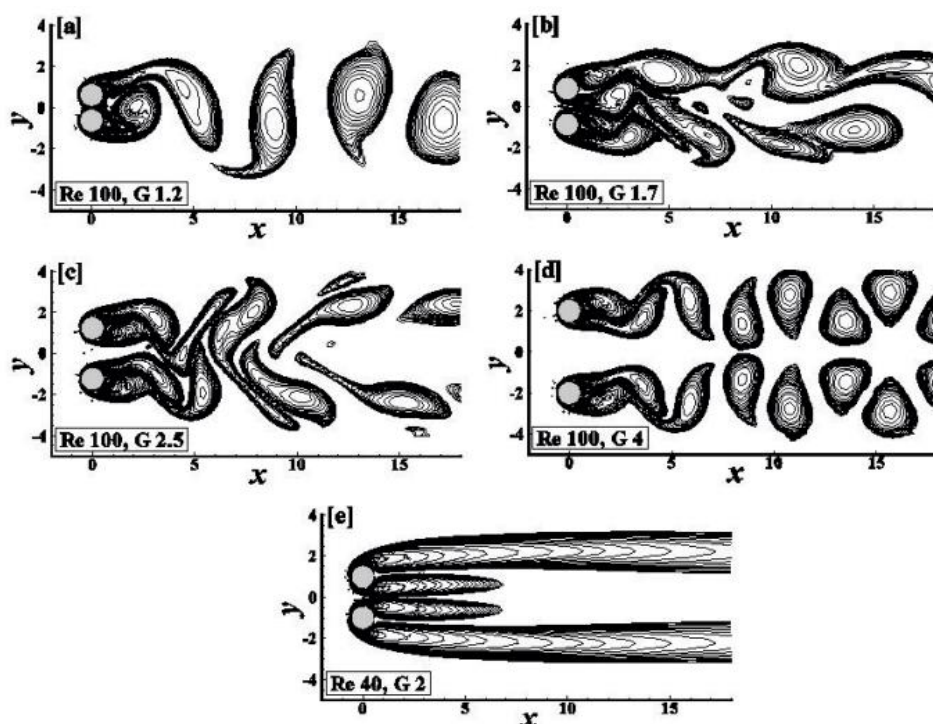
1.36 pav. Normalizuoti Λ_2 kriterijaus izopaviršiai, kai: a) $Re = 240$; b) $Re = 270$; c) $Re = 270$ (tolesnis laiko momentas nei b)); d) $Re = 300$; e) $Re = 390$, spalvų skalė rodo sūkurių kryptį [62]

Žukauskas [15] tyrė sūkurių formos priklausomybę nuo atstumo tarp pasroviui išdėstytų cilindro formos kliūčių. Atstumui tarp cilindų centrų esant didesniai už 6 skersmenis, sūkuriai yra tarsi atskiri ir vienas kitam įtakos nedarantys, tarp arčiau esančių susidaro dvigubi sūkuriai, o kai atstumas mažesnis už 2 skersmenis jie nebesusidaro (žr. 1.37 pav.).



1.37 pav. Srauto pokyčiai linijiniame kliūčių išdėstyme [15]

Atstumo tarp greta išdėstytų cilindro formos kliūčių įtakos tyrimą atliko Panda ir kt. [63]. Sūkuringumo (angl. *vorticity*) kontūrai esant skirtingam Re ir atstumui tarp kliūčių $G = g/D$ (čia g – atstumas tarp kliūčių centrų; D – kliūčių skersmuo) pavaizduoti 1.38 pav. Matoma, kad tekėjimo struktūra labai priklauso nuo atstumo tarp gretimų kliūčių. Labai siauru tarpeliu pratekantis srautas yra nereikšmingas ir gretimų kliūčių recirkuliacijos sritys susilieja į vieną. Siauru $G = 1,7$ tarpu tekėjimą tarp cilindrų veikia jų paviršiai ir susidaro labai netaisyklingi sūkuriai. Padidinus atstumą tarp gretimų cilindrų iki $G = 2,5$, sugeneruoti sūkuriai iš pradžių susilieja, o vėliau, tekėdami pasroviui, atsiskiria, net ir esant laminariniam režimui, cilindrinės kliūtys vis dar veikia viena kitos recirkuliacines sritys. Kai $G = 4$, susidariusios recirkuliacinės sritys yra periodinės ir susidaro atskirai viena nuo kitos, nesąveikauja. Kai $G = 2$, tekėjimas yra pastovus ir simetriškas vidurio plokštumai, Karmano takelis nesusidaro.



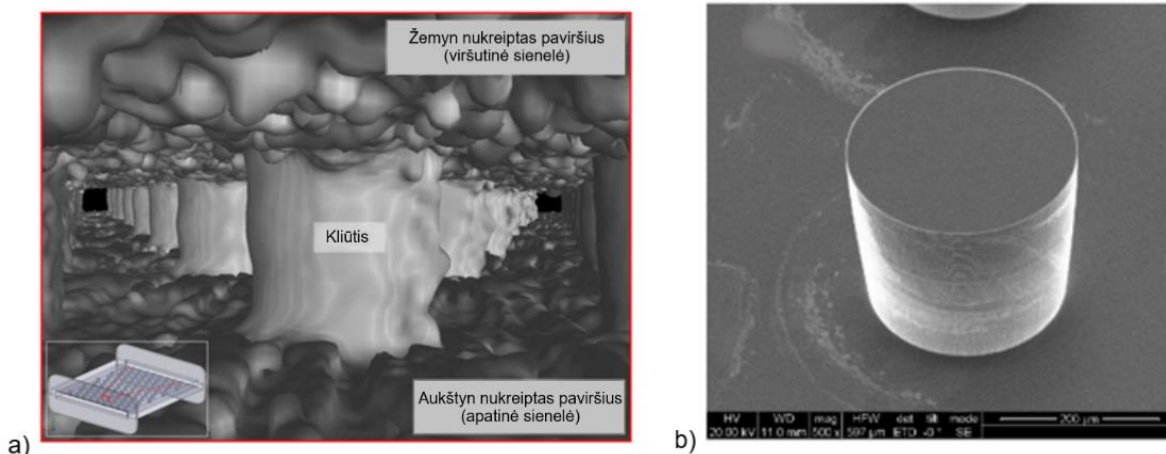
1.38 pav. Sūkuringumo kontūrai, kai: a) $Re = 100$, $G = 1,2$; b) $Re = 100$, $G = 1,7$; c) $Re = 100$, $G = 2,5$; d) $Re = 100$, $G = 4$; e) $Re = 40$, $G = 2$ [63]

1.5. Mikrogamybos technologijos

Kartu su naujų technologijų progresu buvo tobulinami ir įvairūs mikrogamybos metodai. Mikrokanalo medžiagų ir gamybos technologijos pasirinkimas priklauso nuo būsimų naudojimo sąlygų. Dažniausiai tai polimerai, stiklas, silicis ar metalas. Biomedicinos ir chemijos pramonėje daugiausia naudojami iš polimerų ar stiklo, o elektronikos ir mechanikos srityse iš silicio ar metalo pagaminti mikrokanalai. Skirtingų tipų mikrokanalai gaminami naudojant: mikromechaninį pjovimą, šlapią ir sausą ęsdinimą, litografiją, reljefo įspaudimą, įpurškiamą liejimą / formavimą, lazerinę abiaciją ir kitas technologijas [3]. Efektyviausia ir, palyginti, švari mikrokanalų gamyba yra naudojant lazerį. Išplėtoti įvairūs metodai: UV lazerinis, IR lazerinis, trumpų ir ultratrumpų impulsų lazerinis mikromechaninis apdirbimas ir kt. [64].

Kirsch'as ir kt. [65] palygino, kiek jų 3D spausdinimo *L-PBF* (angl. *Laser Powder Bed Fusion*) metodu pagamintų mikrokanalų termohidaulinės savybės skiriasi nuo kitų autorių tradiciniais

metodais pagamintų glotnių mikrokanalų. 3D spausdinimas sukuria labai didelį tiek viršutinės, tiek apatinės kanalo sienelių šiurkštumą (žr. 1.39 pav. a). Kuo didesnis kliūčių išdėstymo tankis, tuo santykinai ilgiau lazeriu kaitinamas kiekvienas spausdinamo skerspjuvio sluoksnius, ir tuo labiau nelygios gaunasi sienelės. Tai padidina trinties koeficientą nuo 20 iki 60 %, bet kartu pagerėja šilumos perdavimas, palyginti su glotniais mikrokanalais. Naphon'as ir kt. [66] patvirtino teiginį, kad mikrokanaluose, dėl jų mažų matmenų, sienų šiurkštumas daro įtaką tiek hidrauliniams, tiek šiluminėms savybėms. Makrokanaluose šiurkštumą galima įvertinti pasitelkiant Moody lenteles [67], mikrokanalams labiau tinka modifikuota Moody diagrama, pagrįsta pratekėjimo susiaurėjimo skersmeniu [68].



1.39 pav. Vidiniai mikrokanalo paviršiai priklausomai nuo gamybos metodo: a) *L-PBF* [65]; b) mikromechaninis apdirbimas [40]

Nuo konstrukcinių medžiagų ir gamybos technologijos priklauso kokybinės mikrokanalų savybės. Todėl darant tiek natūrinį, tiek skaitinį eksperimentą reikia tai įvertinti.

1.6. Baigiamojo projekto temos ir uždavinių pagrindimas

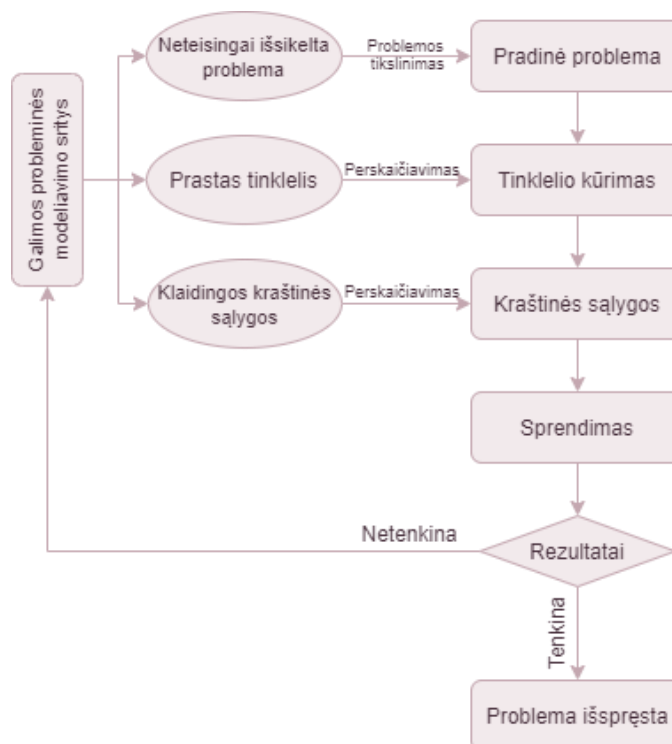
Iš apžvelgtos literatūros matyti, jog dar nėra sisteminio skaitiškai ir eksperimentiškai patvirtinto požiūrio, kokia mikrokanalo struktūra yra termohidrauliškai efektyviausia. Dažniausiai tiriamos tik šiluminės mikrokanalų savybės, nors tekėjimo hidrodinamika taip pat svarbi bendrajam energetiniam efektyvumui. Todėl buvo pasirinkta nagrinėti skysčio tekėjimo dėsninumus mikrokanaluose.

Tyrimas bus atliekamas naudojantis *OpenFOAM* programine įranga. Pirmiausia bus sukurtas natūrinį eksperimentą atitinkantis skaitinis modelis ir validuojami pasirinkti jo parametrai. Tada, analogiškai validuotam, bus sukurti hipotetiniai modifikuotų mikrokanalų modeliai. Gauti cilindrinį ir elipsinį kliūčių masyvų modeliavimo, tam tikroje *Re* skalėje, rezultatai padės nustatyti, kuris iš nagrinėjamų atvejų yra efektyviausias pagal hidrodinaminius parametrus ir nuspėjamus šiluminius. Tai yra svarbu siekiant kurti efektyvius mikrokanalus aušinimui ir daugiau sužinoti, kaip vyksta tekėjimas sudėtingoje konstrukcijoje.

2. Metodika

Baigiamajame darbe pagrindinis tyrimo metodas yra skaičiuojamoji skysčių ir dujų dinamika (angl. *computational fluid dynamics (CFD)*). Tai taktųjų medžiagų mechanikos sritis, kuri plačiai naudojama tiriant su skysčių ir dujų tekėjimu susijusias problemas. *CFD* tyrimai skaitiniais metodais turi didelę įtaką hidromechanikoje, aviacijoje, aerodinamikoje, degimo procesuose ir kitose tyrimų srityse.

Modeliavimo eigos algoritmas pateiktas 2.1 pav. Jis prasideda nuo pradinės problemos iškėlimo, vėliau seka tinklelio kūrimas, kraštinių sąlygų pasirinkimas. Vienas iš jų, o gal net ir pati išsikelta problema, gali būti klaidinga, tuomet gaunami netikslūs rezultatai, kuriuos reikia tikslinti ir kartoti.



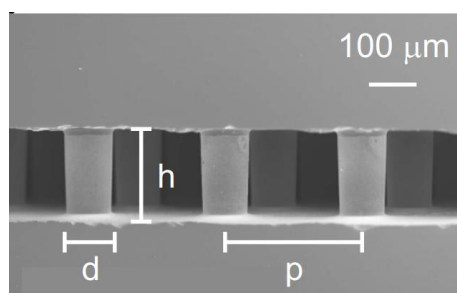
2.1 pav. Modeliavimo eiga

2.1. Modeliuojamas eksperimentas

Skaitinio modelio validacijai buvo pasirinktas Renfer'io ir kt. [69] atliktas eksperimentas. Jame tirta mikrokanalų su cilindrinėmis kliūtimis hidrodinamika. Tyrimams buvo naudotas tiek linijinis, tiek šachmatinis kliūčių išdėstymas, imituojant realų elektroninį lustą. Prietaiso matmenys surašyti 2.1 lentelėje, jo dalis parodyta 2.2 pav.

2.1 lentelė. Eksperimentinio prietaiso matmenys

Kanalo ilgis	$1,2 \cdot 10^{-2}$ m
Kanalo plotis	10^{-2} m
Kanalo aukštis	$2 \cdot 10^{-4}$ m
Cilindrinų kliūčių kiekis	50×50
Cilindrinų kliūčių skersmuo	10^{-4} m
Tarpai tarp kliūčių	$2 \cdot 10^{-4}$ m



2.2 pav. Mikrokanalo vaizdas gautas naudojantis skenuojančiu elektroniniu mikroskopu [69]

Šilumnešis buvo varomas rotoriniu siurbliu, siekiant sumažinti pulsacijas, kurios gali sukelti srauto sutrikdymą, priešlaikinį pereinamąjį režimą. Debitui viršijus 50 ml/min, greičio / debito nepastovumas buvo ne didesnis nei 2 %. Srautas buvo matuojamas su laminaraus slėgio gradiento srauto jutikliu, kurio skalės tikslumas 2 %. Slėgio perkryčiui tarp matavimo taškų matuoti buvo naudojamas diferencialinis manometras, kurio diapazonas 0–2,0 bar, o tikslumas 0,2 %. Tėkmės struktūrų analizei ir vizualizacijai naudotas mikrodalelių judėjimo įvaizdinimo metodas – μPIV (angl. *Particle image velocimetry*) pasitelkus epifluorescencinę mikroskopiją. Visi matavimai buvo atlikti kambario temperatūroje, pastovi temperatūra nebuvo išlaikyta, kaip šilumnešį naudojant dejonizuotą vandenį su šiek tiek natrio hidroksido, norint sureguliuoti pH, kad sumažėtų anijoninių dalelių (pasėtu fluorescencinių dalelių) prilipimas ir kaupimasis ant kliūčių ir sienelių.

Dviejų skirtingų išdėstymų kanalų slėgio perkryčiai visame luste pavaizduoti 2.3 pav., kaip nuo Reinoldso skaičiaus priklausanti funkcija, kur Re_d apibrėžtas:

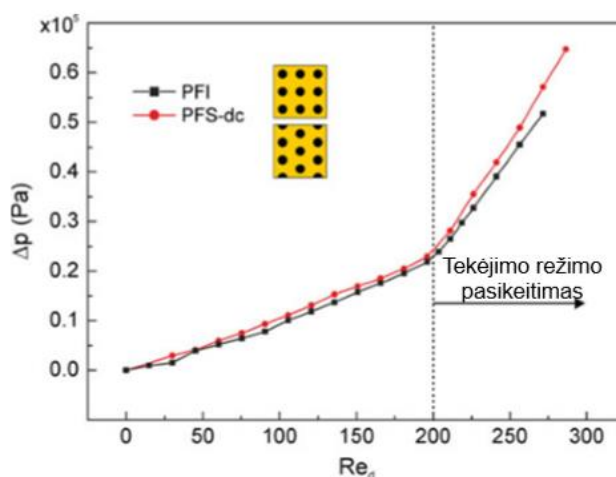
$$Re_d = \frac{v_m d}{\nu} \quad (2)$$

čia ν – kinematinė vandens klampa; v_m – vidutinis greitis tarp kliūčių. Bet kokiam tūriniam debitui \dot{V} vidutinis greitis bus:

$$v_m = \frac{\dot{V}}{h(p-d)N_p} \quad (3)$$

čia h – kanalo aukštis; d – cilindrinė kliūčių skersmuo; p – atstumas tarp kliūčių; N_p – kliūčių skaičius statmename srautui skerspjūvyje.

2.3 pav. matomas staigus kreivės nuolydžio pokytis, kai Re_d artėja prie 200, kuris siejamas su laminarinio tekėjimo režimo perėjimu į turbulentinį. Šį perėjimą lemia sūkurių dinamika, kai Re_d yra virškritinės vertės. Staigus ir didelis slėgio nuolydžio padidėjimas yra problematiškas mikroelektroninėse aušinimo sistemose, dėl padidėjusių slėgio nuostolių.



2.3 pav. Santykinio slėgio perkryčio priklausomybė nuo Re_d esant linijiniam ir šachmatiniam kliūčių išdėstymui tiriamame mikrokanalų masyve [69]

2.2. OpenFOAM programinė įranga

OpenFOAM (angl. *Open Field Operation And Manipulation*) – yra atvirojo kodo C++ programavimo kalba sukurtų priemonių rinkinys naudojamas mechanikos, takiujų terpių dinamikos, šilumos mainų skaitiniams imitaciniams modeliams ar simuliacijoms kurti [70]. Vartotojai gali keisti programų kodus, taip pritaikydami juos savo reikmėms. Taip pat galima atlikti modeliavimo darbus su jau esamomis sprendyklėmis, nekeičiant pirminio kodo. Neribotas, palyginus su kitais komerciniais *CFD* programų paketais, *OpenFOAM* priemonių lankstumas ir individualūs naudotojų poreikiai nesudarė prielaidų sukurti daugiafunkcinei grafinei vartotojo sąsajai (angl. *Graphical user interface (GUI)*) Todėl *OpenFOAM* naudojamas tiesiog įvedant vyksta per komandų eilutes.

Diferencialinių lygčių sprendimui / sprendimams taikomas baigtinių tūrių diskretizacijos metodas. Modeliuojama sritis suskaidoma į baigtinį kiekį tūrinių elementų, tada sprendžiamos masės ir momento lygtys, diskretizavus dalinėmis išvestinėmis ir sprendžiant jas skaitiškai [71]. Visi tokiosios terpės parametrai skaičiuojami kiekvieno elemento centro taške. Visos kiekvienam elementui sprendžiamos lygtys yra priklausomos nuo šalia esančių elementų.

OpenFOAM aplinkoje egzistuoja dvi kategorijos programų: pirmoji tai sprendyklės ir antroji – įrankiai. Sprendyklėmis atliekami skaičiavimai sprendžiant uždavinį. Įrankiai skirti paruošti ir patikrinti ar tinkamas tinklėlis (angl. *mesh*), nustatyti norimą modeliavimo atvejį, apdoroti rezultatus ir atlikti kitas, nesusijusias su modeliuojamo uždavinio sprendimu, operacijas.

Pati modeliavimo procedūra susideda iš trijų pagrindinių etapų: išankstinio apdorojimo, sprendimo ir apdorojimo po sprendimo (ikiprocesoriniai, procesoriniai ir poprocesoriniai darbai). Išankstinio apdorojimo etape naudotojas turi sukurti tinklėlį (diskretizuoti modeliuojamą tūrį į baigtinio tūrio elementus), pasirinkti skysčio fizikines bei chemines savybes, taip pat kraštines sąlygas modeliuojamos srities ribose. Poprocesoriniai darbai atliekami su grafinais įrankiais, leidžiančiais atvaizduoti uždavinio geometrinę formą, tinklėlį ir gautus modeliavimo rezultatus.

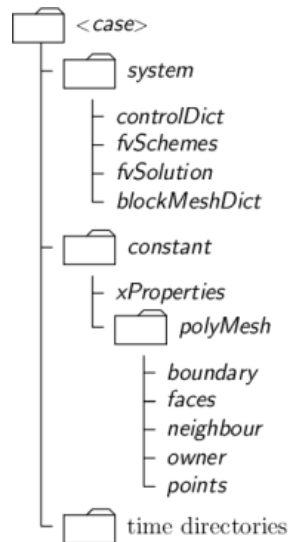
2.3. Modeliavimo eiga

Geometriškai apibrėžus modeliuojamą tekėjimo erdvę, bei žinant eksperimento sąlygas, pereinama prie uždavinio sudarymo *OpenFOAM* platformoje, tam reikia:

- importuoti / sugeneruoti modeliuojamos erdvės tinklelį;
- parinkti pradines ir kraštines sąlygas, kitus parametrus (pavyzdžiui, medžiagos fizikines ir / ar chemines savybes);
- parinkti tinkamą uždavinio sprendimo algoritmą. Jis parenkamas atsižvelgiant į skysčio ar dujų tipą, tinklelį, pradines ir kraštines sąlygas.

Pagrindinę *OpenFOAM* bylų struktūrą (žr. 2.4 pav.), nepriklausomai nuo sprendžiamo uždavinio, sudaro katalogai:

- **constant** kataloge yra aprašytas tinklelis, taip pat nurodomos konkrečios fizikinės savybės, apibrėžiamas turbulencijos ir skaitinio eksperimento modelis;
- **system** kataloge aprašomi parametrai susiję su sprendimo procesu, pavyzdžiui, kada jis prasideda ir baigiasi, laiko intervalas pagal kurį įrašomi rezultatai, kokios diskretizavimo struktūros, sprendyklės naudojamos, koks konvergavimo tikslumas;
- **time** kataloguose laikomi duomenys apie tam tikrus laukus ir pradines sąlygas, pavyzdžiui, greičio ir slėgio laukai.



2.4 pav. *OpenFOAM* bylos struktūra

2.4. Sprendžiamos lygtys

Uždavinio sprendimui buvo pasitelkta nestacionari Navjė-Stokso lygčių sistema, kuri sprendžiama *PIMPLE* algoritmu, jis yra *PISO* (angl. *Pressure Implicit with Splitting of Operator*) ir *SIMPLE* (angl. *Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*) algoritmų kombinacija. Visi trys išvardintieji yra iteracinės sprendyklės, bet *PISO* ir *PIMPLE* skirti nestacionariems atvejams, o *SIMPLE* – stacionariems. *PIMPLE* algoritmas atitinka *SIMPLE* algoritmą kiekvienam laiko žingsniui, bet esama ir papildomų koreguojančių algoritmų (angl. *outer correctors*) – papildomų išorinių iteracijų. Būtent dėl jų, *PIMPLE* algoritmas pasižymi geresniu stabilumu lyginant su *PISO*, ypač tais atvejais, kai reikalingi dideli laiko žingsniai, o maksimalus Kuranto (angl. *Courant*) skaičius gali būti didesnis, nei 1 [71].

PIMPLE algoritmo išorinių korektorių skaičius apibrėžia, kiek išorinių iteracijų reikia atlikti, t. y., kiek kartų sprendžiama lygčių sistema, kol ji pereina prie kito laiko žingsnio, neatsižvelgiant ar jis konvergavo, ar ne. Nustatytas išorinių korektorių skaičius nebūtinai reiškia, kad visi pakartojimai bus atlikti, jis spręš lygtis, kol bus pasiektas laiko žingsnio konvergavimas, ir bus pereita prie kito laiko

žingsnio. Laiko žingsnio konvergavimo kriterijai apibrėžiami kaip absoliuti sprendyklės tolerancija, kuri gali būti nurodoma arba imama pagal numatytus nustatymus. Visa tai padaro algoritmą greitą, kai jis yra stabilus, tačiau, kai atsiranda nestabilumas iteracijų skaičius padidėja, t. y., algoritmas pats prisitaiko prie numatyto tekėjimo sąlygų.

Šio algoritmo stabilumą galima pagerinti sumažinus relaksacijos koeficientą, bet tai padidins iteracijų iki konvergavimo skaičių, todėl reiktų padidinti išorinių korektorių skaičius. Toks būdas naudingas norint apsisaugoti nuo nestabilių sprendinių, kai Kuranto skaičius staigiai išauga.

PIMPLE algoritmas:

- sudaroma judesio kiekio lygties matrica;
- sudaroma slėgio lygties matrica, naudojantis judesio kiekio matrica;
- suskaičiuojamas slėgis;
- patikslinami greičiai pagal naują slėgio lauką;
- perdaroma judesio kiekio matrica pagal naujus greičius;
- sudaroma slėgio matrica, naudojantis perdaryta judesio kiekio matrica;
- suskaičiuojamas slėgis;
- patikslinami greičiai pagal naują slėgio lauką.

2.5. Sprendimo kontrolė

Užtikrinant, kad gautas sprendinys yra teisingas ir patikimas, lygčių sprendimas kartojamas tol, kol kintamojo pokytis iš vienos iteracijos į kitą (liekana – angl. *residual*) tampa toks mažas, kad sprendinį galima laikyti nebekintančiu, t. y. skaitinis sprendinys konverguoja į diferencialinių lygčių sprendinį. Tada visos diskrečioms tvermės lygtys (impulso, energijos ir kt.) pasiekia nurodytą tolerancijos lygį / vertę, o net ir atliekant papildomas iteracijas, gaunamas masės, impulso ir energijos balansas. Liekanos nustato disbalansą / paklaidą tvermės lygtyse. Įprastai konvergavimo tikslumas – gauta liekanos vertė, po kurios iteracijos nebėra atliekamos, nustatoma 10^{-4} – 10^{-6} arba mažiau. Tačiau taikant aukštesnio laipsnio diskretizavimo schemas liekanos dažnai būna didesnės, todėl jei liekanos vertė iteruojant nebekinta (nei mažėja iki užsiduotos vertės, nei didėja), laikoma, kad sprendinys yra konvergavęs.

2.6. Turbulencijos modeliavimas

Turbulentiniam tekėjimui būdingas atsitiktinis ir chaotiškas sukuringumas. Sukuriai padidina tėkmės energijos išsklaidymą, maišymąsi, šilumos perdavimą ir trintį. Tekėjimą ribojantys paviršiai apibrėžia didžiausią sukurių dydį. Pagal dominuojančią turbulencijos teoriją, susidarantys sukuriai vis skyla ir generuoja mažesnius naujus sukurius tol, kol klampos jėgų visiškai išsklaidomi į šilumą [72].

Turbulentinį tekėjimą galima simuliuoti tiesiogiai sprendžiant Navjė-Stokso lygtis visoms turbulencijos skalėms tiek laike, tiek erdvėje, naudojantis *DNS*. Vis dėlto, dėl ribotų kompiuterinių resursų, *DNS* gali būti taikoma tik esant mažam *Re* ir paprastai geometrinei formai [73].

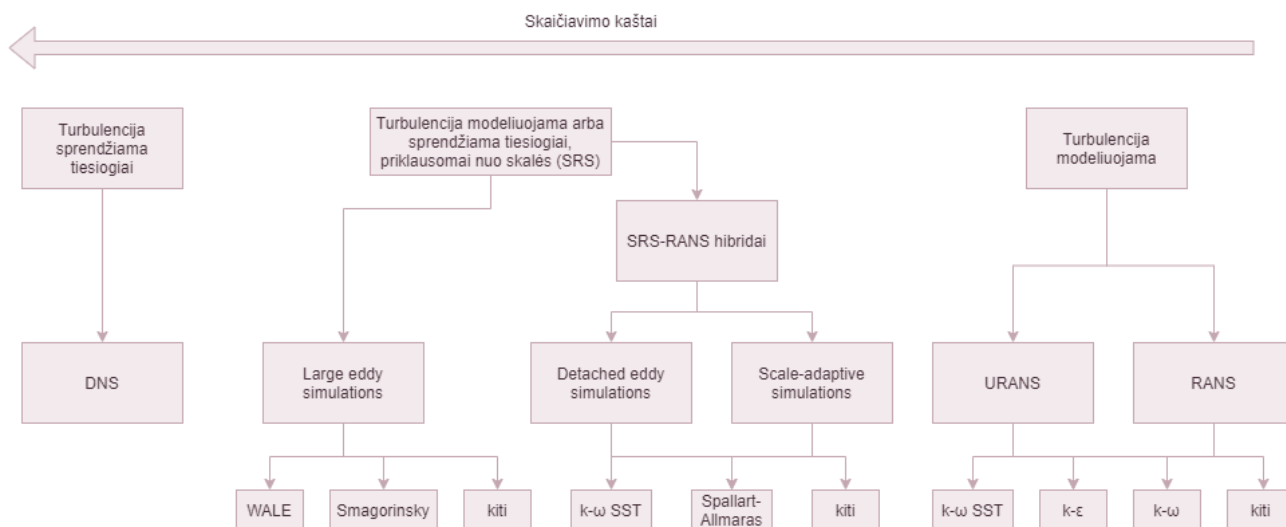
Kiek mažiau resursų naudoja kombinuoti metodai kai tik didžiausi sukuriai sprendžiami tiesiogiai, o mažesnius modeliuoja (angl. *Scale-Resolving Simulations*). Tai *LES* (angl. *Large Eddy Simulation*), *SAS* (angl. *Scale-Adaptive Simulation*) ir *DES* (angl. *Detached Eddy Simulation*). Mažiausiai skaičiavimo resursų naudoja tik modeliavimą taikantys metodai. Tai *RANS* – Reinoldso suvidurkintų

Navjė-Stokso (angl. *Reynolds averaged Navier-Stokes*) lygčių ir *URANS*, kur suvidurkintas tūrinis srautas dar kinta laike (angl. *Unsteady Reynolds averaged Navier-Stokes*), metodai (žr. 2.5 pav.) [73]. Modeliuojant Navjė-Stokso lygtys yra vidurkinamos laike ir gaunama diferencialinių lygčių sistema greičiui ir slėgiui. Tekėjimo greitis yra skaidomas į suvidurkintą pagal laiką ir kintamą dedamąsias:

$$u(t, x) = \bar{u}(x) + u'(t, x) \quad (4)$$

čia u – greitis; t – laikas; x – koordinatė; \bar{u} – suvidurkinta greičio dedamoji; u' – kintama greičio dedamoji.

Kuo nukrypimai nuo vidutinės reikšmės didesni, tuo intensyvesnė turbulencija. Laiko vidurkinimo metodas taikomas tiek statistškai stacionariu, tiek nestacionariu tekėjimo atvejais.



2.5 pav. Turbulencijos modeliai

Pasirinkus dalinį ar visišką turbulencijos modeliavimą, toliau pasirenkami turbulencijos modeliai (žr. 2.5 pav.). Jie skiriasi naudojamomis lygtimis ir jų turbulencijos parametrais.

Sprendžiamam uždaviniui buvo pasirinktas *URANS* metodas, jo turbulencijos lygčių sprendimui galima naudoti keliasdešimt įvairių modelių, žinomiausi: $k-\epsilon$, $k-\omega$ ir $k-\omega SST$ (angl. *Shear Stress Transport*). Jie visi yra dviejų lygčių modeliai, priskiriami turbulencinio klampumo modeliams, todėl atsiranda dvi papildomos pernešimo lygtys, kurios yra skirtos aprašyti tėkmės turbulencinėms savybėms. Pirmasis kintamasis k nusako turbulencijos energiją, o antrasis ϵ arba ω lemia turbulencijos mastą.

Dviejų lygčių turbulencijos modelyje $k-\epsilon$ naudojama generuojamos turbulencijos kinetinė energija k ir jos išsisklaidymo greitis ϵ . Šis modelis reikalauja atitinkamų kraštinių sąlygų aprašymo. Juo nelabai gerai modeliuojama pasienio sritis ir prastai pasienio sluoksnio atsiskyrimas. Todėl šis modelis netinka modeliuoti sudėtingus tekėjimus, tačiau vis dar plačiai naudojamas, jei nebūtinai tikslus pasienio efektų įvertinimas.

Tiksliam pasienio efektų įvertinimui naudojamas $k-\omega$ modelis, kur savitasis išsisklaidymo greitis žymimas ω . Šis modelis sukurtas norint tiksliau modeliuoti tėkmę šalia ribojančių paviršių, bet jis yra labai jautrus pasirinktoms pradinėms sąlygoms. Patobulinta $k-\omega$ modelio versija $k-\omega SST$ veikia kaip $k-\omega$ pasienio sluoksniuose ir kaip $k-\epsilon$ toliau nuo sienų. Kadangi $k-\omega SST$ modelis sujungia du skirtingus turbulencijos modelius, $k-\epsilon$ ir $k-\omega$, naudojama suliejimo funkcija, kuri suteikia sklاندų

perėjimą tarp modelių [74]. Jei tinklelis yra pakankamai tankus, $k-\omega$ SST modeliu realistiškas pasienio sluoksnio atsiskyrimas gaunamas ir be kraštinių sąlygų aprašymo.

Šiam darbui buvo pasirinktas $k-\omega$ SST modelis. Tai dviejų lygčių modelis, paremtas Businessko sūkurių klamos hipoteze. Turbulentinės kinetinės energijos k perdavimas apibrėžiamas:

$$\frac{D}{Dt}(\rho k) + \nabla \cdot k - \Delta(\rho D_k k) = \rho G - \frac{2}{3}\rho(\nabla \cdot u)k - \rho\beta^*\omega k + S_k \quad (5)$$

čia ρ – tankis; D_k – turbulentinės kinetinės energijos efektyvioji difuzija; G – turbulentinės kinetinės energijos gamybos narys; β^* – konstanta; S_k – turbulentinės kinetinės energijos šaltinio narys.

Savitasis turbulencijos išsisklaidymo greitis:

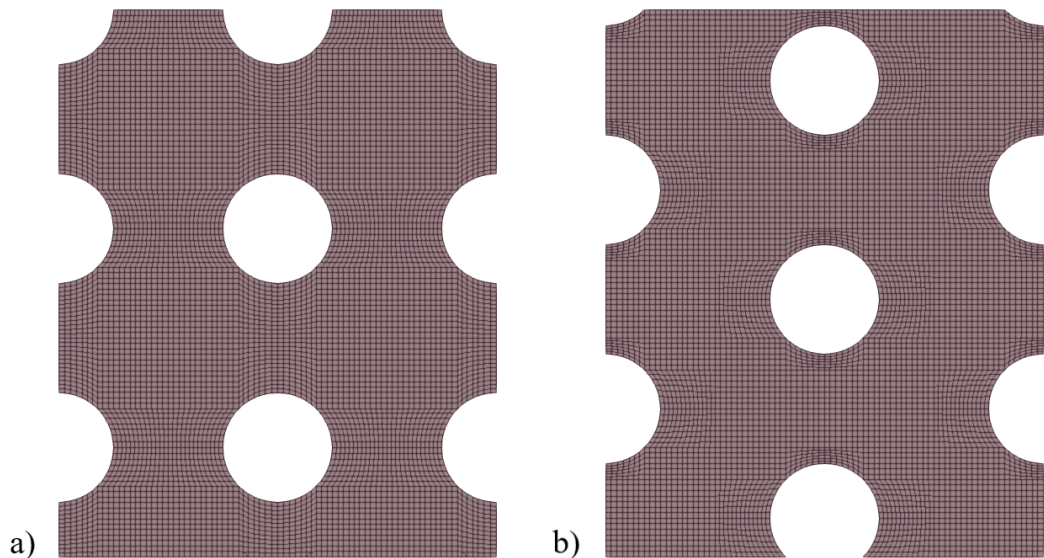
$$\frac{D}{Dt}(\rho\omega) + \nabla \cdot \omega - \Delta(\rho D_\omega\omega) = \rho\gamma G - \frac{2}{3}\rho\gamma(\nabla \cdot u)\omega - \rho\beta\omega^2 - \rho(F_1 - 1)CD_{k\omega} + S_\omega \quad (6)$$

čia D_ω – savitojo disipacijos greičio efektyvioji difuzija; γ – suliejimo funkcija tarp F_1 ir modelio konstantų: γ_1 bei γ_2 ; F_1 – suliejimo funkcija; $CD_{k\omega}$ – bedimensis skaliaras; S_ω – savitojo išsisklaidymo greičio šaltinio narys.

2.7. Validacija

2.7.1. Tinklelio konvergavimo tyrimas

Tinklelio kūrimui pasirinktas *OpenFOAM* ikiprocesorinis įrankis *blockMesh*. Jis neturi grafinės sąsajos, viskas aprašoma paprastomis funkcijomis tekstu. Todėl juo sąlyginai patogiau generuoti tik paprastus tinklelius, uždavinių su nesudėtinga skaičiuojamąja erdve sprendimui. Sudėtingesnių tinklelių kūrimui patogiau naudoti grafinę sąsają turinčias programas. Darbo uždavinio ypatybė – labai sudėtinga, bet periodinė skaičiuojamoji erdvė. Todėl šiam darbui reikėjo specialiai sukurti papildomą programą, kuria paruošiamos komandos *blockMesh* įrankiui ir taip automatizuojamas labai sudėtingų tinklelių generavimas. *Python* programavimo kalba buvo sukurtos dvi programos versijos: linijiniam (žr. 2 priedas) ir šachmatiniam išdėstymui. Jose galima pasirinkti kanalo aukštį, cilindrinų kliūčių spindulį arba didįjį ir mažąjį pusašio ilgį, jei tai elipsė, atstumą tarp kliūčių tiek tekėjimo kryptimi, tiek statmena tekėjimo kryptčiai, įėjimo / išėjimo ilgį iki / nuo kliūčių, apytikslų celės kraštinės ilgį. Įvedus šiuos duomenis programomis sukuriama komandų rinkiniai, kuriuos vykdant *blockMesh* sugeneruojami struktūriniai tinkleliai (žr. 2.6 pav.).



2.6 pav. Sugeneruoto a) linijinio ir b) šachmatinio kliūčių išdėstymo kanalo tinklelio (Nr. 2 žr. 2.2 lentelėje) fragmentai

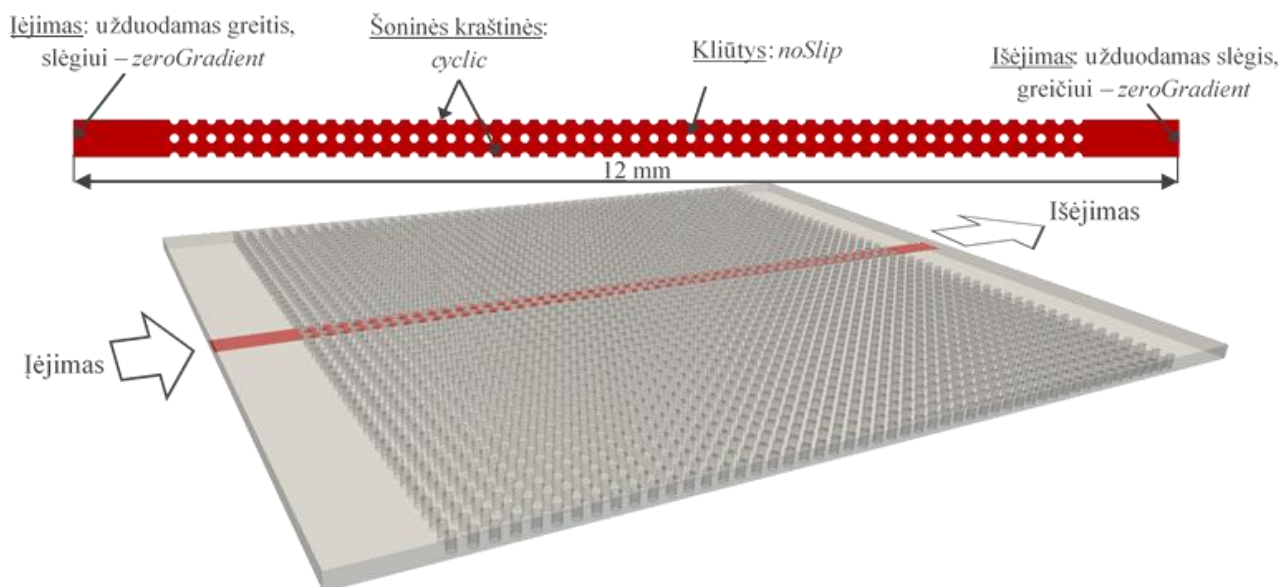
Tinklelio kūrimas prasideda kontūro apibrėžimu, ten turi būti nurodomi taškai, juos jungiančios linijos ir pastarąsias apjungiančios sritys / tūriai, kurios vėliau keliamos į fizikines zonas – sienas, įėjimus, išėjimus, periodines kraštines. Sekantis žingsnis yra tinklelio generavimas (kontūro padengimas tinklu), nes modeliavime reikia, kad tūris, kuriame vyksta modeliuojamas tekėjimas, būtų padalintas į daug nepersidengiančių mažų dalių – elementų. Jie turi būti parinkti optimalūs, per maži pailgina skaičiavimo trukmę, o per dideli padidina skaičiavimo paklaidas. Generuojant tinklą gali būti naudojamas struktūrinis arba nestruktūrinis generavimo metodas. Nestruktūriškai sugeneruoti galima bet kokį tūrinį objektą, toks generavimas dažniausiai naudojamas sudėtingų geometrinių figūrų tinkleliuose. Struktūriškai generuotuose tinkleliuose elementai išdėstę pagal fluido tekėjimo kryptį, jų asimetriškumas mažesnis, taip pasiekiamas greitesnis uždavinio konvergavimas ir didesnis tikslumas.

Atsižvelgiant į norimo sumodeliuoti eksperimento geometrinės ypatybes, buvo atliktas uždavinio konvergavimo tyrimas. Dažniausiai jis atliekamas su bent trimis skirtingo tankumo tinkleliais, arba su tiek skirtingų tinklelių, kol rezultatai nebesikeičia. Sumažinus celių dydį, laiko žingsnis taip pat sumažėja, tuomet tiek erdvinės, tiek laiko diskretizavimo klaidos turėtų asimptotiškai priartėti prie nulio.

Siekiant sumažinti kompiuterio resursų sąnaudas ir skaičiavimo laiką buvo panaudotos periodinės kraštinės sąlygos. Skaičiuojamoji erdvė kurios tinkleliai buvo tiriami parodyta 2.7 pav. Siekiant skaitiškai įvertinti skirtumus tarp skirtingo tankumo tinklelių, buvo parengti skirtingą celių skaičių turintys 2D tinkleliai, jų charakteristikos pateikiamos 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Tinklelių charakteristikos

Nr.	Didžiausia celės kraštinė, m	Elementų skaičius
1	$4 \cdot 10^{-6}$	267600
2	$5 \cdot 10^{-6}$	172400
3	$6 \cdot 10^{-6}$	123912
4	$7 \cdot 10^{-6}$	84416
5	$8 \cdot 10^{-6}$	66900
6	$9 \cdot 10^{-6}$	51768
7	$10 \cdot 10^{-6}$	43060
8	$11 \cdot 10^{-6}$	35352
9	$13 \cdot 10^{-6}$	24620
10	$16 \cdot 10^{-6}$	15776



2.7 pav. Mikrokanalo dalies geometrija

Specifinės sienų funkcijos kliūtims nebuvo taikytos, nes buvo siekta išlaikyti y^+ kriterijų mažesnę nei 1. Visos naudotos kraštinės sąlygos apibendrintos 2.3 lentelėje. Kiekvienam iš tinklelių buvo atlikti skaičiavimai, kai $Re_d = 45, 150$ ir 270 , taip patikrinant jų tinkamumą visame eksperimente išmatuotų tekėjimo greičių ruože.

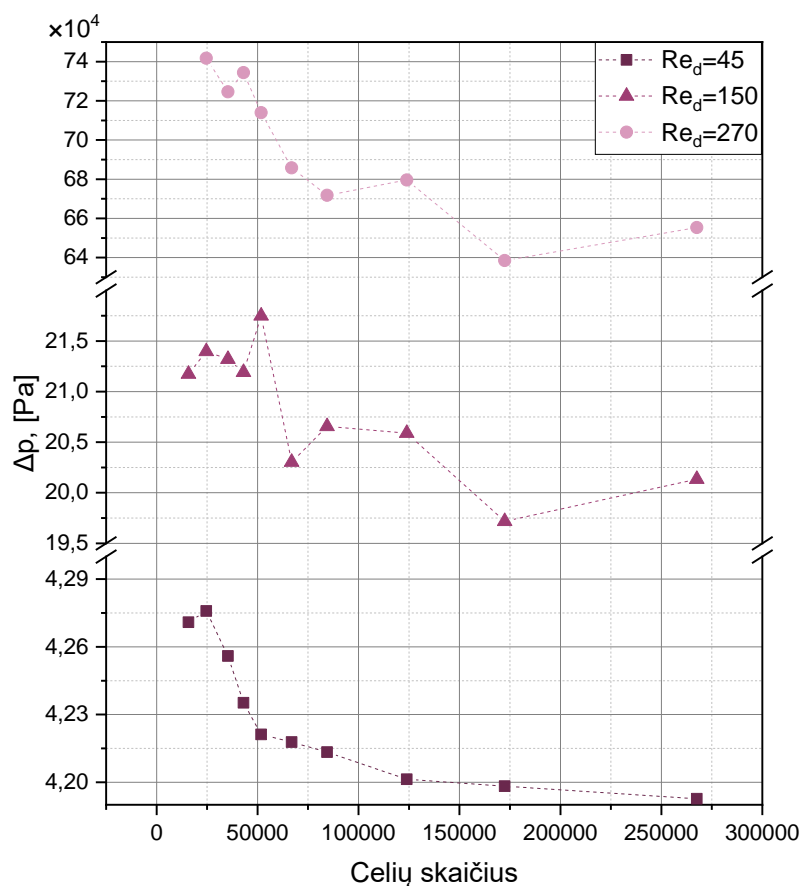
2.3 lentelė. Naudotos kraštinės sąlygos

Sritis	Kraštinė sąlyga
Įėjimas	Užduodamas greitis, slėgiui – <i>zeroGradient</i>
Išėjimas	Užduodamas slėgis, greičiui – <i>zeroGradient</i>
Kliūtys	Greičiui - <i>no slip</i> , slėgiui – <i>zeroGradient</i>
Šoninės sienos	Periodinės kraštinės sąlygos visiems skaičiuojamiems dydžiams

Slėgio skirtumų rezultatai pateikti 2.4 lentelėje ir atvaizduoti 2.8 pav. Iš gautų duomenų galima spręsti, kad sprendinys konverguoja tinklelio celių skaičiui peržengus 100000 ribą. Tolydžiausiai kinta $Re_d = 45$ kreivė, nes kitais dviem atvejais tekėjimas tampa jau nėra toks stabilus.

2.4 lentelė. Slėgio skirtumai esant skirtingiems tinkleliams ir Re_d

Tinklelis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Δp	$Re_d = 45$	4,19	4,20	4,20	4,21	4,22	4,22	4,24	4,26	4,28	4,27
	$Re_d = 150$	20,13	19,72	20,59	20,66	20,30	21,75	21,19	21,32	21,40	21,19
	$Re_d = 270$	65,53	63,85	67,96	67,18	68,58	71,39	73,44	72,46	74,17	-



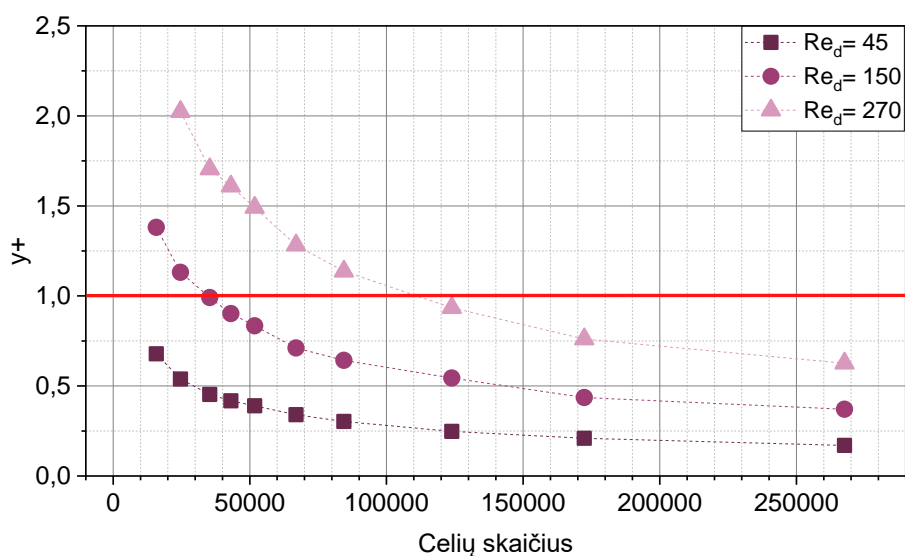
2.8 pav. Slėgio skirtumo priklausomybė nuo tinklelio celių skaičiaus esant skirtingiems Re_d

Esant pasienio sluoksnio atitrūkimui nerekomenduojama naudoti sienų funkcijų. Tai todėl, kad logaritminės funkcijos gali neteisingai numatyti skaičiuojamų dydžių gradientus. Norint gauti tikslius rezultatus, reikėtų tiesiogiai spręsti laminarinį pasluoksnį. Šiuo atveju yra pasitelkiamas bematis dydis y^+ proporcingas šlyties greičiui prie sienelės ir atstumui iki sienelės bei atvirkščiai proporcingas vietinei kinematinei klampai. Artima vienetui y^+ vertė užtikrina, kad pirma celė yra laminariniame pasluoksnyje. Tačiau norint gauti y^+ apskaičiavimui reikalingą šlyties greitį ir įvertinti tinklelio tinkamumą, reikia atlikti bandomuosius modeliavimus visame greičių ruože.

Vidutinės y^+ vertės priklausomai nuo įtekėjimo greičio pateiktos 2.5 lentelėje ir atvaizduotos 2.9 pav. Kaip ir slėgio skirtumo rezultatai, y^+ rodo, kas visam greičių ruožui tinka tinklelis su daugiau kaip 100000 celių skaičiumi.

2.5 lentelė. Vidutinės y^+ kriterijaus vertės esant skirtingiems tinkleliams ir Re_d

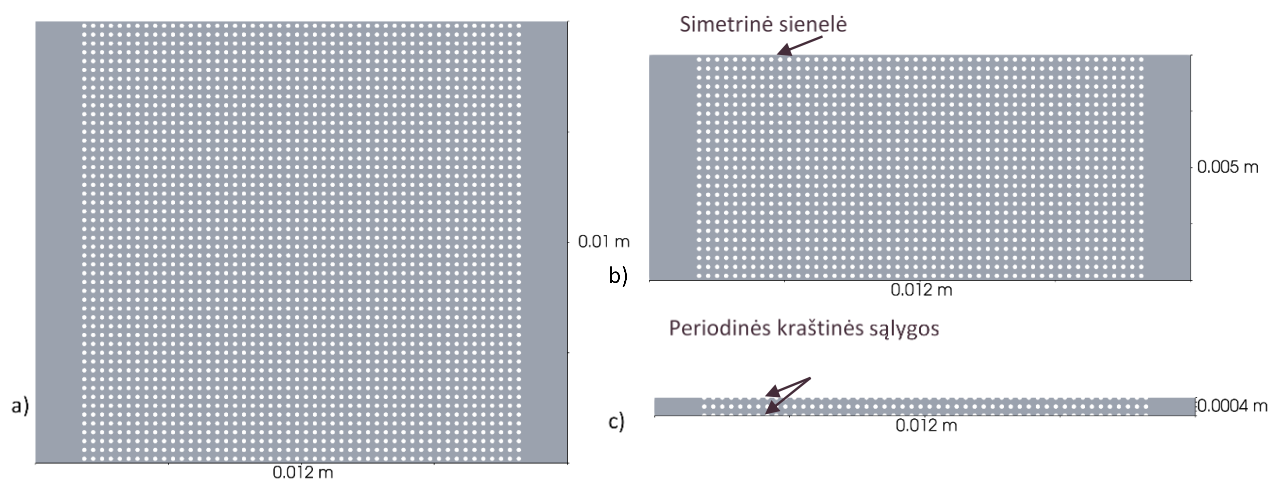
Tinklelis	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
y^+	$Re_d=45$	0,170	0,209	0,247	0,303	0,340	0,390	0,417	0,453	0,539	0,678
	$Re_d=150$	0,371	0,436	0,544	0,643	0,711	0,834	0,902	0,991	1,131	1,381
	$Re_d=270$	0,626	0,761	0,934	1,137	1,282	1,491	1,609	1,705	2,023	-



2.9 pav. y^+ kriterijaus priklausomybė nuo tinklelio celių skaičiaus esant skirtingiems Re_d

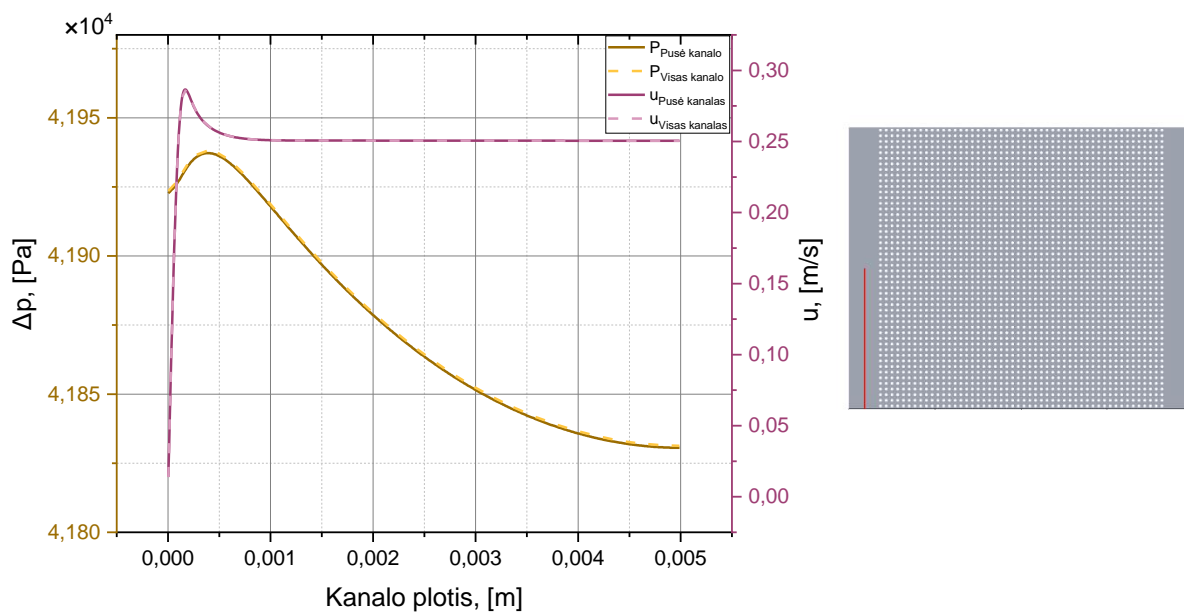
2.7.2. Geometrijos supaprastinimas

Nagrinėjamo elemento struktūra pateikta 2.10 pav. a, bet norint modeliuoti visą kanalą reikia daug resursų. Siekiant sumažinti skaičiuojamąją erdvę tai daroma statmenai tekėjimo kryptiai. Pirmiausia buvo palyginti du atvejai – sumodeliuotas visas ir tik pusė kanalo (žr. 2.10 pav. a ir b), panaudojant veidrodinę simetriją. O tikintis dar labiau optimizuoti modeliavimą išbandytos ir periodinės kraštinės sąlygos (žr. 2.10 pav. c)).



2.10 pav. Linijinio kliūčių išdėstymo mikrokanalas a) pilnas, b) pusė, c) dalis

Sumodeliuoti kanalo greičio ir slėgio profiliai (žr. 2.11 pav.) bei slėgio perkrytis (žr. 2.6 lentelė), įrodo, kad šoninių sienelių įtakos neįvertinimas reikšmingai nepaveikia bendrojo rezultato.

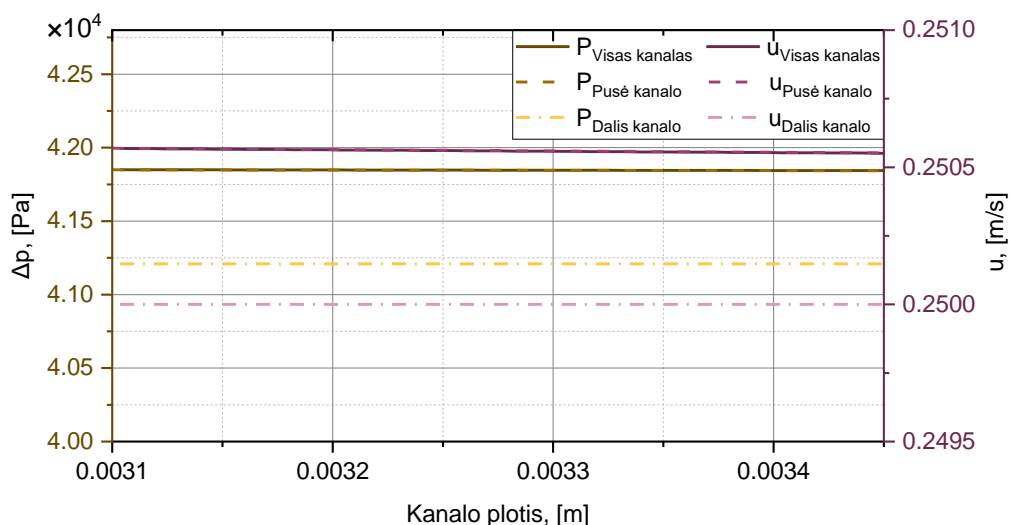


2.11 pav. Kanalo pradžios slėgio ir greičio statmeni srautui profiliai ($Re_d = 45$) (dešinėje pjūvio vieta)

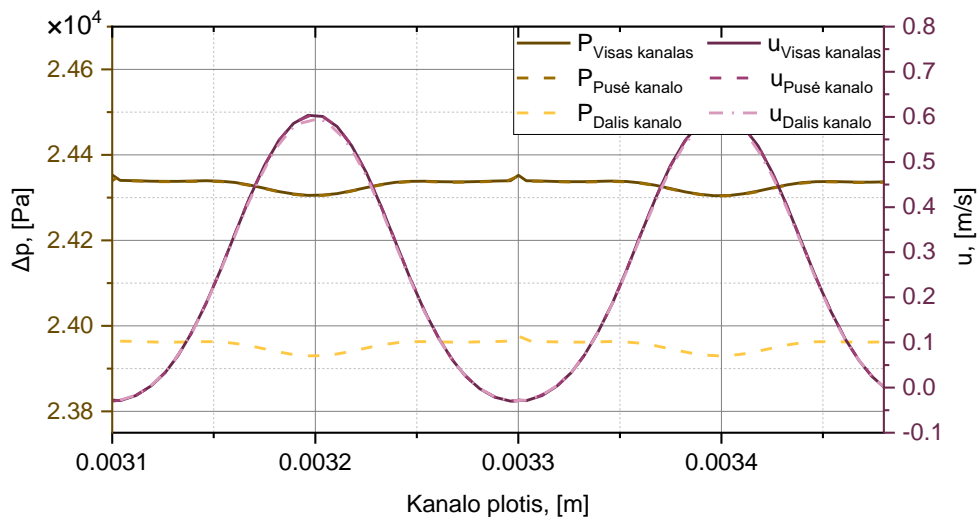
2.6 lentelė. Slėgio perkryčio kanale priklausomai Re_d palyginimas modeliuojant tik dalį kanalo

	Δp		
	$Re_d = 45$	$Re_d = 150$	$Re_d = 270$
Pilnas kanalas	4,277	23,965	76,773
Pusė kanalo	4,277	22,224	74,690
Dalis kanalo	4,213	20,655	71,394

Palyginus rezultatus gautus pradžioje (žr. 2.12 pav.) ir viduryje (žr. 2.13 pav.) viso ar dalinai sumodeliuoto kanalo matyti, kad skirtumas tarp slėgio ir greičio profilių siekia tik keletą procentų. Taigi, galima teigti, kad tik dalies kanalo modeliavimas atliekant tolesnius tyrimus yra pagrįstas.



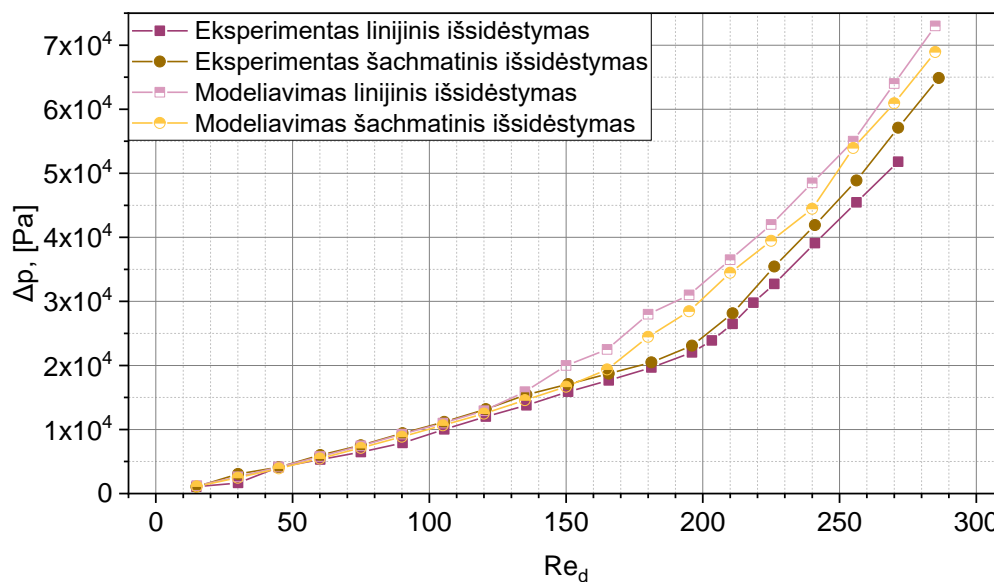
2.12 pav. Greičio ir slėgio profiliai kanalo pradžioje (sumodeliuoti esant $Re_d = 45$)



2.13 pav. Greičio ir slėgio profiliai kanalo viduryje (sumodeliuoti esant $Re_d = 45$)

2.7.3. Eksperimento validacija

Modeliavimo ir eksperimentų rezultatai palyginti 2.14 pav. Matyti, kad slėgio perkrytis sumodeliuojamas su 10 %, o esant laminariniam tekėjimui ($Re_d < 135$) tik 3 % neatitikimu. Perėjimas į turbulentinį režimą yra sumodeliuojamas esant kiek mažesniai Re_d , nei gauta eksperimente. Tai todėl, kad 2D modelis neįvertina viršutinės ir apatinės sienelių įtakos, t. y. tėkmė statmena jai kryptimi nėra ribojama. Realiame pratekėjimo skerspjūvyje kanalo aukštis tapatus atstumui tarp kliūčių, todėl viršutinės bei apatinės sienelių įtaka reikšminga.

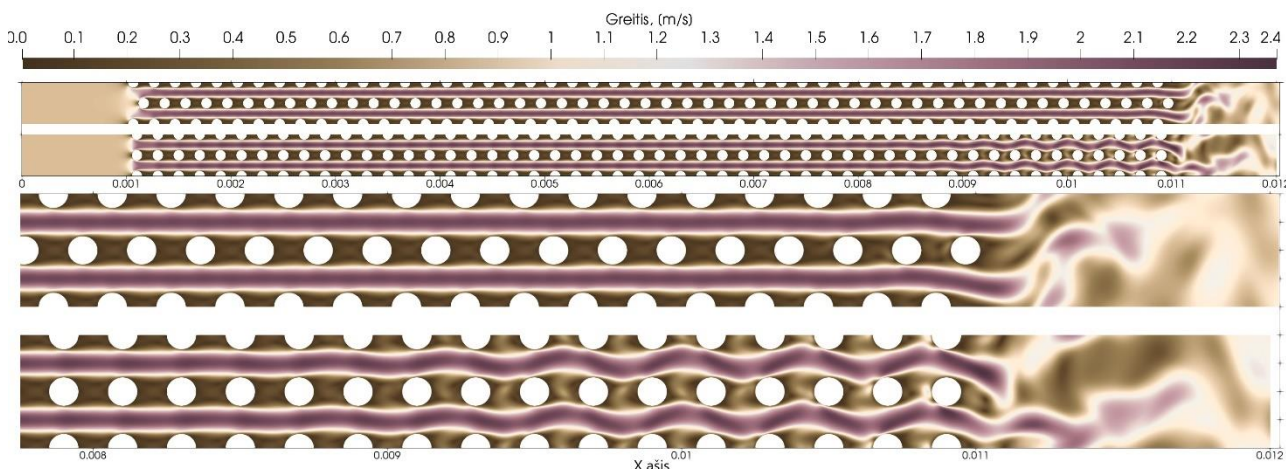


2.14 pav. Sumodeliuoto ir eksperimente išmatuoto slėgio perkryčio kanale priklausomybė nuo Re_d

Kitaip nei eksperimente, modeliavimo metu gaunamas didesnis slėgio kritimas kanale, kai išdėstymas yra linijinis. Tai galima paaiškinti tuo, kad eksperimento metu buvo įskaitoma viršutinės ir apatinės sienelės įtaka. Kanalo aukščio įtaka buvo aprašyta 1.3.3 skyrelyje.

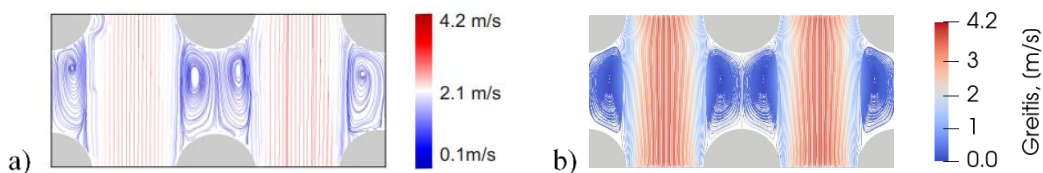
Ties $Re_d = 150$ 2.14 pav. grafike matomas aiškus linijinio ir šachmatinio išdėstymo slėgio kritimo kreivių išsiskyrimas rodo galimą režimo pasikeitimą. Palyginus greičio laukus 2.15 pav., linijinio

išdėstymo atveju, tarp kliūčių tekėjimas tampa nestabilus jau maždaug 0,009 m nuo kanalo pradžios. O tekant pro šachmatine tvarka išdėstytas kliūtis netvarkingi sūkūriai kyla tik už jų. Spartesnė srauto turbulizacija sukelia didesnius slėgio nuostolius. Taigi, modeliujant be ribojančių sienelių gaunama, kad tėkmę geriau stabilizuota šachmatinis kliūčių išdėstymas.

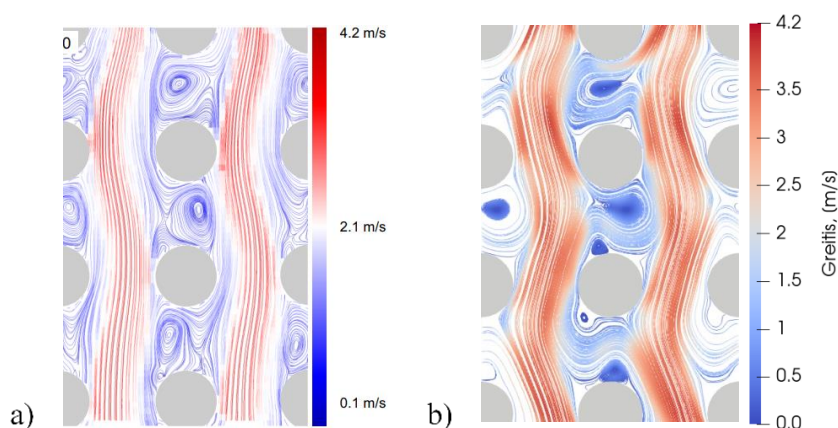


2.15 pav. Greičio laukai, kai $Re_d = 150$

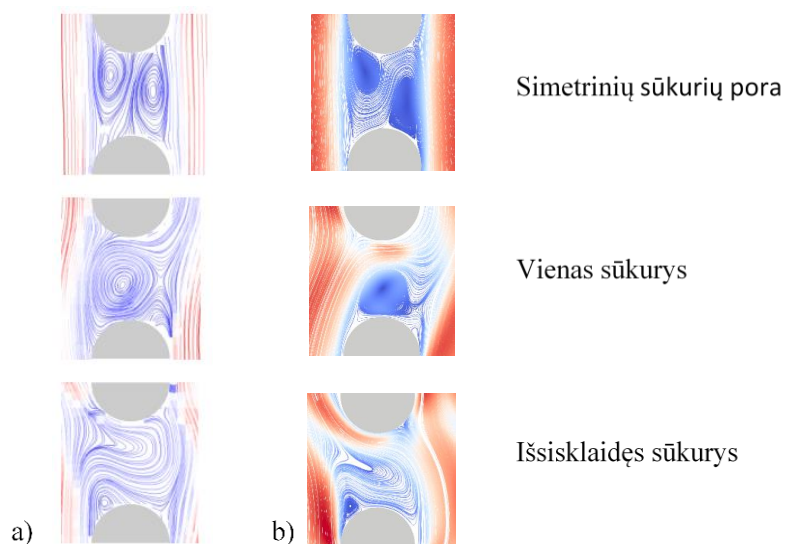
2.16–2.18 pav. atvaizduotos srauto linijos, lyginamos su eksperimentiniais duomenimis. Tiek kanalo pradžioje (žr. 2.16 pav.), tiek viduryje (žr. 2.17 pav.) esančios struktūros atitinka eksperimentą. Kanalo antrojoje dalyje taip pat sumodeliuojamos analogiškos eksperimente gautoms tekėjimo struktūroms (žr. 2.18 pav.).



2.16 pav. Kanalo pradžios srauto linijos ($Re_d = 250$) a) eksperimentas [69]; b) modeliavimas



2.17 pav. Kanalo vidurio srauto linijos ($Re_d = 250$) a) eksperimentas [69]; b) modeliavimas



2.18 pav. Sraute stebimos skirtingos sūkurių struktūros a) eksperimentas [69]; b) modeliavimas

Validacinių skaičiavimų rezultatai leidžia teigti, kad su pasirinktais parametrais ir turbulencijos modeliu galima sumodeliuoti eksperimentą pakankamai gerai, atskiriant tiek laminarinį, tiek turbulentinį režimus. Todėl jais galima atlikti mikrokanalų optimizavimą, keičiant kliūčių formą ir išdėstymą.

3. Rezultatai

Norint ištirti kliūčių formos ir išdėstymo įtaką tekėjimui mikrokanale buvo pasirinkti keli skirtingi variantai cilindro ir elipsės formos kliūtims. Jos pavaizduotos atitinkamai 3–4 bei 5–6 prieduose ir aprašytos 3.1 lentelėje. Būtent tokie tipiniai atvejai buvo pasirinkti norint ištirti kliūties skersmens ar ilgosios / trumposios ašies ir atstumo tarp kliūčių bei išdėstymo įtaką. Atvejų pavadinimai sudaryti iš jų savybių – I (linijinis) / S (šachmatinis) žymi išdėstymą, *D* žymi skersmenį, *P* žymi atstumus tarp kliūčių, tiek *x* (tekėjimo), tiek *y* (statmena tekėjimui) kryptimis.

3.1 lentelė. Ištirtų mikrokanalų konfigūracijos

		Kliūties skersmuo, [μm]	Atstumas tarp kliūčių centrų <i>x</i> kryptimi, [μm]	Atstumas tarp kliūčių centrų <i>y</i> kryptimi, [μm]	Kliūčių skaičius <i>x</i> kryptimi	
Cilindrai	I-D100-Px200-Py200	100	200	200	50	
	I-D90-Px200-Py200	90	200	200	50	
	I-D110-Px200-Py200	110	200	200	50	
	I-D100-Px400-Py200	100	400	200	25	
	I-D100-Px200-Py300	100	200	300	50	
	S-D100-Px200-Py200	100	200	200	50	
	S-D90-Px200-Py200	90	200	200	50	
	S-D110-Px200-Py200	110	200	200	50	
	S-D100-Px400-Py200	100	400	200	25	
	S-D100-Px200-Py300	100	200	300	50	
	S-D100-Px400-Py100	100	400	100	25	
		x kryptimi y kryptimi				
Elipsės	I-Dx100-Dy80-Px200-Py160	100	80	200	160	50
	I-Dx100-Dy60-Px200-Py140	100	60	200	140	50
	I-Dx100-Dy40-Px200-Py120	100	40	200	120	50
	I-Dx100-Dy40-Px200-Py60	100	40	200	60	50
	I-Dx80-Dy100-Px200-Py200	80	100	200	200	50
	S-Dx100-Dy80-Px200-Py160	100	80	200	160	50
	S-Dx100-Dy60-Px200-Py140	100	60	200	140	50
	S-Dx100-Dy40-Px200-Py120	100	40	200	120	50
	S-Dx100-Dy40-Px200-Py60	100	40	200	60	50
	S-Dx80-Dy100-Px200-Py200	80	100	200	200	50

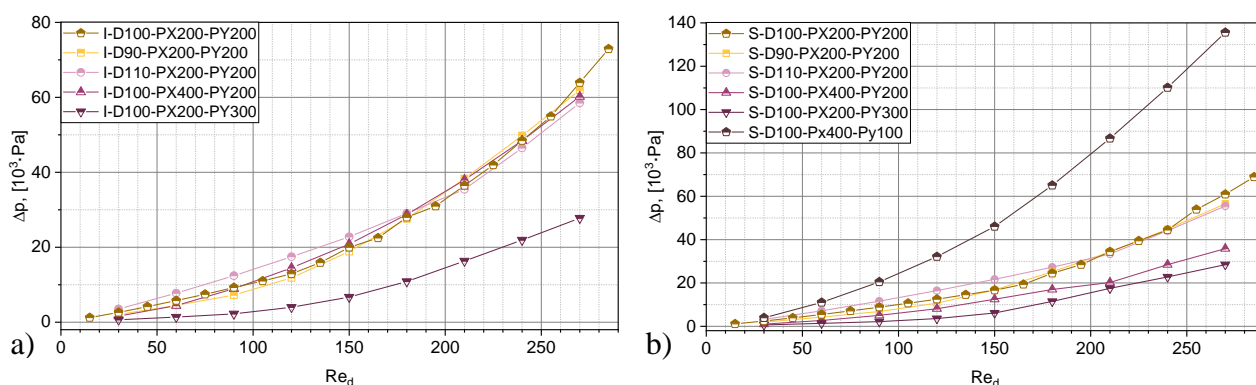
Kiekvienu nagrinėtu atveju buvo vertinamas slėgio kritimas kanale ir identifikuojama tėkmės nestabilumo pradžios vieta. Pastarajam tikslui kanalas suskirstytas į 4 sritis, aprašytas 3.2 lentelėje. Rezultatai, nurodantys kurioje srityje prasideda tekėjimo nestabilumas, pateikti 3.3–3.4 lentelėse ir aprašyti toliau.

3.2 lentelė. Kanalo sričių aprašymas

	Kliūtys	Atstumai
I – Pradžia	Nuo 1 iki 10	Nuo 0,001 mm iki 0,003 mm
II – Vidurys 1	Nuo 10 iki 25	Nuo 0,003 mm iki 0,006 mm
III – Vidurys 2	Nuo 25 iki 40	Nuo 0,006 mm iki 0,009 mm
IV – Pabaiga	Nuo 40 iki 50	Nuo 0,009 mm iki 0,011 mm

3.1. Cilindro formos kliūtys

Slėgio perkryčio priklausomybės nuo Re_d grafikai pateikti 3.1 pav. Matyti, kad visais atvejais ji laipsniškai didėja. Tačiau D100-Px200-Py300 atveju slėgio perkrytis išskirtinai mažesnis, palyginti su kitais. Kitas reikšmingas skirtumas matomas D100-Px400-Py200 atveju, kurio šachmatinio išdėstymo slėgio nuostoliai gerokai mažesni nei linijinis.



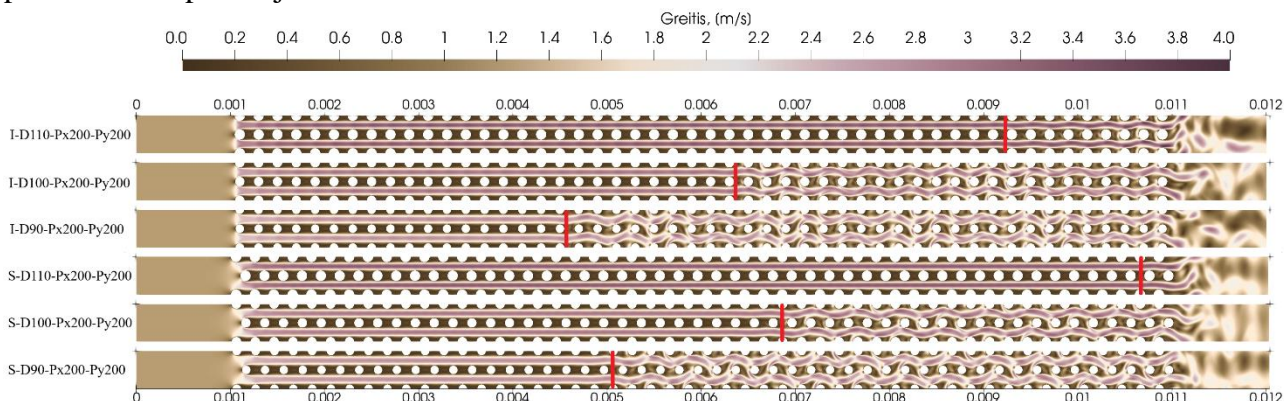
3.1 pav. Slėgio perkrytis, kai cilindro formos kliūčių išdėstymas a) linijinis; b) šachmatinis

3.3 lentelė. Tekėjimo nestabilumo pasireiškimo vieta mikrokanale su cilindro formos kliūtimis

	Re_d	30	60	90	120	150	180	210	240	270
I-D100-Px200-Py200	-	-	-	-	-	III	III	III	II	II
I-D90-Px200-Py200	-	-	-	-	III	III	II	II	II	II
I-D110-Px200-Py200	-	-	-	-	-	-	IV	IV	III	III
I-D100-Px400-Py200	-	II	I	I	I	I	I	I	I	I
I-D100-Px200-Py300	-	-	-	-	III	III	I	I	I	I
S-D100-Px200-Py200	-	-	-	-	-	IV	III	III	III	II
S-D90-Px200-Py200	-	-	-	-	III	III	II	II	II	II
S-D110-Px200-Py200	-	-	-	-	-	-	-	IV	III	III
S-D100-Px400-Py200	-	-	III	II	I	I	I	I	I	I
S-D100-Px200-Py300	-	-	-	-	III	III	I	I	I	I
S-D100-Px400-Py100	-	-	-	-	-	IV	III	II	II	II

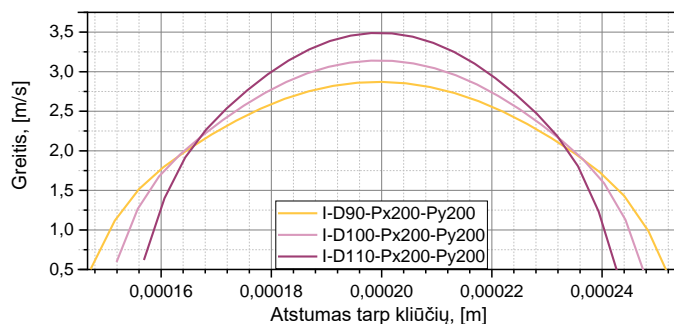
3.1.1. Cilindro skersmens įtaka

Palyginami šeši atvejai su trimis skirtingais skersmenimis (D90, D100 ir D110), jų greičio laukai pateikti 3.2 pav. Kol tekėjimo režimas laminarinis ($Re_d \lesssim 200$) esant bet kokiam išdėstymui didesnis kliūčių skersmuo lemia didesnę slėgio perkrytį. Tačiau tekėjimo režimui pereinant į turbulentinį situacija tampa priešinga. Tai todėl, kad didesnio skersmens kliūtys geriau stabilizuoja tekėjimą ir didėjant Re_d jis išlieka tolygesnis. Nestabilumus slopina siauri pratekėjimai, kur sukuriama mažiau erdvės susijungti ir didėti. Tačiau potencialiai pranašesnis didesnis kliūčių skersmuo taip pat sukuria trumpesnes platesnes ir, deja, stabilesnės recirkuliacines stagnacijos sritis už kliūčių. Šilumos pernešimas iš šių sričių labai prastas ir papildomas didesnio skersmens kliūčių šilumos perdavimo plotas tai kompensuoja tik dalinai.



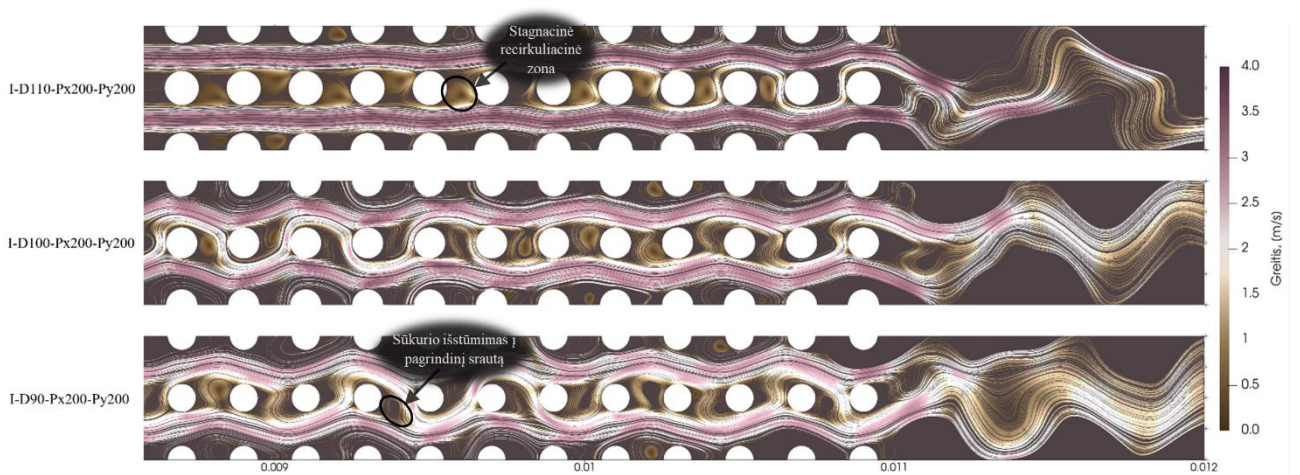
3.2 pav. Greičio lauko ir nestabilumo pradžios vietos priklausomybė nuo cilindro formos kliūčių skersmens, kai $Re_d = 210$

Esant mažesniai pratekėjimo tarp kliūčių skerspjuviui maksimalus tekėjimo greitis didesnis ir tėkmė inertiškesnė. Tačiau greičio gradientai ir sukuriama generuojanti šlytis taip pat didesni (žr. 3.3 pav.).



3.3 pav. Greičio profilis tarp dviejų 10 eilės kliūčių, kai $Re_d = 210$

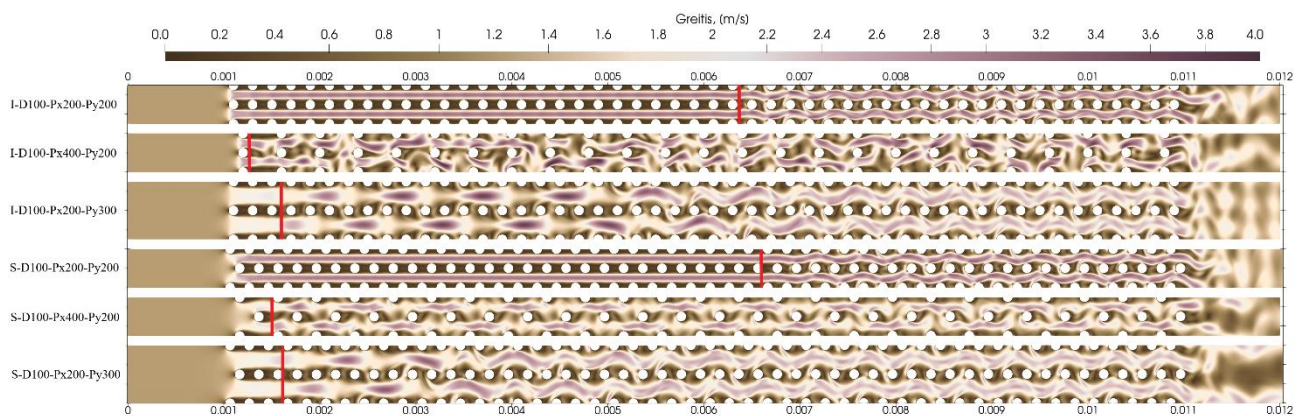
Iš srauto linijų kanalų pabaigoje matyti (žr. 3.4 pav.), kad tekėjimas pro mažo skersmens kliūtis mažiau stabilus. Už kliūčių nėra recirkuliacinių stagnacijos sričių, nes susidarantys sukuriama išmetami į pagrindinę tėkmę, kur sukuria sužadintus regionus. Didinant Re_d , jie pasiekia kitas pasroviui esančias kliūtis ir su jomis taip sąveikauja. Visa tai pasireiškia tuo, kad tekėjimo pro mažesnio skersmens kliūtis perkrytis, didėjant Re_d , auga sparčiau (žr. 3.1 pav.).



3.4 pav. Srauto linijos kanalo pabaigoje, kai $Re_d = 210$

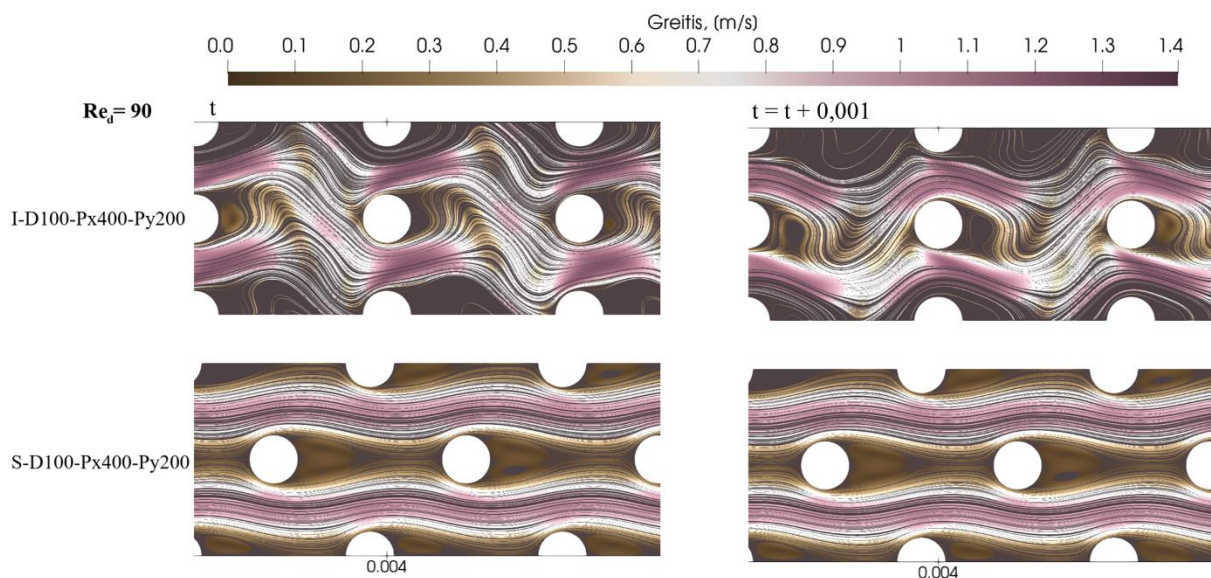
3.1.2. Atstumo tarp cilindro formos kliūčių įtaka

Nagrinėjami septyni atvejai su skirtingo žingsnio tarp kliūčių deriniai (Px200, Px400, Py200, Py300, Py100). Jų greičio laukai pateikti 3.5 pav.



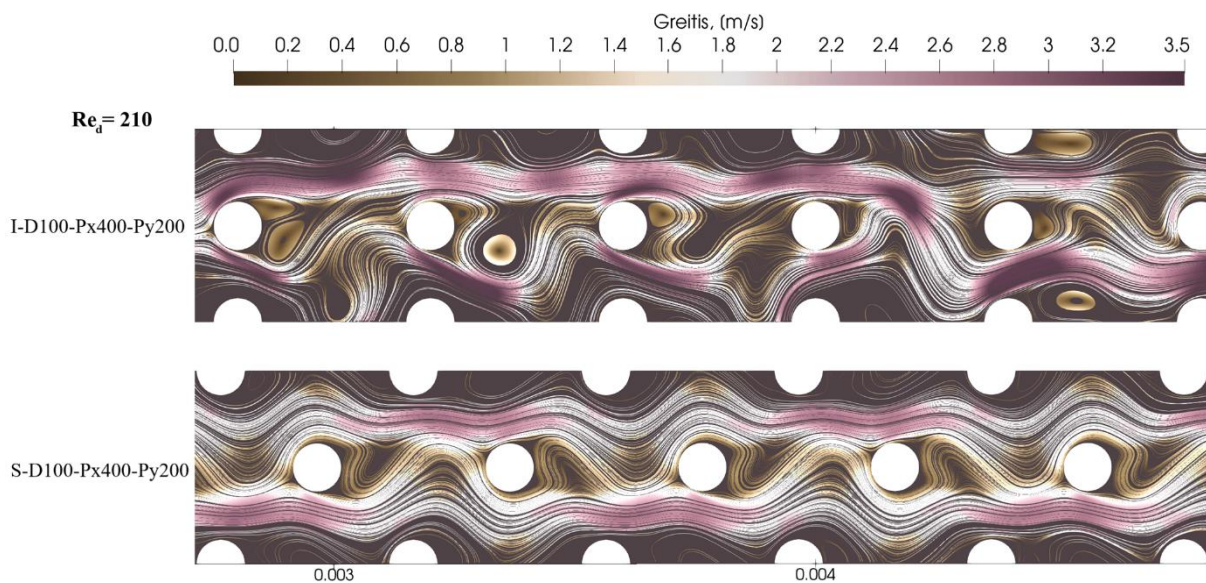
3.5 pav. Greičio ir nestabilumo pradžių priklausomybė nuo cilindro formos kliūčių žingsnio, kai $Re_d = 210$

Mažiausiai stabilus tekėjimas gaunamas D100-Px400-Py200 atveju (žr. 3.3 lentelė). Įdomu tai, kad jo slėgio perkryčio priklausomybė nuo Re_d niekuo neypatinga esant linijiniam išdėstymui, bet esant šachmatiniam išdėstymui kreivės nuolydis gerokai krenta (žr. 3.1 pav.). Linijinis ar šachmatinis kliūčių išdėstymas, šiuo atveju, lemia labai skirtingos tekėjimo struktūros susidarymą, pavaizduotą 3.6 pav. Šiuo linijinio išdėstymo atveju nestabilumas prasideda iškart kanalo viduryje ir slenka priekin jau nuo $Re_d = 60$ (3.3 lentelė I-D100-Px400-Py200). Esant nedideliam Re_d tėkmė svyruoja, už kliūčių susidarantys sūkuriai periodiškai išmetami tai į vieną, tai į kitą pusę (žr. 3.6 pav.). Šachmatinio išdėstymo atveju, kai $Re_d = 90$, už kliūčių susidarančios recirkuliacinės sritys stabilizuojamos gretimomis kliūtėmis. Todėl jos lengviau paveikiamos esant didesniai atstumui tarp kliūčių pasroviui (Px). Tą patį galima teigti ir linijinio išdėstymo atveju. Nes kol tekėjimas visame kanale stabilus ($Re_d = 30, 60$), už kliūčių susidaro du stacionarūs sūkuriai, kurie nesiekia pasroviui esančių kliūčių. Bet pratekamo skerspjuvio kitimas tėkmėje sukuria stiprius slėgio gradientus, kurie ją destabilizuoja. Taigi, galima daryti išvadą, kad periodinis skerspjuvio ploto kitimas tekėjimo režimui daro didesnę įtaką, nei tekėjimo kelio nukreipimas.



3.6 pav. Srauto linijos skirtingais laiko momentais, kai $Re_d = 90$

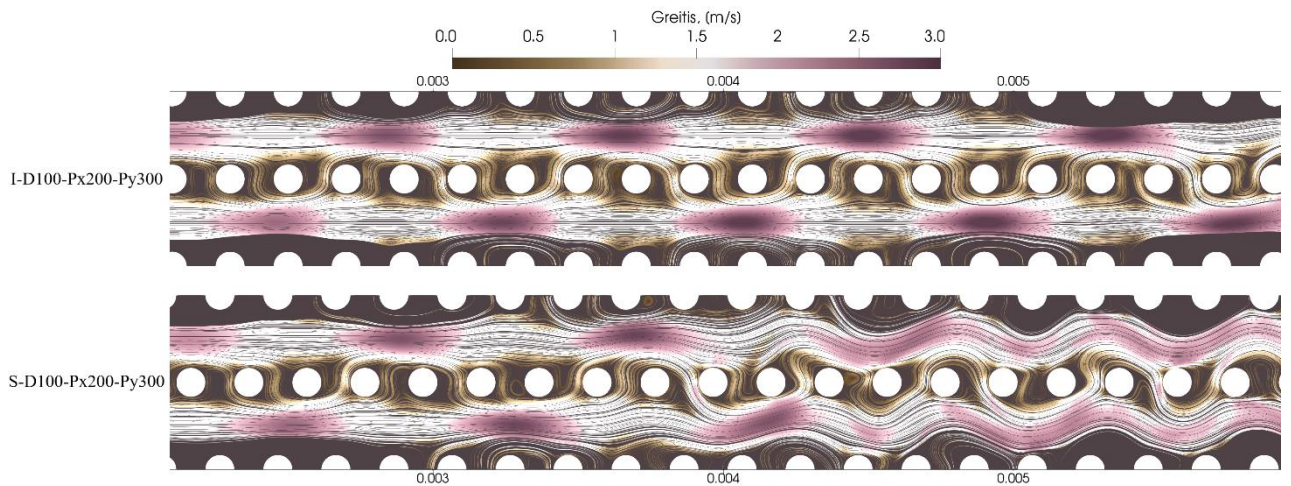
Šachmatinio išdėstymo atveju, net ir esant $Re_d = 210$, tekėjimo struktūra nėra chaotiška ir asinchroniška, kaip linijinio išdėstymo atveju (žr. 3.7 pav.). Už kliūčių susidarantys sūkuriai svyruoja ir visame kanale sukuria šachmatinį raštą.



3.7 pav. Srauto linijos, kai $Re_d = 210$

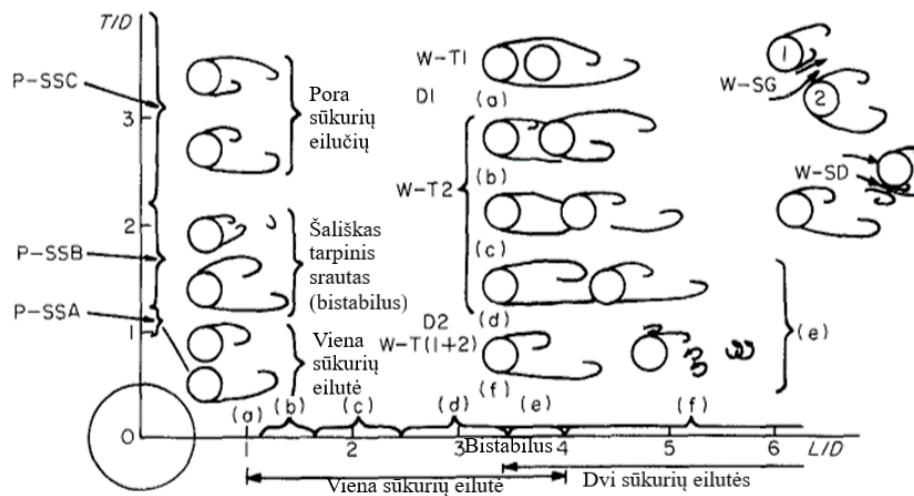
Išskirtinai mažas slėgio kritimas Py300 atveju (žr. 3.1 pav.), pirmiausia paaiškinamas mažesniu tėkmės užgriozdinimu. O recirkuliacinės sritys menkai prisideda prie slėgio perkryčio, nes yra mažos, dėl nedidelių atstumų tarp kliūčių.

Tekėjimas kliūčių masyve, dėl tėkmę veikiančių jėgų ir susidarančių sūkurių slinkimo, tampa labai sudėtingu. D100-Px200-Py300 atveju tekėjimo struktūra išskirtinė – pasireiškia sužadintų regionų interferencija. Sūkuriai iš tarpų už kliūčių išstumiami į pagrindinę tėkmę, kur dėl jų susidarę sužadinti regionai po du susijungia (žr. 3.8 pav.). Šio vietinio greičio „pliūpsniai“ juda, kol išsisklaido. Alfieri'is ir kt. [75] patvirtina, jog dviejų vienos krypties sūkurių jungimasis abiejose kliūčių eilėse yra galimas (jie tyrė tik vieną kliūčių eilę).



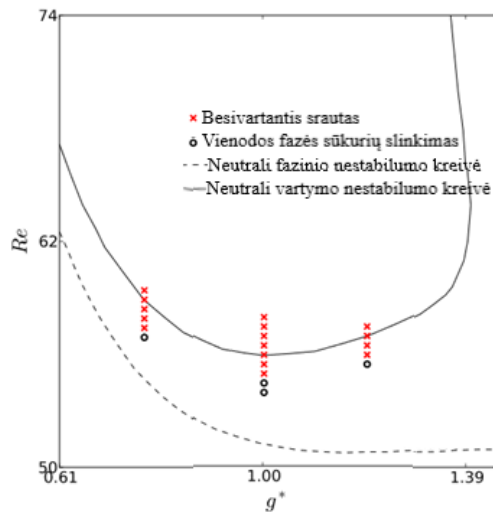
3.8 pav. Srauto linijos, kai $Re_d = 180$

Pagal Zdravkovich'iaus [76] išnagrinėtą įvairių kliūčių išdėstymą, šis – D100-Px200-Py300, atitinka $T/D = 3$ ir $L/D = 2$ (žr. 3.9 pav.). Tai rodo, kad nuo greta esančių cilindro atitrūksta vienodi, bet priešingos krypties, sūkuriai, t. y. kiekvienos gretimos eilės sūkurių slinkimas yra sinchronizuotas. Miau ir kt. [77] reiškiniį pavadino kaip besivartančia tėkme už plyšio (angl. *gap flow flopping*). Jis būdingas tik esant tam tikram atstumui tarp kliūčių, kai už jų susidarantys sūkuriai sąveikauja tarpusavyje.



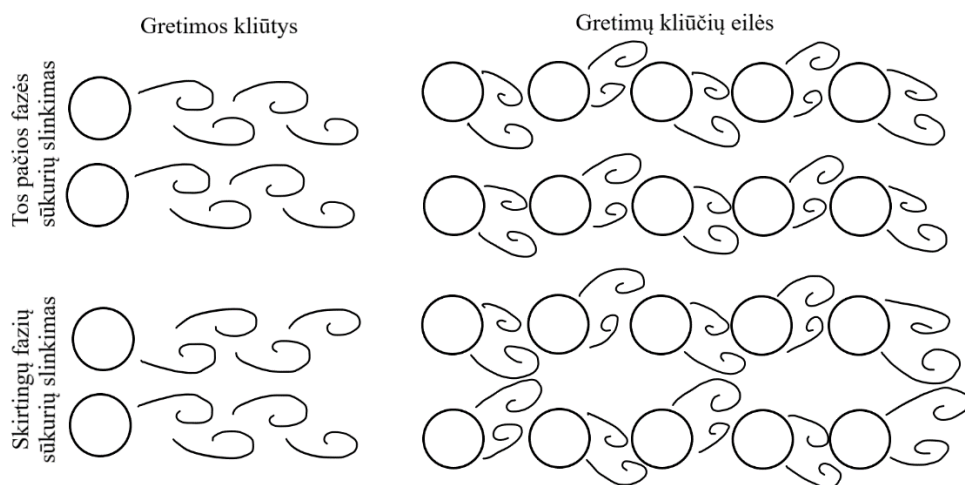
3.9 pav. Dviejų gretimų cilindro formos kliūčių kuriama tėkmės sūkurių interferencija: (a) pasienio zona; (b) kintamas prisijungimas; (c) kvazipastovus prisijungimas; (d) protarpinis sūkurių slinkimas; (e) netolydus šuolis; (f) dvilypė sūkurių eilutė [76]

Bai ir kt. [78] atliko tokio besivartančio sužadinto regiono struktūros stabilumo analizę. Tyrimas buvo gan paprastas. Jo rezultatai apibendrinti 3.10 pav. Nustatyta, kad sūkuringumas yra arba simetrinis, arba asimetrinis. D100-Px200-Py300 atveju, tekėjimas vyksta pro visą eilę kliūčių, o g^* vertė atitinka 2, kuri jau išeina už analizės ribų.



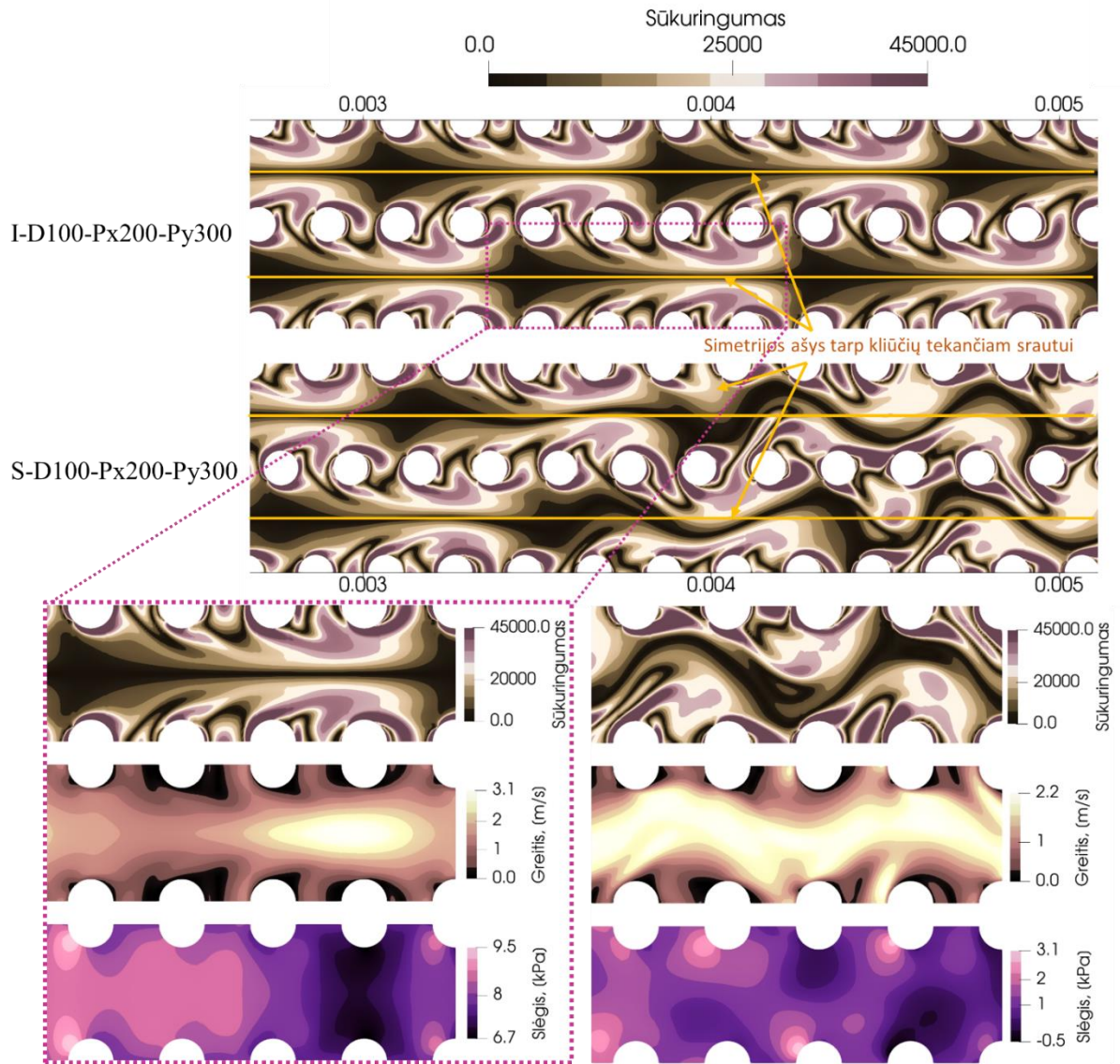
3.10 pav. Srauto struktūros modelių priklausomybė nuo Re ir g^* parametrų [78]

Nors aukščiau paminėti tyrimai nagrinėja tik poros kliūčių aptekėjimą, bet iš jų galima daryti išvadą, kad gretimų kliūčių eilių generuojamų sukurių slinkimas gali vykti tiek sutampančioje, tiek ir priešingoje (skirtumas per π) fazėse, kaip parodyta 3.11 pav. Šiuo atveju už kiekvienos kliūtis susidaręs sužadintas regionas yra kitos fazės, nei šalia esančios kliūtis regionas, todėl jų sąveika yra konstruktyvi, įvykus interferencijai yra sustiprinama greičio dedamoji. Tai patvirtina ir sukuringumo laukas, parodytas 3.12 pav. a), kur kanalų ašių atžvilgiu matoma veidrodinė arba priešingos fazės tekėjimo struktūrų simetrija.



3.11 pav. Sukurių slinkimo schema

3.12 pav. b) ir c) palyginami sukuringumo, greičio ir slėgio laukai kanalo pradžioje ir pabaigoje. Kanalo pradžioje slenka priešingų fazių sukuriai, dėl to įvyksta konstruktyvi interferencija ir susidaro pagreitinimo zonos. Jų didžiausias greitis yra net 40 % didesnis nei kanalo pabaigoje (kur tėkmė trikdančiais sukuriai nebeinterferuoja). Slėgio laukai atitinkamai konstruktyviai arba destruktvyviai sąveikauja.

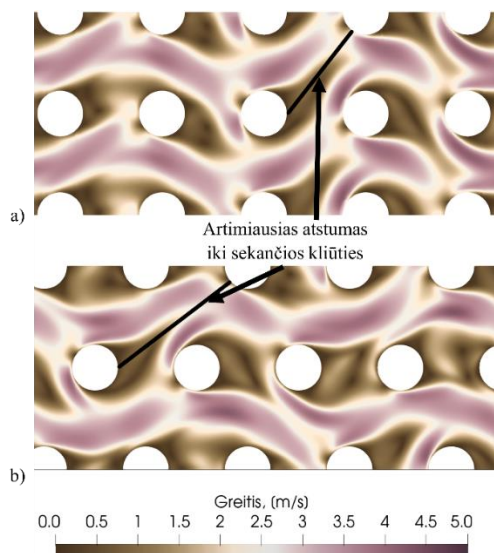


3.12 pav. Sūkuriumo, greičio ir slėgio laukai, kai $Re_d = 180$, a) sūkuriumo kanalo pradžioje priklausomybė nuo išdėstymo rašto; b) laukai nurodytoje srityje (prasideda nuo 0,034 m); c) laukai srityje, kuri prasideda nuo 0,094 m

Gauti rezultatai leidžia teigti, kad esant mažam pasroviui išdėstytų kliūčių žingsniui Px , recirkuliacinės stagnacijos sritys susidaryti negali. Kanalo pradžioje jungiantis priešingos krypties sūkuriams vyksta jais sužadintų regionų interferencija, kuri pasroviui pasikeičia į įprastą sutampančios fazės sūkurių slinkimą. Didelis Px žingsnis visai neriboja recirkuliacinių sričių ir jos yra mažiau stabilios, nes pasiekia ir neprisijungia prie pasroviui esančios kliūtis.

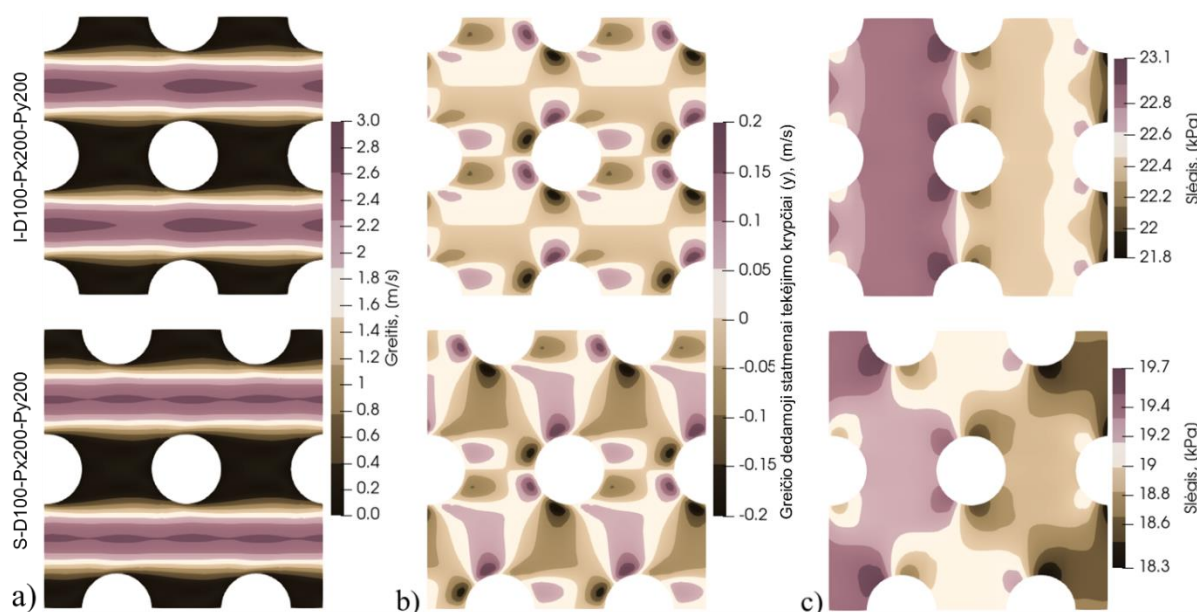
3.1.3. Linijinio ir šachmatinio kliūčių išdėstymo rašto įtaka

Šachmatinis kliūčių išdėstymas stipriau trikdo tekėjimą versdamas jį vingiuoti, labiau nei linijinis. Tačiau, kartu ir geriau stabilizuoja (žr. 3.3 lentelė), todėl slėgio perkrytis mažesnis (žr. 3.1 pav.). Tai todėl, kad recirkuliacinei sričiai atitrūkus, nuo pasroviui esančios kliūtis pasiekti gretimos eilės kliūtį yra toliau (žr. 3.13 pav.).



3.13 pav. Artimiausias atstumas iki kitos eilės kliūtis priklausomai nuo išdėstymo: a) linijinis, b) šachmatinis

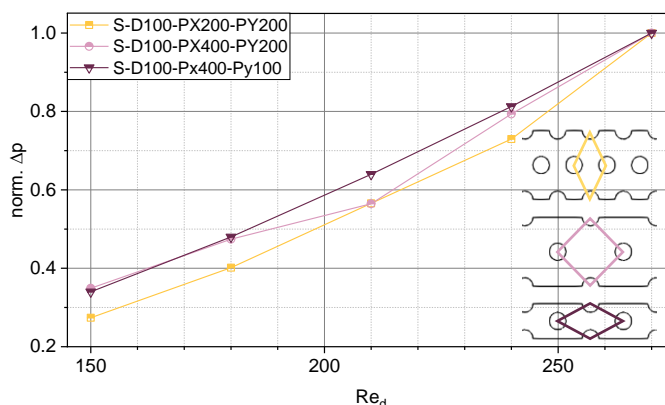
Šachmatinio išdėstymo atveju nėra nei konstruktyvios, nei destruktivos laukų interferencijos, todėl vingiuojanti tėkmė išlaiko tolygų greitį. Tuo tarpu esant linijiniam išdėstymui slėgio laukų sritys, susidariusios tiek už cilindrinės kliūtis pusiaujo, tiek prieš jį, susijungia ir silpnina / stiprina slėgio sritį. Žemo slėgio sričių dydis yra sumažėjęs (mažesni ir silpnesni slėgio plotai, nei atitinkami šachmatinio išdėstymo), o tai rodo, jog susidarę slėgio laukai yra susilpnėję, dėl ko greitis išauga ir tekėjimo nestabilumą tikimybė padidėja. Greičio vietiniai padidėjimai linijinio išdėstymo atveju, matomi 3.14 pav. a), kai šachmatiniu atveju didžiausio greičio sritis gerokai tolygesnė. Statmena pagrindinei tekėjimo kryptčiai greičio dedamoji (žr. 3.14 pav. b)) rodo tėkmės vingiavimo amplitudę. Šachmatinis išdėstymas jam palankus – greičio sritys tęsiasi nuo vienos kliūtis link kitos. Tuo tarpu linijinio išdėstymo atveju šios sritys suskaidytos, tai destabilizuoja tėkmę ir palengvina turbulencijos atsiradimą.



3.14 pav. Laukai apie 10-ą kliūtį, kai $Re_d = 180$: a) greičio; b) greičio dedamosios statmenai tekėjimo kryptčiai (y); c) slėgio

Šachmatinis ar linijinis kliūčių išdėstymas ne visais atvejais reikšmingai pakeičia tekėjimo struktūrą ir slėgio kritimą. Pavyzdžiui, D100-Px200-Py300 (žr. 3.3 lentelė) tiek slėgio, tiek nestabilumų pradžia panašūs abiem išdėstymo atvejais.

Kita vertus, šachmatinio išdėstymo raštas gali būti suspausto (Px200-Py200), kvadratinio (Px400-Py200) ir išėsto (Px400-Py100) rombo formos. Kvadratinio rombo atveju gaunamas mažiausias slėgio perkrytis (žr. 3.1 pav. b). Tačiau, normalizavus slėgio perkrytį (žr. 3.15 pav.), matyti, kad, priklausomai nuo Re_d sparčiausiai slėgio perkrytis didėja esant suspausto rombo konfigūracijai. Mažesnius išėsto ir kvadratinio rombo formos išdėstymo slėgio perkryčio nuolydžius lemia mažiausias tekėjimo jais stabilumas (žr. 3.3 lentelė).

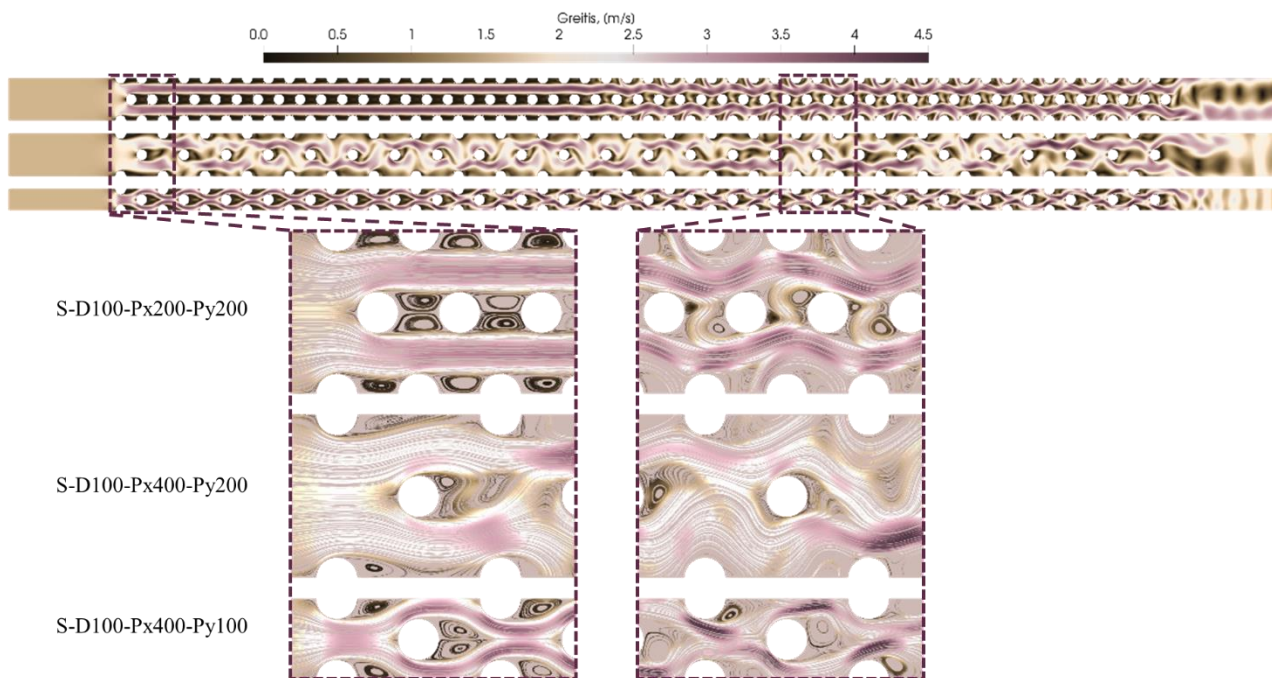


3.15 pav. Normalizuoto slėgio perkryčio priklausomybė nuo Re_d esant skirtingam šachmatiniam kliūčių išdėstymui

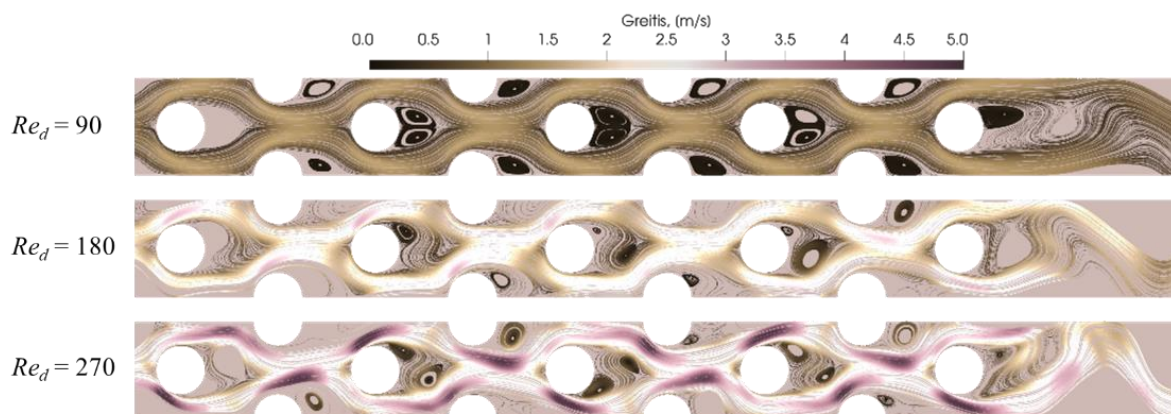
Pagrindinis skirtumas tarp skirtingų šachmatinio išdėstymo atvejų yra recirkuliacinės sritys (žr. 3.16 pav.). Kvadratinio rombo išdėstymo atveju tekėjimas tampa nestabilus visame kanale esant mažiausiam Re_d (žr. 3.3 lentelė). Recirkuliacinė sritis yra nukreipiama į pagrindinę tėkmę, todėl suintensyvėja maišymasis, o stovintys sukūriai už kliūčių negali susiformuoti (žr. 3.16 pav.). Mažiausią kvadratinio rombo šachmatinio išdėstymo slėgio perkrytį galima paaikškinti dvigubai mažesniu kliūčių skaičiumi tėkmės kryptimi.

Tekėjimo suspausto rombo konfigūracija srauto struktūra už kliūčių yra panaši tiek laminariniu, tiek turbulentinu atveju. Laminariniu atveju recirkuliacinės sritys sudarytos iš poros stagnacinių sukūrių. Srautui tapus nestabiliu, dėl sukūrių slinkimo, pora pirminių sukūrių virsta vienu sukuriu su antrine recirkuliacija. Esant suspausto rombo konfigūracijai sukūriai didesni, nei išėsto, ir maišymasis bei šilumos perdavimas galėtų būti intensyvesni, tačiau recirkuliacinės sritys prisijungusios prie pasroviui gretimų kliūčių, t. y. stagnacinės.

Tekėjimas išėsto rombo konfigūracija turi tokias pat tendencijas, kaip ir suspausto rombo. Nors recirkuliacinė sritis nesąveikauja su tiesiai pasroviui esančia kliūtimi, tačiau ją riboja siauras pratekėjimo tarpas. 3.17 pav. matyti, kad esant skirtingam Re_d recirkuliacinių sričių ilgis nekinta. Tai gali būti laikoma pagrindiniu šios konfigūracijos privalumu. Tikėtina, kad dar padidinus debitą, recirkuliacinės sritys išliks to paties ilgio, tačiau maišymas ir sukūrių slinkimas bus intensyvesnis. Šią prielaidą galima patvirtinti mažiausiu slėgio perkryčio nuolydžiu (žr. 3.15 pav.)



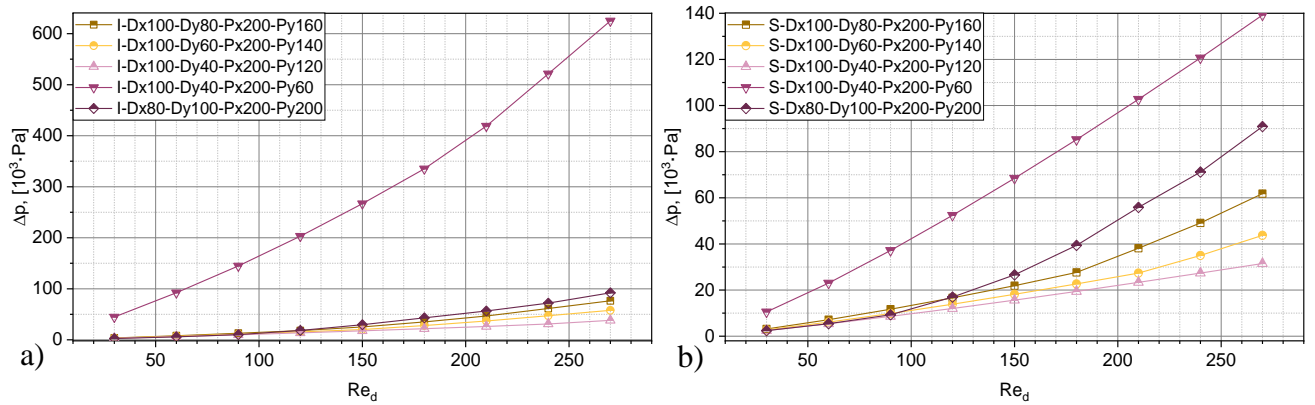
3.16 pav. Srauto linijos ir greičio laukas esant skirtingam šachmatiniam išdėstymui, kai $Re_d = 270$



3.17 pav. Srauto linijos ir greičio laukas S-D100-Px400-Py100, esant skirtingiems Re_d

3.2. Elipsės formos kliūtys

3.18 pav. pateikta tekėjimo slėgio perkryčio priklausomybė nuo Re_d , o 3.4 lentelėje – nestabilumo pradžios vieta. Dx100-Dy40-Px-200-Py60 atvejis išskirtinis daug didesniu slėgio perkryčiu. Linijiniu atveju, tai dėl staigios tėkmės nestabilumo pradžios. Tuo tarpu šachmatiniu atveju, nors ir su didžiausiais slėgio nuostoliais, tėkmė stabilizuojama visame tirtame Re_d intervale. Palyginus su cilindro, elipsinės formos kliūtys, daugeliu nagrinėtų atvejų, labai gerai stabilizuoja tekėjimą mikrokanalu.



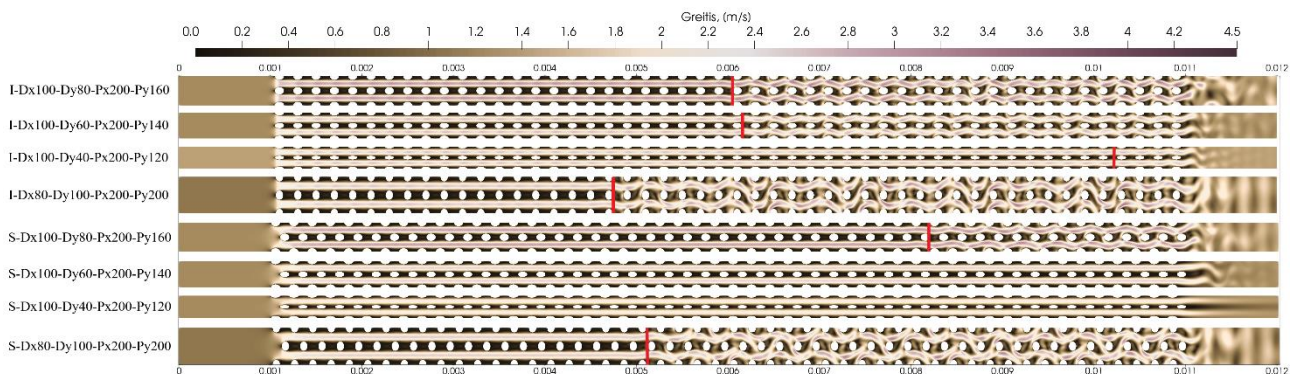
3.18 pav. Slėgio perkrytis, kai elipsės formos kliūčių išdėstymas a) linijinis; b) šachmatinis

3.4 lentelė. Tekėjimo nestabilumo pasireiškimo vieta mikrokanale su elipsės formos kliūtėmis

	Re_d	30	60	90	120	150	180	210	240	270
I-Dx100-Dy80-Px200-Py160		-	-	-	-	IV	III	III	II	II
I-Dx100-Dy60-Px200-Py140		-	-	-	-	-	III	III	II	II
I-Dx100-Dy40-Px200-Py120		-	-	-	-	-	-	IV	IV	III
I-Dx100-Dy40-Px200-Py60		-	-	-	-	-	-	I	I	I
I-Dx80-Dy100-Px200-Py200		-	-	IV	III	II	II	II	II	II
S-Dx100-Dy80-Px200-Py160		-	-	-	-	-	-	III	III	III
S-Dx100-Dy60-Px200-Py140		-	-	-	-	-	-	-	III	III
S-Dx100-Dy40-Px200-Py120		-	-	-	-	-	-	-	-	-
S-Dx100-Dy40-Px200-Py60		-	-	-	-	-	-	-	-	-
S-Dx80-Dy100-Px200-Py200		-	-	IV	III	II	II	II	II	II

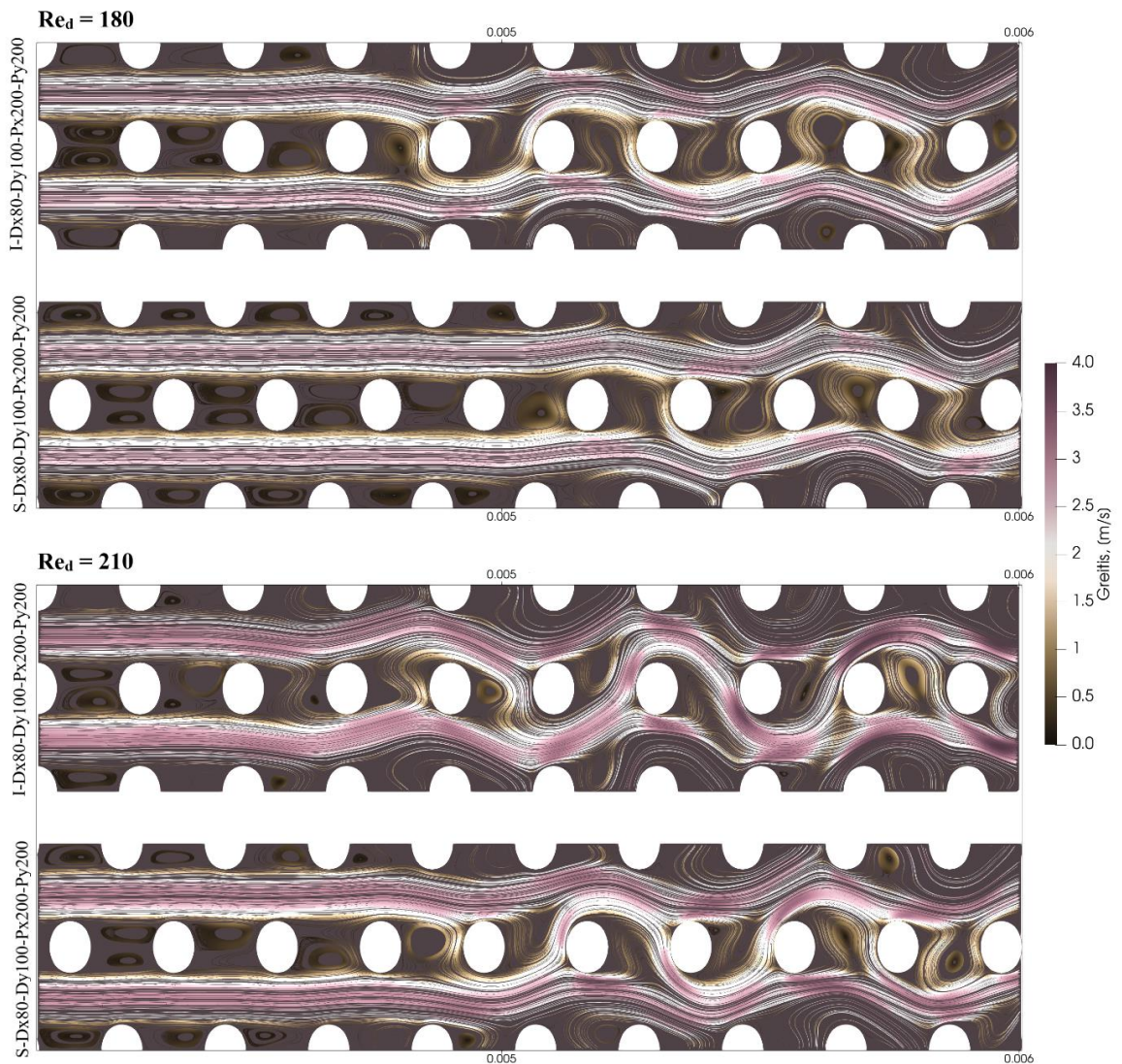
3.2.1. Elipsės ilgojo / trumpojo pusašio įtaka

Palyginami aštuoni atvejai su skirtingais elipsės ilgoju / trumpoju pusašiais (Dx100-Dy80, Dx100-Dy60, Dx100-Dy40(-Px200-Py120) ir Dx80-Dy100). Elipsių dydžio tyrime 6-iais iš 8-ių atvejais buvo išlaikoma tokia pati ilgoji ašis – Dx100, kitais dviem atvejais buvo pasirinkta tekėjimo kryptiai statmena elipsė ($Dx < Dy$). Mažinant elipsių trumpąją ašį (Dy) atstumai tarp kliūčių parinkti atitinkamai sumažinti. Nagrinėjamų atvejų greičio laukai pateikti 3.19 pav.



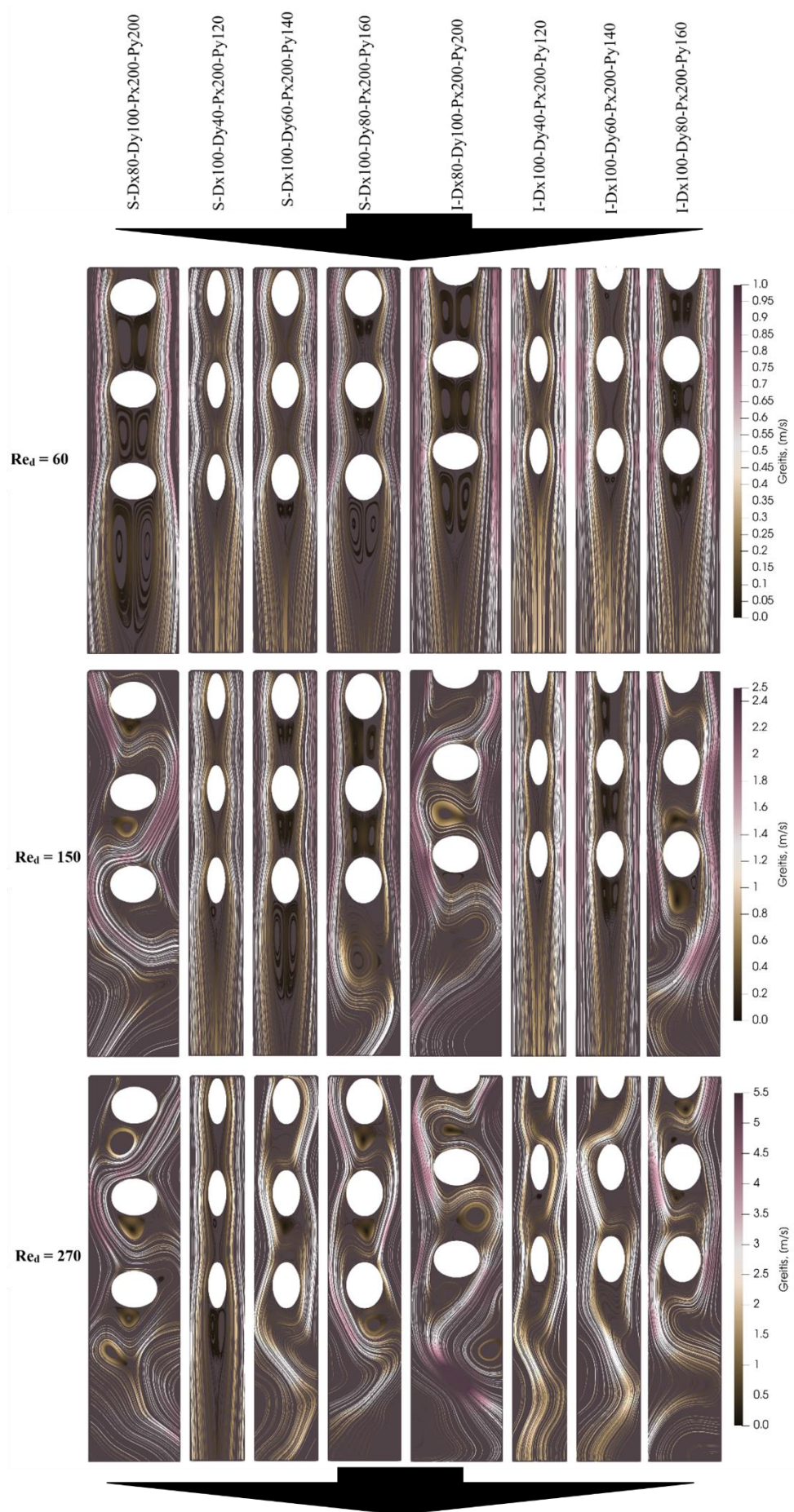
3.19 pav. Greičio lauko ir nestabilumo pradžios vietos priklausomybė nuo elipsės formos kliūčių ilgojo / trumpojo pusašio, kai $Re_d = 210$

Kitą po Dx100-Dy40-Px200-Py60 atvejo, didžiausią slėgio perkrytį turi Dx80-Dy100. Skersos kliūtys ne tik sukelia didesnius slėgio nuostolius bet ir labiau destabilizuoja tėkmę. Šio atvejo srauto linijos pateiktos 3.20 pav. Matyti, kad už kliūčių susidaro du stacionarūs sūkuriai, kurie esant didesniai Re_d yra išsklaidomi, taigi srautas nebeužsistovi.



3.20 pav. Srauto linijos Dx80-Dy100 atveju, kai $Re_d = 180$ ir 210

Kanalo pabaigoje susidarančių recirkuliacinių sričių priklausomybę nuo Re_d parodo 3.21 pav. pateiktos srauto linijos.



3.21 pav. Srauto linijų kanalo pabaigoje priklausomybė nuo kliūčių, kai $Re_d = 60, 150$ ir 270

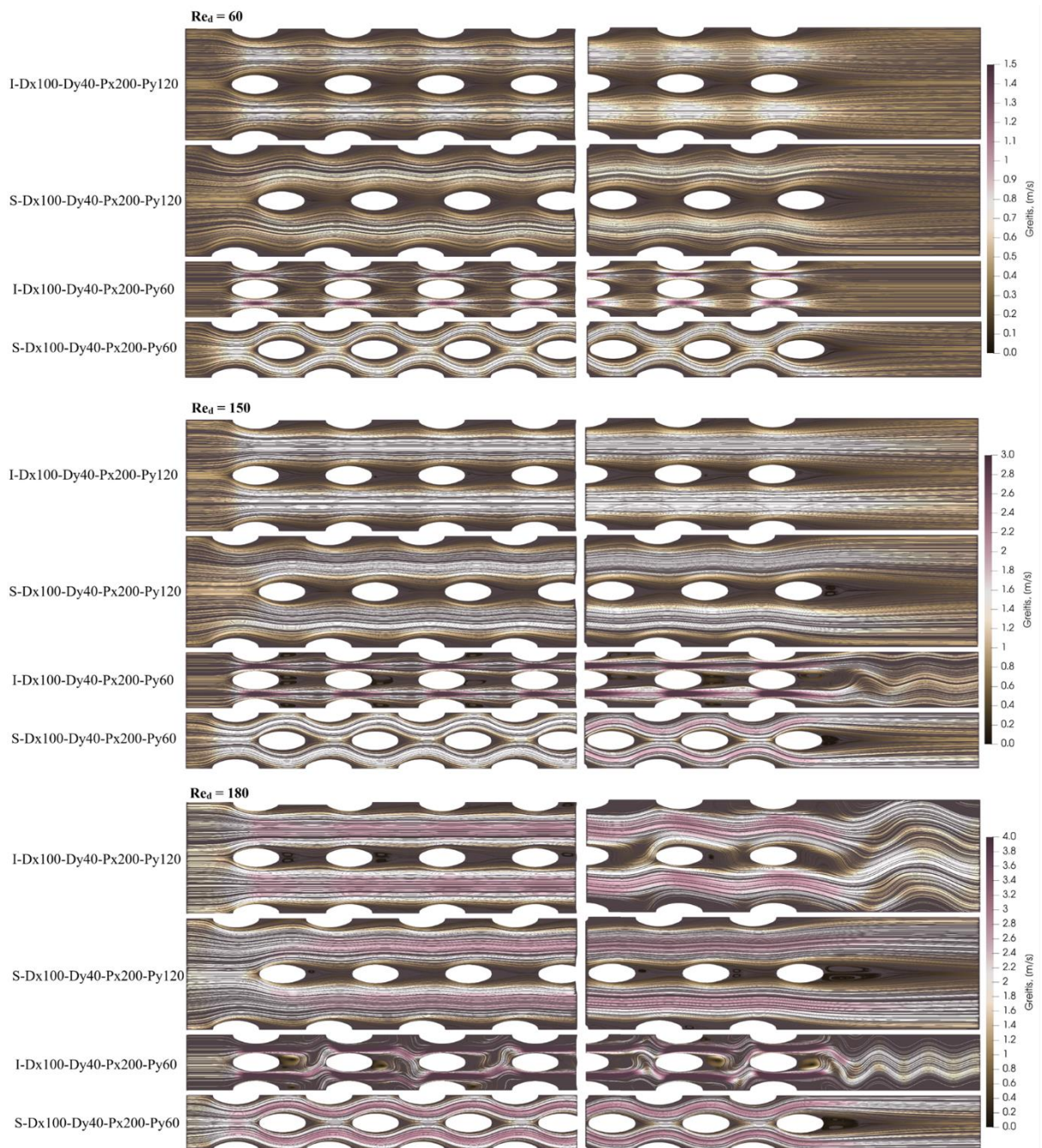
Prieš tai aptarto atvejo – Dx80-Dy100, esant mažiausiam Re_d , susiformavę sūkuriai yra ribojami pasroviui esančių kliūčių. Tuo tarpu kitais išdėstymo atvejais, susidarę sūkuriai yra neapriboti arba jų visai nėra. Didėjant Re_d sūkuriai auga, jie arba prisijungia prie pasroviui esančios kliūtis, arba dėl nestabilios tėkmės yra išstumiami.

Dx100-Dy40(-Px200-Py120) atvejis išskirtinis ne tik dideliu slėgio perkryčiu, bet ir recirkuliacinių sričių mažumu arba jų nebuvimu. Linijiniu atveju susidaro itin maži sūkuriai už kliūčių, kai $Re_d = 150$, bet greitai tekėjimas tampa nestabilus, todėl jie yra išsklaidomi. Esant šachmatiniam išdėstymui recirkuliacinės sritys susidaro esant didesniai Re_d nei linijiniu atveju, tėkmė visomis tirtomis Re_d reikšmėmis yra stabili.

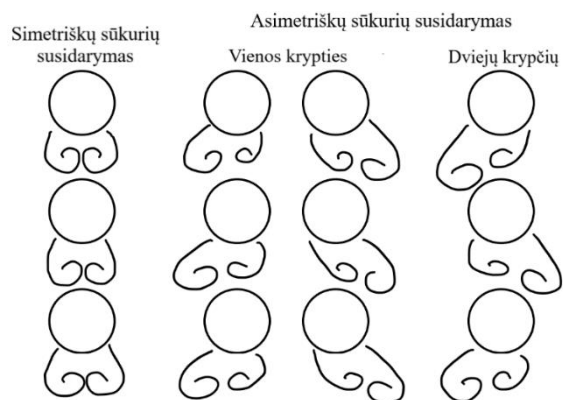
Palyginus visus tirtus atvejus, mažesni sūkuriai tarp kliūčių gauti šachmatinio išdėstymo atveju. Vis dėlto, sūkuriai susidarantys už paskutinės kliūtis yra mažesni esant linijiniam išdėstymui. Taip pat kaip ir cilindrinų kliūčių masyve tėkmė, tekanti tarp šachmatiškai išdėstytų elipsių, yra stabilesnė. To priežastys analogiškos išnagrinėtoms 3.1.3 skyrelyje.

3.2.2. Atstumo tarp elipsės formos kliūčių įtaka

Nagrinėjami keturi atvejai: Px200-Py120, Px200-Py60. Jie skiriasi tik tarpu tarp kliūčių statmenai tekėjimo kryptčiai, Py . Dviem atvejais šis tarpas lygus 120 μm , o kitais dviem atvejais jis dvigubai mažesnis – 60 μm . Pastaroji geometrija turėtų labiau veikti tėkmę, ją nukreipdama pagal elipses, dėl mažesnio pratekamo ploto, tai pavaizduota 3.22 pav. Tėkmė, palyginus su cilindro formos kliūtimis, stabilesnė visais elipsės formos kliūčių išdėstymo atvejais. Už elipsės formos kliūčių susidaro mažos recirkuliacinės stagnacijos sritys, tačiau linijinio išdėstymo atveju, jis didesnis nei šachmatinio visais atvejais (žr. 3.22 pav.). Taip pat Px200-Py120 atveju, tėkmei tapus nestabiliai, vyksta ne įprastas asimetrinių dviejų kryptčių, bet vienos kryptties sūkurių susidarymas (žr. 3.23 pav.).

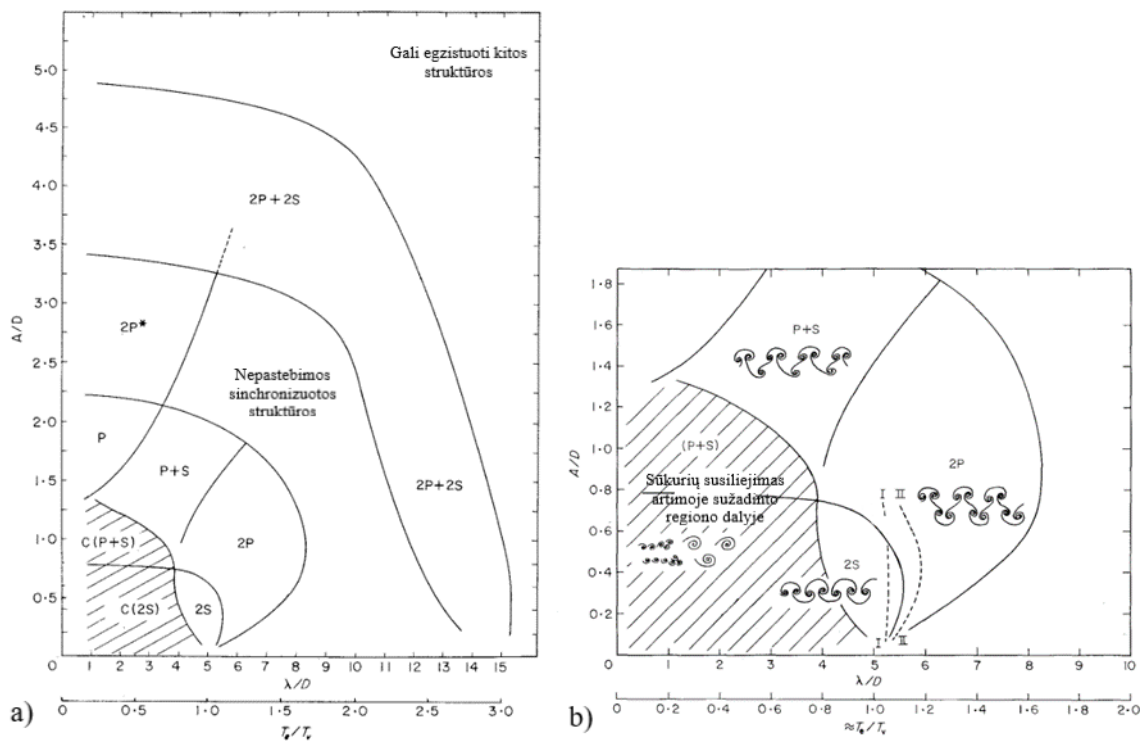


3.22 pav. Srauto linijų kanalo pradžioje ir pabaigoje priklausomybė nuo kliūčių, kai $Re_d = 60, 150$ ir 270



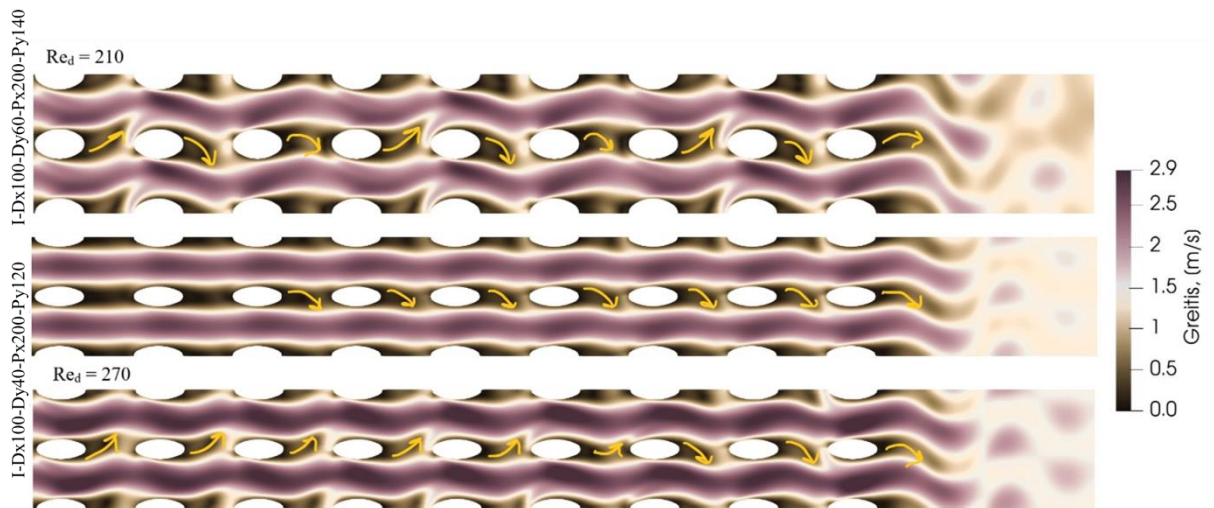
3.23 pav. Simetriškų ir asimetriškų sūkurių schema

Sūkurių nukrypimas už kliūčių tik viena kryptimi ir jų slinkimas yra įmanomas. Tiriant vieną kliūtį nustatyta, kad tai priklauso nuo osciliavimo amplitudės ir bangos ilgio [79]. Sūkurių susidarymo žemėlapis parodytas 3.24 pav. (P – sūkurių pora, S – vienas sūkurys). P režimo sužadintoji zona sudaryta iš sūkurių poros, kuri už kliūčių nukrypsta tik į vieną pusę (į kurią, priklauso nuo tėkmės savybių), bet pačių sūkurių sukimosi kryptys priešingos.



3.24 pav. Sūkurių sinchronizacijos žemėlapis: a) visas; b) siauresnė sritis su sūkurių schemomis [79]

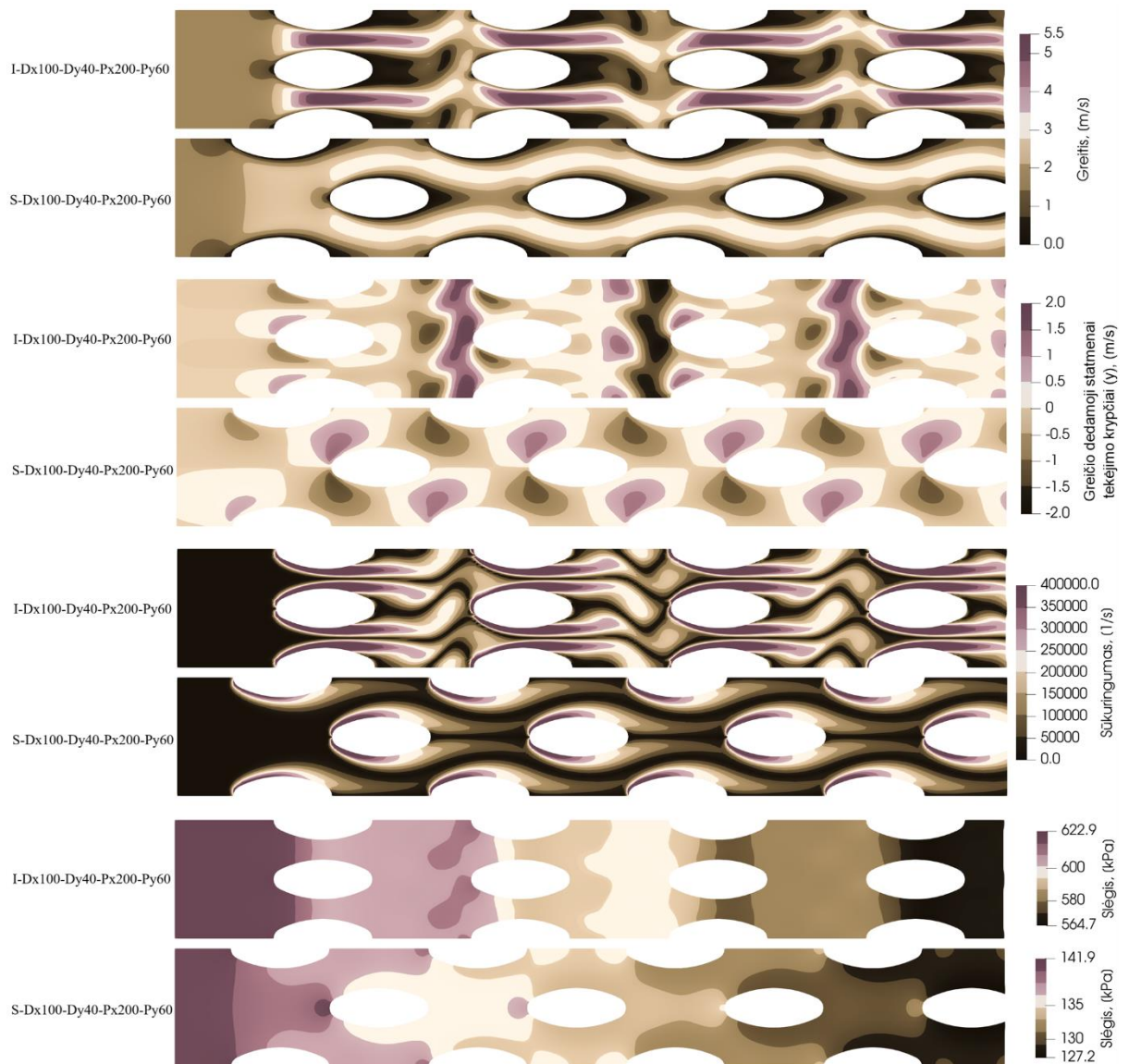
Esant kliūčių eilutei, dažniausiai susidaro dviejų krypčių sūkurių, kaip sumodeliuota, prieš tai nagrinėtais atvejais. Osciliuojantys sužadinti regionai įprastai turėtų sukurti dviejų krypčių asimetriškus sūkurius, bet $P_{x200}-P_{y120}$ atveju įvyksta sužadintų regionų sinchronizacija. Galima daryti prielaidą, kad susidariusių svyravimų amplitudė ir bangos ilgis atitiko sinchronizacijai reikalingas reikšmes, patvirtinimui reikėtų atlikti tolesnius tyrimus. Toks vienos krypties asimetriškų sūkurių slinkimas gaunamas tik esant $Re_d = 210$, kai tekėjimas nestabilus tik mažoje srityje kanalo pabaigoje. Esant didesniai Re_d , slenkantys sūkuriai periodiškai nukreipiami tai į vieną pusę, tai į kitą pusę, kas keletą kliūčių. Tai parodyta 3.25 pav., kur viršuje palyginimui pridėtas didesnės trumposios ašies kliūčių masyvo greičio laukas ($P_{x200}-P_{y140}$). Galima teigti, kad labiau išstetos kliūtys išlaiko tą pačią sūkurių slinkimo kryptį, toks tekėjimas yra stabilesnis, labiau nuspėjamas, taip pat slėgio nuostoliai mažesni.



3.25 pav. Periodinis sūkurių krypties pasikeitimas

3.26 pav. pateikti Px200-Py60 atveju greičio, greičio dedamosios statmenai tekėjimo kryptčiai (y), sūkurinumo ir slėgio laukai. Kuo mažesnis pratekėjimo plotas, tuo tėkmė nestabilesnė. Linijiniu atveju tėkmė iš karto, nuo pačios pradžios, nestabili. Tai todėl, nes dėl mažo pratekėjimo skerspjūvio jau pačioje kanalo pradžioje tėkmę veikia dideli slėgio gradientai, palyginti su Px200-Py120 atveju.

Kliūtis išdėstčius šachmatiškai, skirtingai nei linijiniai, pratekėjimo skerspjūvis visame kanale daugmaž vienodas. Tėkmėje nebėra pagreitėjimo ruožų ir slėgio laukas, matomas 3.26 pav. tiek tėkmės, tiek jai statmena kryptimi, yra gerokai tolygesnis. Greičio dedamoji statmenai tekėjimo kryptčiai parodo kaip linijinio išdėstymo atveju, sąveikaudama su pasroviui esančiomis kliūtimis, tėkmė keičia kryptį, todėl išauga slėgio nuostoliai. Sūkurinumo vertės taip pat yra gerokai didesnės linijiniame masyve.



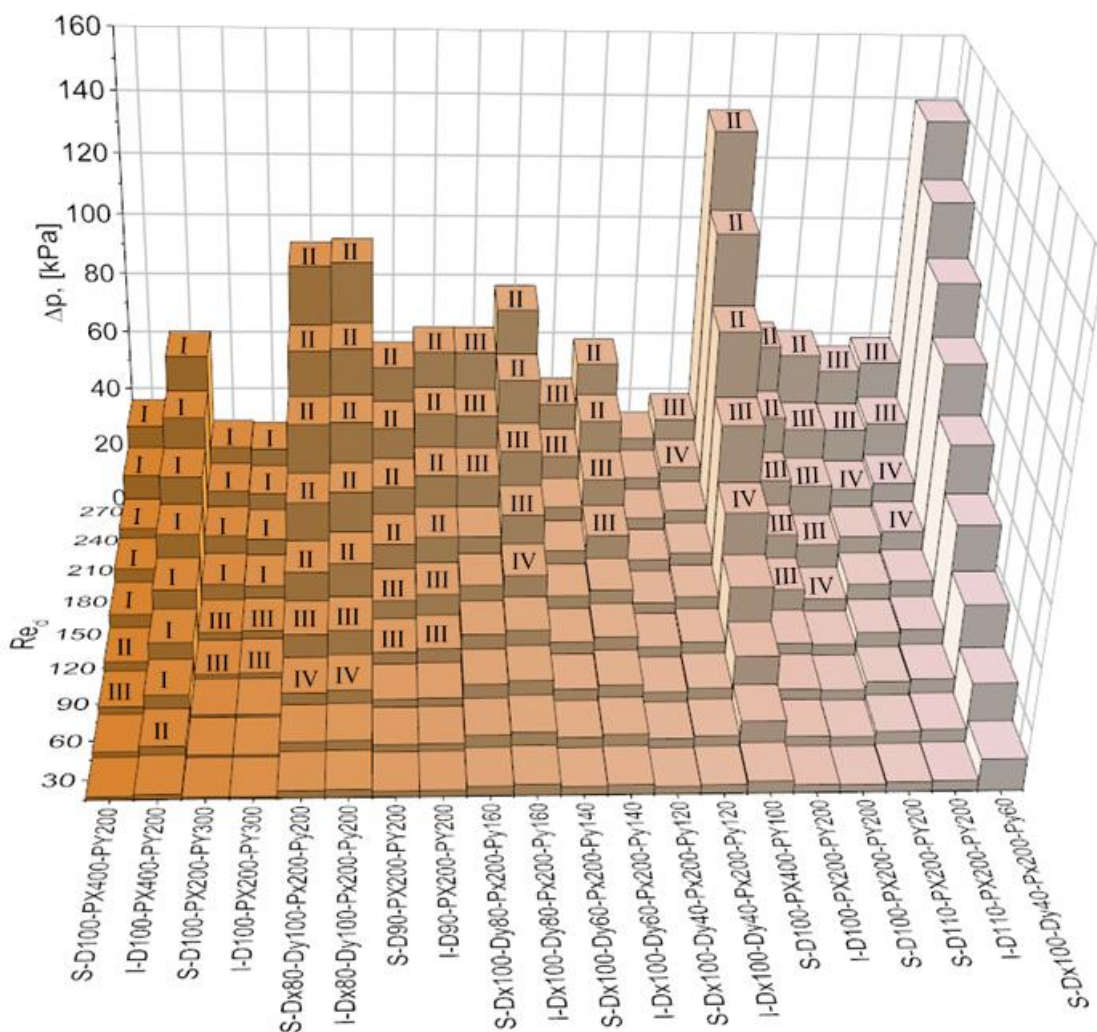
3.26 pav. Greičio, greičio dedamosios statmenai tekėjimo kryptčiai (y), sūkurinimumo ir slėgio laukai, kai $Re_d = 270$

3.3. Elipsių ir cilindrų formos kliūčių palyginimas

Vykstant tekėjimui mikrokanalais su elipsės formos kliūtimis slėgio kritimą yra lengviau prognozuoti, nes, dėl aptakesnės nei cilindro formos, jų išdėstymo įtaka gerokai mažesnė. Tai matyti 3.18 pav. ir 3.1 pav., analogiškus linijinio ar šachmatinio išdėstymo atvejus. Esant cilindro formos kliūtimis, priklausomai nuo atvejo ir jo išdėstymo, vieni mikrokanalai nenuosekliai pranašesni už kitus. Tekėjimo nestabilumo pasireiškimo vietą kanale rodančiose lentelėse, (žr. 3.3 lentelė ir 3.4 lentelė) aiškiai matosi elipsinių kliūčių pranašumas. Deja, toks efektyvus tekėjimo stabilizavimas palankus ir stagnacijos zonų susidarymui. Bet, kita vertus, daugumoje visame Re_d intervale sumodeliuotų stabilių tėkmių recirkuliacinės zonos arba nesusidaro, arba yra labai mažos.

Slėgio kritimo ir tėkmės nestabilumo pasireiškimo vietos priklausomybės nuo kliūčių formos ir išdėstymo pateikta 3.27 pav. Atvejis I-Dx100-Dy40-Px200-Py60 grafike nerodomas dėl nesuderinamo mastelio, nes, palyginus su kitais, jo slėgio perkritis labai didelis. Visi kiti atvejai

surikiuoti pagal kliūčių šilumos mainų paviršiaus ploto santykį su mikrokanalų masyvo tokiosios terpės tūriu, didėjimo tvarka. Jų normuotos vertės duotos 3.5 lentelėje.



3.27 pav. Trimatė slėgio nuostolių ir tėkmės nestabilumo pradžios diagrama

3.5 lentelė. Kliūčių santykinis naudingas paviršiaus plotas mikrokanaluose

Pavadinimas	Santykinis paviršiaus plotas
D100-Px400-Py200	0,181
D100-Px200-Py300	0,263
Dx80-Dy100-Px200-Py200	0,312
D90-Px200-Py200	0,384
Dx100-Dy80-Px200-Py160	0,410
Dx100-Dy60-Px200-Py140	0,412
Dx100-Dy40-Px200-Py120	0,425
S-D100-Px400-Py100	0,479
D100-Px200-Py200	0,479
D110-Px200-Py200	0,610
Dx100-Dy40-Px200-Py60	1

Grafinis rezultatų palyginimas 3.27 pav. akivaizdžiai pademonstruoja, kad visais atvejais šachmatinių masyvu tekančios tėkmės stabilesnės ir slėgio nuostoliai mažesni, palyginus su linijinių. Dar matyti, kad rečiau išdėstytų kliūčių ne tik šilumos mainų paviršių plotas mažesni, bet jos taip pat mažiau riboja bei tuo pačiu silpniau stabilizuoja tekėjimą.

Atvejo S-Dx100-Dy40-Px200-Py60 kliūčių paviršių plotas yra net 58 % didesnis palyginti su S-Dx100-Dy40-Px200-Py120, bet ir slėgio nuostoliai yra 77% didesni visais modeliutomis Re_d . D110-Px200-Py200 atvejai dėl didelio paviršių ploto ir mažo slėgio perkryčio būtų efektyvūs, jei ne recirkuliacinės zonos. Jos už didelių kliūčių ilgą laiką išlieka stagnacinės ir dėl prastos pernašos tuose regionuose susidarys įkaitę taškai.

Recirkuliacinių sūkurių dydis ir slėgio perkrytis mažiausias, kai srauto linijos gerai atitinka pasroviui esančias kliūčių eiles. Vis dėlto, esant didesniai Re_d , tokie masyvai gali sudaryti pagrindinės tėkmės turbulencijai atsparias recirkuliacines stagnacijos sritis. Rezultatai gauti darbe nagrinėtame Re_d intervale rodo, kad, iš visų nagrinėtų mikrokanalų, efektyviausias yra S-Dx100-Dy40-Px200-Py120 atvejis.

Išvados

Skaitiškai ištyrus ir palyginus tarpusavyje 21-ą skirtingą mikrokanalų geometrijos atvejį, buvo nustatyti tiek slėgio nuostolių, tiek tėkmės stabilumo dėsningumai bei sudėtingi tekėjimo reiškiniai.

Tėkmės stabilumas ir sudėtingi tekėjimo reiškiniai

1. Esant didesniam naudingam paviršių plotui **tėkmė yra stabilesnė**, nes mažesnis atstumas tarp gretimų kliūčių eilių mažina tėkmės nestabilumo pasireiškimo tikimybę.
2. Esant šachmatiniam kliūčių išdėstymui **tėkmė yra stabilesnė**, nors ir daugiau bei labiau kaitalioja kryptį, nei linijiniam.
3. Mikrokanalų su elipsės formos kliūtimis **tėkmė stabilesnė**, palyginus su cilindro. Vadinasi, jog recirkuliacinės stagnacijos zonos išliks ilgesnį laiko tarpą. Vis dėlto, kai kuriuose elipsės formos kliūčių masyvuose recirkuliacinės zonos nesusidaro ir vietinių temperatūrų padidėjimo grėsmės nėra. Didesni stagnaciniai sukuriai susidaro cilindro formos kliūčių masyvuose.
4. Kol Reinoldso skaičius mažas ($Re_d \lesssim 120$), tekėjimo dėsningumai yra panašūs. Perėjus į turbulentinį režimą, pasireiškia **labai sudėtingos sąveikos**. Pavyzdžiui, sužadintų zonų interferencija ir asimetriškų sukurių sinchroniškas nukreipimas į pagrindinę tėkmę.

Slėgio nuostoliai

5. Tekėjimo **slėgio nuostoliai mažesni** esant šachmatiniam kliūčių išdėstymui, palyginus su linijiniu. Todėl galima teigti, jog dideli periodiniai pratekamo ploto kitimai tekėjimo režimą paveikia labiau, nei tėkmės kelio nukreipimai.
6. Mikrokanalų su elipsės formos kliūtimis **slėgio nuostoliai mažesni**, dėl aptakios formos, kuri padeda išlaikyti tekėjimo stabilumą.

Efektyvumas

7. Iš visų tirtų mikrokanalų **efektyviausias yra S-Dx100-Dy40-Px200-Py120** atvejis, dėl tekėjimo stabilumo, mažo slėgio perkryčio, itin mažų recirkuliacinių zonų ir santykinai didelio darbinių paviršių ploto.

Literatūros šaltiniai

1. WALDROP, M. Mitchell. The chips are down for Moore's law. *Nature News*, 2016, 530.7589: 144. DOI: [10.1038/530144a](https://doi.org/10.1038/530144a)
2. ETIEMB E, Daniel. 45-year CPU evolution: one law and two equations. *arXiv preprint arXiv:1803.00254*, 2018.
3. KANDLIKAR, Satish G.; GRANDE, William J. Evolution of microchannel flow passages--thermohydraulic performance and fabrication technology. *Heat transfer engineering*, 2003, 24.1: 3-17. DOI: <https://doi.org/10.1080/01457630304040>
4. KHAN, Jamil A.; MORSHED, AKMM Monjur; FANG, Ruixian. Towards ultra-compact high heat flux microchannel heat sink. *Procedia Engineering*, 2014, 90: 11-24. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.11.798>
5. RANGANAYAKULU, Chennu; SEETHARAMU, Kankanhalli N. *Compact heat exchangers: Analysis, design and optimization using FEM and CFD approach*. John Wiley & Sons, 2018.
6. BERGMAN, Theodore L., et al. *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons, 2011.
7. ZOHURI, Bahman. *Compact heat exchangers*. Springer, 2017.
8. FENG, Shangsheng, et al. Natural convection in a cross-fin heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 2018, 132: 30-37. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.049>
9. JOO, Younghwan; KIM, Sung Jin. Comparison of thermal performance between plate-fin and pin-fin heat sinks in natural convection. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2015, 83: 345-356. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.12.023>
10. HE, Ziqiang, et al. Numerical study of thermal enhancement in a micro-heat sink with ribbed pin-fin arrays. *JOURNAL OF THERMAL ANALYSIS AND CALORIMETRY*, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09739-z>
11. DOI: [10.5281/zenodo.1130840](https://doi.org/10.5281/zenodo.1130840)
12. ZHOU, Feng; CATTON, Ivan. Numerical evaluation of flow and heat transfer in plate-pin fin heat sinks with various pin cross-sections. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2011, 60.2: 107-128. DOI: <https://doi.org/10.1080/10407782.2011.588574>
13. RASOULI, Erfan. Single Phase and Flow Boiling Heat Transfer and Flow Characterization in Microscale Pin Fin Heat Sinks. 2015.
14. HAN, Je-Chin. Recent studies in turbine blade cooling. *International Journal of Rotating Machinery*, 2004, 10. DOI: <https://doi.org/10.1155/S1023621X04000442>
15. ŽUKAUSKAS, A. Heat transfer from tubes in crossflow. In: *Advances in heat transfer*. Elsevier, 1972. p. 93-160. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70038-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70038-8)
16. TUCKERMAN, David B.; PEASE, Roger Fabian W. High-performance heat sinking for VLSI. *IEEE Electron device letters*, 1981, 2.5: 126-129. DOI: [10.1109/EDL.1981.25367](https://doi.org/10.1109/EDL.1981.25367)
17. RAMESH, K. Naga; SHARMA, T. Karthikeya; RAO, G. Amba Prasad. Latest Advancements in Heat Transfer Enhancement in the Micro-channel Heat Sinks: A Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2020, 1-31. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09495-1>
18. CHYU, M. K.; YEN, C. H.; SIW, S. Comparison of heat transfer from staggered pin fin arrays with circular, cubic and diamond shaped elements. In: *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. 2007. p. 991-999. DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2007-28306>
19. CHYU, Minking K.; SIW, Sean C.; MOON, Hee Koo. Effects of height-to-diameter ratio of pin element on heat transfer from staggered pin-fin arrays. In: *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. 2009. p. 705-713. DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2009-59814>
20. CHYU, M. K., et al. Heat transfer contributions of pins and endwall in pin-fin arrays: effects of thermal boundary condition modeling. 1999. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2841309>
21. HUA, Junye, et al. Study on the flow resistance performance of fluid cross various shapes of micro-scale pin fin. *Applied thermal engineering*, 2016, 107: 768-775. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.048>
22. AMBREEN, Tehmina, et al. Performance analysis of hybrid nanofluid in a heat sink equipped with sharp and streamlined micro pin-fins. *Powder Technology*, 2019, 355: 552-563. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.07.087>
23. AMBREEN, Tehmina; SALEEM, Arslan; PARK, Cheol Woo. Pin-fin shape-dependent heat transfer and fluid flow characteristics of water-and nanofluid-cooled micropin-fin heat sinks: Square, circular and triangular fin cross-sections. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 158: 113781. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113781>

24. AMBREEN, Tehmina; KIM, Man-Hoe. Effect of fin shape on the thermal performance of nanofluid-cooled micro pin-fin heat sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 126: 245-256. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.164>
25. İZCI, Türker; KOZ, Mustafa; KOŞAR, Ali. The effect of micro pin-fin shape on thermal and hydraulic performance of micro pin-fin heat sinks. *Heat Transfer Engineering*, 2015, 36.17: 1447-1457. DOI: <https://doi.org/10.1080/01457632.2015.1010921>
26. WANG, Peng; CHEN, Liang. Thermal and hydraulic performance of micro pin fin heat sinks with different pin fin shapes. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2019. p. 012053. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/542/1/012053>
27. SIW, Sin Chien; CHYU, Minking K.; ALVIN, Mary Anne. Heat transfer enhancement of internal cooling passage with triangular and semi-circular shaped pin-fin arrays. In: *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. American Society of Mechanical Engineers, 2012. p. 493-503. DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2012-69266>
28. WANG, Fengming; ZHANG, Jingzhou; WANG, Suofang. Investigation on flow and heat transfer characteristics in rectangular channel with drop-shaped pin fins. *Propulsion and power research*, 2012, 1.1: 64-70. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jprr.2012.10.003>
29. QIN, Luwen, et al. Micro-PIV and numerical study on influence of vortex on flow and heat transfer performance in micro arrays. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 161: 114186. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114186>
30. UZOL, Oguz; CAMCI, Cengiz. Heat transfer, pressure loss and flow field measurements downstream of staggered two-row circular and elliptical pin fin arrays. *J. Heat Transfer*, 2005, 127.5: 458-471. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1860563>
31. ABDOLI, Abas; JIMENEZ, Gianni; DULIKRAVICH, George S. Thermo-fluid analysis of micro pin-fin array cooling configurations for high heat fluxes with a hot spot. *International Journal of Thermal Sciences*, 2015, 90: 290-297. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2014.12.021>
32. REDDY, Sohail R.; DULIKRAVICH, George S. Multi-objective optimization of micro pin-fin arrays for cooling of high heat flux electronics. In: *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineers, 2015. p. V07BT09A053. DOI: <https://doi.org/10.1115/IMECE2015-54166>
33. BAHIRAEI, Mehdi, et al. CFD analysis of employing a novel ecofriendly nanofluid in a miniature pin fin heat sink for cooling of electronic components: Effect of different configurations. *Advanced Powder Technology*, 2019, 30.11: 2503-2516. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.07.029>
34. PATI, Biswaranjan, et al. Numerical investigation of pin-fin thermal performance for staggered and inline arrays at low Reynolds number. *Journal homepage: http://iijeta.org/Journals/IJHT*, 2018, 36.2: 697-703. DOI: <https://doi.org/10.18280/ijht.360235>
35. COHEN, Julien Harry, et al. *Development of novel tapered pin fin geometries for additive manufacturing of compact heat exchangers*. 2016. PhD Thesis.
36. BEDROUNI, M., et al. Large Eddy Simulation of a Turbulent Flow over Circular and Mixed Staggered Tubes' Cluster. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2020, 13.5: 1471-1486. DOI: 10.36884/jafm.13.05.31119
37. HUNG, Shuo-Cheng; HUANG, Szu-Chi; LIU, Yao-Hsien. Effect of nonuniform pin size on heat transfer in a rotating rectangular channel with pin-fin arrays. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 163: 114393. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114393>
38. CHYU, M. K.; HSING, Y. C.; NATARAJAN, V. Convective heat transfer of cubic fin arrays in a narrow channel. 1998. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2841414>
39. YANG, Kai-Shing, et al. A comparative study of the airside performance of heat sinks having pin fin configurations. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2007, 50.23-24: 4661-4667. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.03.006>
40. QIU, Yunlong, et al. An Experimental Study of Microchannel and Micro-Pin-Fin Based On-Chip Cooling Systems with Silicon-to-Silicon Direct Bonding. *Sensors*, 2020, 20.19: 5533. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20195533>
41. XU, Fayao; PAN, Zhenhai; WU, Huiying. Experimental investigation on the flow transition in different pin-fin arranged microchannels. *Microfluidics and Nanofluidics*, 2018, 22.1: 11. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10404-017-2030-4>
42. KOŞAR, Ali; MISHRA, Chandan; PELES, Yoav. Laminar flow across a bank of low aspect ratio micro pin fins. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1900139>

43. SHAFEIE, Haleh, et al. Numerical study of heat transfer performance of single-phase heat sinks with micro pin-fin structures. *Applied Thermal Engineering*, 2013, 58.1-2: 68-76. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2013.04.008>
44. CHOUDHARY, Vishwjeet; KUMAR, Manoj; PATIL, Anil Kumar. Experimental investigation of enhanced performance of pin fin heat sink with wings. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 155: 546-562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.139>
45. GUAN, Ning, et al. Vortex distribution and mixed convection of liquid flow across micro-cylinders in a rectangular channel. *Heat and Mass Transfer*, 2016, 52.3: 657-670. DOI: 10.1007/s00231-015-1640-1
46. LYALL, Michael E., et al. Heat transfer from low aspect ratio pin fins. *Journal of turbomachinery*, 2011, 133.1. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2812951>
47. RASOULI, Erfan; NADERI, Cameron; NARAYANAN, Vinod. Pitch and aspect ratio effects on single-phase heat transfer through microscale pin fin heat sinks. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 118: 416-428. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.10.105>
48. OSTANEK, Jason K.; THOLE, Karen A. Effects of varying streamwise and spanwise spacing in pin-fin arrays. In: *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. American Society of Mechanical Engineers, 2012. p. 45-57. DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2012-68127>
49. OSTANEK, Jason K.; THOLE, Karen A. Effects of non-uniform streamwise spacing in low aspect ratio pin fin arrays. In: *Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*. American Society of Mechanical Engineers, 2013. p. V03AT12A050. DOI: <https://doi.org/10.1115/GT2013-95889>
50. TAMAYOL, A., et al. Moderate Reynolds number flow through microchannels filled with arrays of micro-cylinders. In: *AIP Conference Proceedings 4*. American Institute of Physics, 2012. p. 83-88. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4711157>
51. TAMAYOL, Ali, et al. Low Reynolds number flows across ordered arrays of micro-cylinders embedded in a rectangular micro/minichannel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 58.1-2: 420-426. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.10.077>
52. KOZ, Mustafa; OZDEMIR, Mehmed Rafet; KOŞAR, Ali. Parametric study on the effect of end walls on heat transfer and fluid flow across a micro pin-fin. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, 50.6: 1073-1084. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2010.12.008>
53. PATI, Biswaranjan, et al. Numerical investigation of pin-fin thermal performance for staggered and inline arrays at low Reynolds number. *Journal homepage: http://iijeta.org/Journals/IJHT*, 2018, 36.2: 697-703. DOI: <https://doi.org/10.18280/ijht.360235>
54. MEI, Deqing, et al. Effect of tip clearance on the heat transfer and pressure drop performance in the micro-reactor with micro-pin-fin arrays at low Reynolds number. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2014, 70: 709-718. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2013.11.060>
55. WANG, Xiang, et al. Numerical investigation on hydraulic and thermal characteristics of micro latticed pin fin in the heat sink. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 149: 119157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119157>
56. LIANG, Dong, et al. Investigating the effect of element shape of the face-centered cubic lattice structure on the flow and endwall heat transfer characteristics in a rectangular channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 153: 119579. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119579>
57. YU, X., et al. An investigation of convective heat transfer in microchannel with Piranha Pin Fin. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 103: 1125-1132. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.07.069>
58. WOODCOCK, Corey, et al. Piranha Pin-Fins (PPF): Voracious boiling heat transfer by vapor venting from microchannels-system calibration and single-phase fluid dynamics. In: *Fourteenth Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm)*. IEEE, 2014. p. 282-289. DOI: 10.1109/ITHERM.2014.6892294
59. YAGMUR, Sercan, et al. Experimental and numerical investigation of flow structures around cylindrical bluff bodies. In: *EPJ Web of Conferences*. EDP Sciences, 2015. p. 02113. DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/20159202113>
60. WANG, Yingying, et al. Experimental and numerical study about local heat transfer in a microchannel with a pin fin. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 121: 534-546. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.01.034>
61. ZHANG, Shigang, et al. Vortex induced transport phenomena in flows past micropins. In: *International Heat Transfer Conference*. IHTC, 2018. p. 8926-8933. DOI: [10.1615/IHTC16.tpm.024061](https://doi.org/10.1615/IHTC16.tpm.024061)

62. KANARIS, Nicolas; GRIGORIADIS, Dimokratis; KASSINOS, Stavros. Three dimensional flow around a circular cylinder confined in a plane channel. *Physics of Fluids*, 2011, 23.6: 064106. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.3599703>
63. PANDA, Saroj K. Two-dimensional flow of power-law fluids over a pair of cylinders in a side-by-side arrangement in the laminar regime. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2017, 34.2: 507-530. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20170342s20150504>
64. PRAKASH, Shashi; KUMAR, Subrata. Fabrication of microchannels: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2015, 229.8: 1273-1288. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954405414535581>
65. KIRSCH, Kathryn L.; THOLE, Karen A. Pressure loss and heat transfer performance for additively and conventionally manufactured pin fin arrays. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 108: 2502-2513. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.01.095>
66. NAPHON, Paisarn; KHONSEUR, Osod. Study on the convective heat transfer and pressure drop in the micro-channel heat sink. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2009, 36.1: 39-44. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2008.09.001>
67. MOODY, Lewis F. Friction factors for pipe flow. *Trans. Asme*, 1944, 66: 671-684.
68. KANDLIKAR, Satish G., et al. Characterization of surface roughness effects on pressure drop in single-phase flow in minichannels. *Physics of Fluids*, 2005, 17.10: 100606. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1896985>
69. RENFER, Adrian, et al. Experimental investigation into vortex structure and pressure drop across microcavities in 3D integrated electronics. *Experiments in fluids*, 2011, 51.3: 731-741. DOI: 10.1007/s00348-011-1091-5
70. GREENSHIELDS, C. OpenFOAM user guide Version 6. CFD Direct Ltd. 2018.
71. HOLZMANN, Tobias. Mathematics, numerics, derivations and OpenFOAM®. *Loeben, Germany: Holzmann CFD*, 2016.
72. VERSTEEG, Henk Kaarle; MALALASEKERA, Weeratunge. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson education, 2007.
73. Menter kursų medžiaga
74. MENTER, Florian R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA journal*, 1994, 32.8: 1598-1605. DOI: <https://doi.org/10.2514/3.12149>
75. ALFIERI, Fabio, et al. Computational modeling of vortex shedding in water cooling of 3D integrated electronics. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2013, 44: 745-755. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.10.004>
76. ZDRAVKOVICH, M. M. The effects of interference between circular cylinders in cross flow. *Journal of fluids and structures*, 1987, 1.2: 239-261. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0889-9746\(87\)90355-0](https://doi.org/10.1016/S0889-9746(87)90355-0)
77. MIAU, Jiun-Jih; WANG, H. B.; CHOU, Jung-Hua. Flopping phenomenon of flow behind two plates placed side-by-side normal to the flow direction. *Fluid dynamics research*, 1996, 17.6: 311. DOI: [https://doi.org/10.1016/0169-5983\(95\)00034-8](https://doi.org/10.1016/0169-5983(95)00034-8)
78. BAI, Xiao-Dong, et al. The flip-flopping wake pattern behind two side-by-side circular cylinders: A global stability analysis. *Physics of Fluids*, 2016, 28.4: 044102. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4944685>
79. WILLIAMSON, Charles HK; ROSHKO, Anatol. Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder. *Journal of fluids and structures*, 1988, 2.4: 355-381. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0889-9746\(88\)90058-8](https://doi.org/10.1016/S0889-9746(88)90058-8)

Priedai

1 Priedas. Publikacijų sąrašas

Mokslinėse konferencijose pristatyti pranešimai:

1. Jaseliūnaitė J. Interference of antiphase-synchronized vortex shedding in flow past an inline micro-cylinder array, *Open Readings 2021: 64th Int. Conference for students of physics and natural sciences*, 16-19th of March, 2021
2. Jaseliūnaite J. Numerical Investigation of Pin-Fin Arrays Hydraulic Performance in Different Arrangements, *Industrial Engineering 2021: The International Young Researchers Conference*, 13th of May, 2021

2 priedas. Python geometrijos generavimo kodas

```
import math
filename = 'blockMeshDict'
bm= open(filename,'w')
bm.write("FoamFile\n{\nversion      2.0;\nformat      ascii;\nclass
dictionary;\nobject      blockMeshDict;\n}\n\n")
bm.write("convertToMeters 0.000001;\n\n")
# pinÅ³ skaiÅ±iai
pinx = 50          # pinÅ³ skaiÅ±ius x kryptimi
piny = 5          # pinÅ³ skaiÅ±ius y kryptimi
# dimensiniai dydÅ±iai
iki = 1000        # atstumas iki pirmo pino
po = 1000         # atstumas nuo paskutinio pino iki galo
px = 200          # pin pitch x/ atstumas tarp pinu x kryptimi kartu atitinka centro
koordinate
py = 200          # pin pitch y/ atstumas tarp pinu y kryptimi kartu atitinka centro
koordinate
rx = 50           # pin spindulys x kryptimi
ry = 50           # pin spindulys y kryptimi
h = 200           # aukstis
cellsize = 10# celes krastines ilgis micro m
#pin'o apskritimo/elipses koordinates pagal pasaulio kryptis
N = ry            # North
if (rx!=ry):
    #NEx = math.sqrt(rx**2-ry**2)
    #NEy = NEx*2/(math.sqrt(2))
    NEx = rx*math.sqrt(3)/2
    NEy = ry*0.5
    E = rx
    #SEx = math.sqrt(rx**2-ry**2)
    #SEy = -1*SEx*2/(math.sqrt(2))
    SEx = rx*math.sqrt(3)/2
    SEy = -1*ry*0.5
    S = -1*ry
    SWx = -1*rx*math.sqrt(3)/2
    SWy = ry*0.5
    W = -1*rx
    NWx = -1*rx*math.sqrt(3)/2
    NWy = -1*ry*0.5
else:
    NEx = math.sqrt(2)*rx/2
    NEy = math.sqrt(2)*ry/2
    E = rx
    SEx = math.sqrt(2)*rx/2
    SEy = -1*math.sqrt(2)*ry/2
    S = -1*ry
    SWx = -1*math.sqrt(2)*rx/2
    SWy = math.sqrt(2)*ry/2
    W = -1*rx
    NWx = -1*math.sqrt(2)*rx/2
    NWy = -1*math.sqrt(2)*ry/2

# Grading

csiki = int(round(iki/cellsize)) # iki x kryptimi
cspo = int(round(po/cellsize)) # po x kryptimi
cstarpx = int(round((px/2-NEx)*2/cellsize))
csvidx = int(round((NEx*2)/cellsize))
print(str(csvidx))
cstarp y = int(round((py/2-NEy)*2/cellsize))
csvidy = int(round((NEy*2)/cellsize))
csh= int(round((h/cellsize)))

# Tasku kurimas
bm.write("vertices\n{\n\n")
n=0
z0=0
x0=0
for z in range(0,2): # nuo 0 iki 1
```



```

for x in range (0, (2*pinx+4)):
    if (x==0):
        x0=0
    if (x==1):
        x0=iki
    if (x>1) & (x<2*pinx+4-2):
        if (x%2)==0: # lyginis
            if (x>3):
                x0=x0+px/2-NEx
                x0=round(x0+(px/2-(NEx)),3)
        if (x%2)!=0: # nelyginis
            x0=round(x0+NEx*2,3)
    if (x==2*pinx+4-2):
        x0=round(x0+px/2-NEx,3)
    if (x==2*pinx+4-1):
        x0=x0+po
    for y in range(0, (piny+2)):
        if (y==0):
            y0=0
            bm.write("\t(" + str(x0)+" " + str(y0) + " " + str(z0) +
")\t\t //" + str(n) + "\n")
            n=n+1
        if (y!=0) & (y!=piny+1): #apims 2 taÅ;kus
            y0=round(y0+(py/2-NEy),3)
            bm.write("\t(" + str(x0)+" " + str(y0) + " " + str(z0) +
")\t\t //" + str(n) + "\n")
            n=n+1
            y0=round(y0+(NEy*2),3)
            bm.write("\t(" + str(x0)+" " + str(y0) + " " + str(z0) +
")\t\t //" + str(n) + "\n")
            n=n+1
            y0=round(y0+(py/4+(py/4-NEy)),3)
        if (y==piny+1):
            y0=round(y0,3)
            bm.write("\t(" + str(x0)+" " + str(y0) + " " + str(z0) +
")\t\t //" + str(n) + "\n")
            n=n+1
        y0=0
    x0=0
    z0=h
bm.write(");\n")

#Blokai
bm.write("\nblocks\n(\n")
n=0
I=0
for pirmi in range(0,piny*2+1):
    II=I+piny*2+2
    III=I+piny*2+3
    IV=I+1
    V=I+(piny*2+2)*(2*pinx+4)
    VI=V+piny*2+2
    VII=V+piny*2+3
    VIII=V+1
    if (pirmi%2)==0 :
        csy=int(cstarpy)
    if (pirmi%2) !=0:
        csy=int(csvidy)
    if pirmi==0 or pirmi==piny*2:
        csy=int(cstarpy/2)
    bm.write("\thex (" +str(I)+" "+str(II)+" "+str(III)+" "+str(IV)+" "+str(V)+"
"+str(VI)+" "+str(VII)+" "+str(VIII)+")"+" (" +str(csiki)+" "+str(csy)+" "+str(csh)+")
simpleGrading (1 1 1) //" +str(n)+"\n")
    n=n+1
    I=I+1
bm.write("\n")
I=piny*2+2; II=0; III=0; IV=0; V=0; VI=0; VII=0; VIII=0
for bodyx in range(1, pinx*2+2):
    if ((bodyx%2)==0):
        csx=csvidx

```

```

if ((bodyx%2)!=0):
    csx=cstarpX
    print(str(cstarpX))
if bodyx==1 or bodyx==pinx*2+1:
    csx=round(cstarpX/2)
for bodyy in range(0,piny*2+1):
    II=I+piny*2+2
    III=I+piny*2+3
    IV=I+1
    V=I+(piny*2+2)*(2*pinx+4)
    VI=V+piny*2+2
    VII=V+piny*2+3
    VIII=V+1
    if (bodyy%2)==0:
        csy=cstarpY
    if (bodyy%2)!=0:
        csy=csvidy
    if bodyy==0 or bodyy==piny*2:
        csy=round(cstarpY/2)
    if ((bodyy%2)==0 or (bodyx%2)!=0):
        bm.write("\thex (" +str(I)+ " "+str(II)+ " "+str(III)+ " "+str(IV)+ "
"+str(V)+ " "+str(VI)+ " "+str(VII)+ " "+str(VIII)+ " "+str(csx)+ " "+str(csy)+ "
"+str(csh)+ " ) simpleGrading (1 1 1) //" +str(n)+"\n")
        n=n+1
        I=I+1
    I=I+1
    bm.write("\n")
for paskutiniai in range(0,piny*2+1):
    II=I+piny*2+2
    III=I+piny*2+3
    IV=I+1
    V=I+(piny*2+2)*(2*pinx+4)
    VI=V+piny*2+2
    VII=V+piny*2+3
    VIII=V+1
    if (paskutiniai%2)==0:
        csy=cstarpY
    if (paskutiniai%2)!=0:
        csy=csvidy
    if paskutiniai==0 or paskutiniai==piny*2:
        csy=round(cstarpY/2)
    bm.write("\thex (" +str(I)+ " "+str(II)+ " "+str(III)+ " "+str(IV)+ " "+str(V)+ "
"+str(VI)+ " "+str(VII)+ " "+str(VIII)+ " "+str(cspo)+ " "+str(csy)+ " "+str(csh)+ " )
simpleGrading (1 1 1) //" +str(n)+"\n")
    n=n+1
    I=I+1
bm.write(");\n")
#=====EGDES=====
bm.write("\nedges\n(\n")
# pins
I=((piny*2+2)*2); II=0; III=0; IV=0; V=0; VI=0; VII=0; VIII=0; n=0
koorx=iki+px/2
print(str(round(piny/2+0.5)))
for pinsx in range(1, (pinx)+1):
    #print("PinÅ³ sk "+str(pinsklyg))
    koory=(py)/2
    for pinsy in range(0, piny):
        I=I+1
        II=I+1
        III=I+piny*2+3
        IV=III-1
        V=I+(piny*2+2)*(2*pinx+4)
        VI=II+(piny*2+2)*(2*pinx+4)
        VII=III+(piny*2+2)*(2*pinx+4)
        VIII=IV+(piny*2+2)*(2*pinx+4)
        bm.write("\tarc " + str(I)+ " "+str(II)+"\t(" +str(koorx+W)+ " "+str(koory)+ " "
+str(0)+ ")\t/" + str(n)+"\n")
        n=n+1
        bm.write("\tarc " + str(II)+ " "+str(III)+"\t(" +str(koorx)+ " "+str(koory+N)+ "
" +str(0)+ ")\t/" + str(n)+"\n")

```

```

        n=n+1
        bm.write("\tarc "+ str(III)+" "+str(IV)+"\t("+str(koorx+E)+" "+str(koory)+"
" +str(0)+" )\t/" + str(n)+"\n")
        n=n+1
        bm.write("\tarc "+ str(I)+" "+str(IV)+"\t("+str(koorx)+" "+str(koory+S)+" "
+str(0)+" )\t/" + str(n)+"\n")
        n=n+1
        bm.write("\tarc "+ str(V)+" "+str(VI)+"\t("+str(koorx+W)+" "+str(koory)+" "
+str(h)+" )\t/" + str(n)+"\n")
        n=n+1
        bm.write("\tarc "+ str(VI)+" "+str(VII)+"\t("+str(koorx)+" "+str(koory+N)+"
" +str(h)+" )\t/" + str(n)+"\n")
        n=n+1
        bm.write("\tarc "+ str(VII)+" "+str(VIII)+"\t("+str(koorx+E)+"
"+str(koory)+" " +str(h)+" )\t/" + str(n)+"\n")
        n=n+1
        bm.write("\tarc "+ str(V)+" "+str(VIII)+"\t("+str(koorx)+" "+str(koory+S)+"
" +str(h)+" )\t/" + str(n)+"\n")
        n=n+1
        bm.write("\n")
        I=I+1
        koory=koory+py
        I=I+(piny*2+4)*1
        koorx=koorx+px
bm.write(");\n")

#=====BOUNDARIES=====
bm.write("\nboundary\n(\n")
# inlet
bm.write("\tinlet\n\t{\n\t\tttype patch;\n\t\ttfaces\n\t\t\t(\n")
I=0; II=0; III=0; IV=0; n=0
for inlet in range(0, piny*2+1):
    II=I+1
    III=I+(piny*2+2)*(2*pinx+4)
    IV=III+1
    bm.write("\t\t\t("+ str(II)+" "+str(I)+" "+str(III)+" "+str(IV)+" )\t/" +
str(n)+"\n")
    n=n+1
    I=I+1
bm.write("\t\t);\n\t)\n")
# outlet
bm.write("\toutlet\n\t{\n\t\tttype patch;\n\t\ttfaces\n\t\t\t(\n")
I=(piny*2+2)*(pinx*2+3); II=0; III=0; IV=0;
for outlet in range(0, piny*2+1):
    II=I+1
    III=I+(piny*2+2)*(2*pinx+4)
    IV=III+1
    bm.write("\t\t\t("+ str(II)+" "+str(I)+" "+str(III)+" "+str(IV)+" )\t/" +
str(n)+"\n")
    n=n+1
    I=I+1
bm.write("\t\t);\n\t)\n")
# right
bm.write("\tright\n\t{\n\t\tttype wall;\n\t\ttfaces\n\t\t\t(\n")
I=0; II=0; III=0; IV=0;
for right in range(0, pinx*2+3):
    II=I+piny*2+2
    III=I+(piny*2+2)*(2*pinx+4)
    IV=III+piny*2+2
    bm.write("\t\t\t("+ str(I)+" "+str(II)+" "+str(IV)+" "+str(III)+" )\t/" +
str(n)+"\n")
    n=n+1
    I=I+piny*2+2
bm.write("\t\t);\n\t)\n")
# left
bm.write("\tleft\n\t{\n\t\tttype wall;\n\t\ttfaces\n\t\t\t(\n")
I=piny*2+1; II=0; III=0; IV=0;
for left in range(0, pinx*2+3):
    II=I+piny*2+2
    III=I+(piny*2+2)*(2*pinx+4)

```

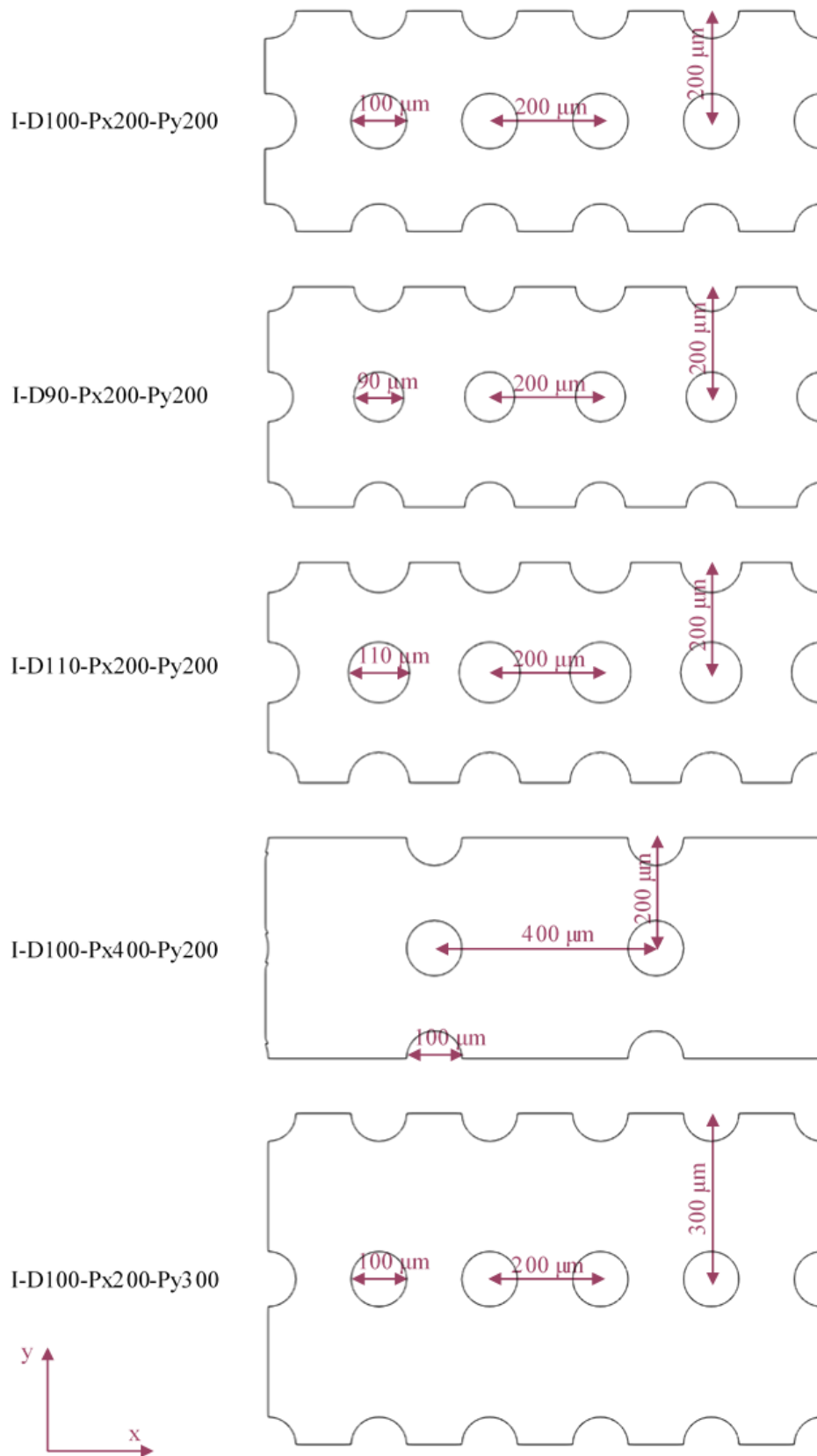
```

IV=III+piny*2+2
bm.write("\t\t\t("+ str(I)+" "+str(II)+" "+str(IV)+" "+str(III))\t//"+
str(n)+"\n")
n=n+1
I=I+piny*2+2
bm.write("\t\t);\n\t)\n")

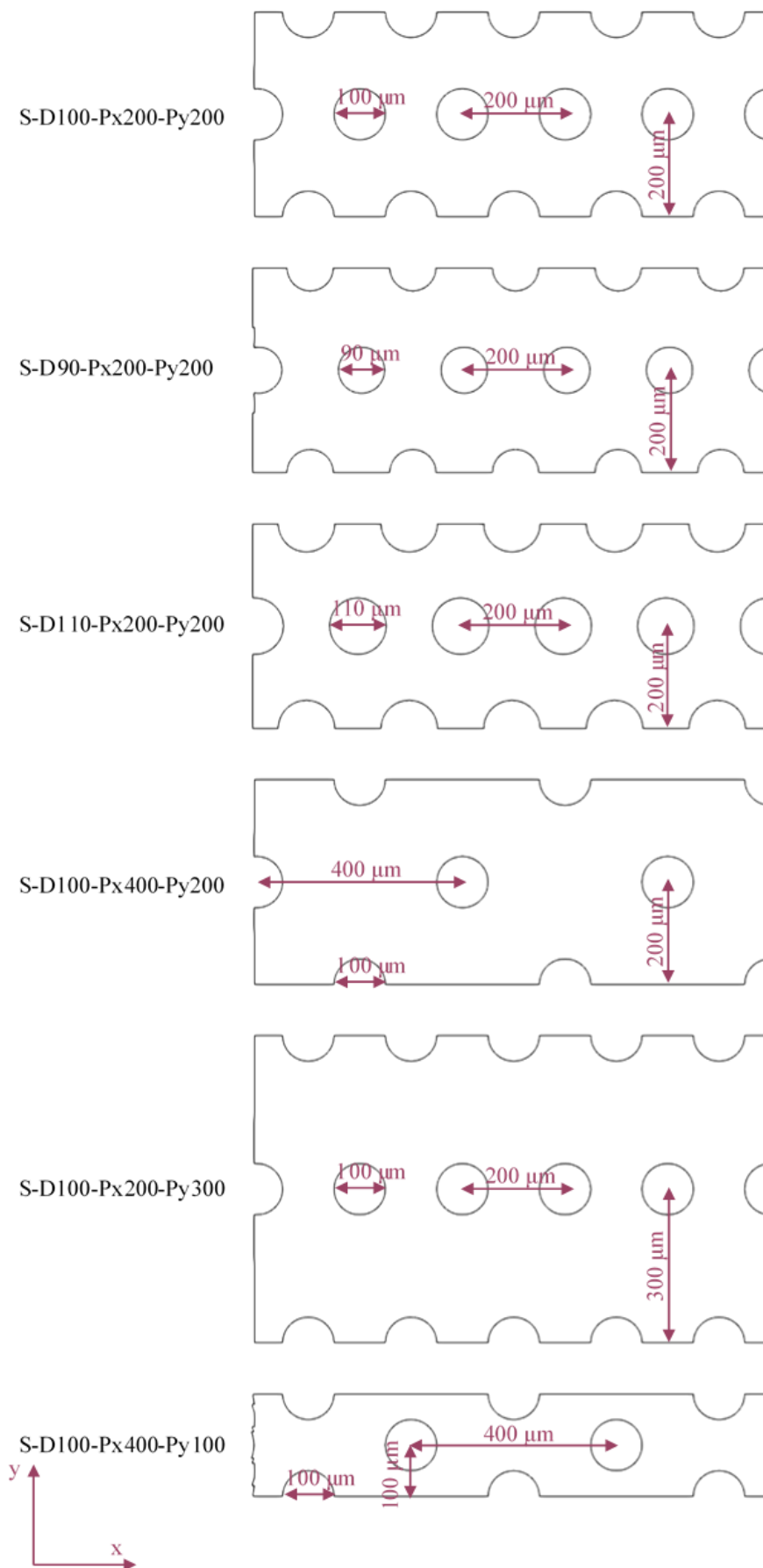
# pins
bm.write("\tpins\n\t{\n\t\ttype wall;\n\t\tfaces\n\t\t(\n")
I=((piny*2+2)*2); II=0; III=0; IV=0; V=0; VI=0; VII=0; VIII=0
for pinsx in range(1, (pinx+1)):
    for pinsy in range(0, piny):
        I=I+1
        II=I+1
        III=I+piny*2+3
        IV=III-1
        V=I+(piny*2+2)*(2*pinx+4)
        VI=II+(piny*2+2)*(2*pinx+4)
        VII=III+(piny*2+2)*(2*pinx+4)
        VIII=IV+(piny*2+2)*(2*pinx+4)
        bm.write("\t\t\t("+ str(I)+" "+str(II)+" "+str(VI)+" "+str(V)+"\t//"+
str(n)+"\n")
n=n+1
        bm.write("\t\t\t("+ str(II)+" "+str(III)+" "+str(VII)+" "+str(VI))\t//"+
str(n)+"\n")
n=n+1
        bm.write("\t\t\t("+ str(III)+" "+str(IV)+" "+str(VIII)+" "+str(VII))\t//"+
+ str(n)+"\n")
n=n+1
        bm.write("\t\t\t("+ str(IV)+" "+str(I)+" "+str(V)+" "+str(VIII))\t//"+
str(n)+"\n")
n=n+1
        bm.write("\n")
I=I+1
I=I+(piny*2+4)*1
bm.write("\t\t);\n\t)\n")
bm.write(");\n")

```

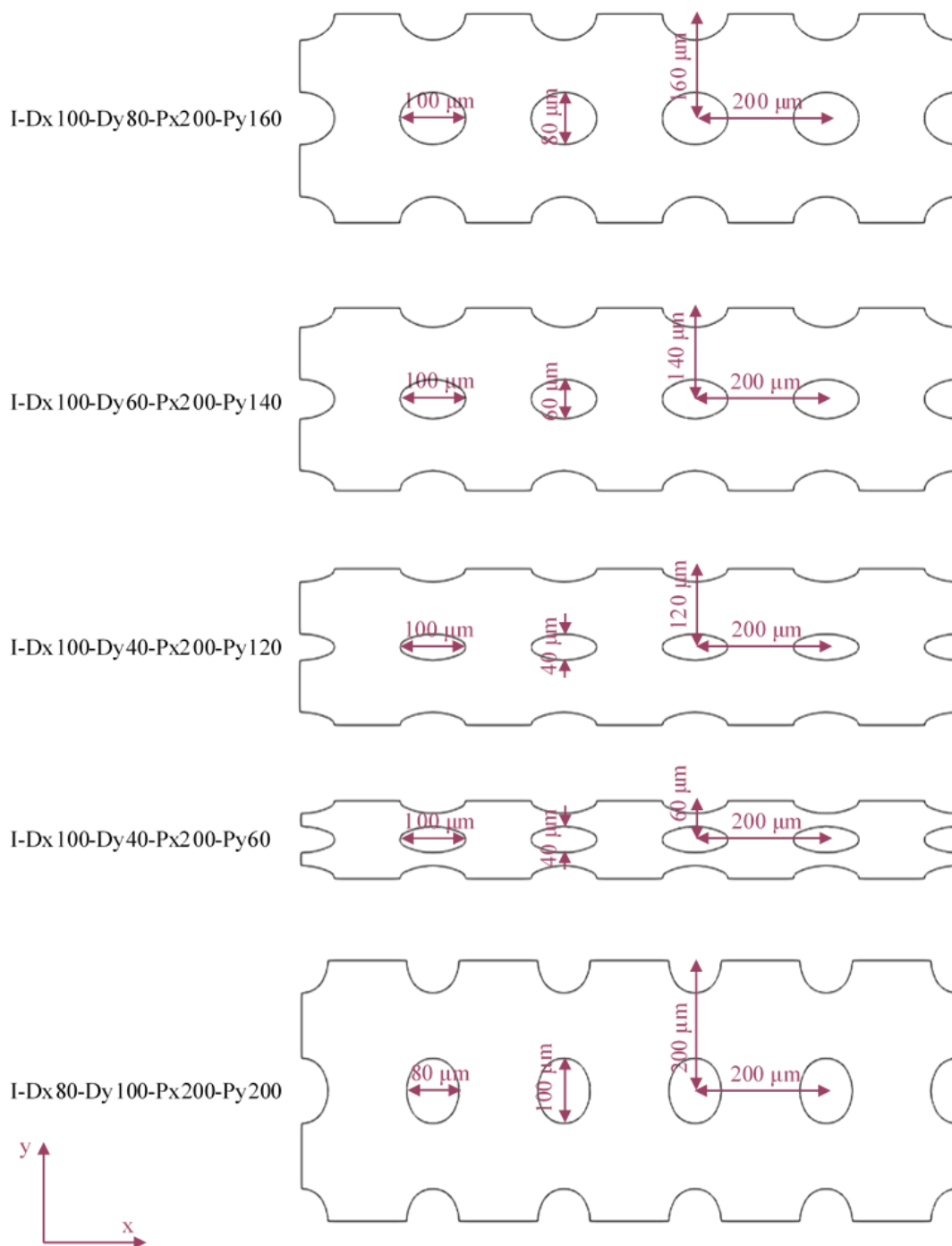
3 priedas. Cilindrinį linijinio išdėstymo kliūčių masyvu struktūros



4 priedas. Cilindrinį šachmatinio išdėstymo kliūčių masyvų struktūros



5 priedas. Elipsinių linijinio išdėstymo kliūčių masyvų struktūros



6 priedas. Elipsinių šachmatinio išdėstymo kliūčių masyvų struktūros

