



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

Paulius Vidugiris

**ATVIRO TIPO AERODINAMINIO VAMZDŽIO PARAMETRŲ
TYRIMAS SKAITINIAIS METODAIS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas

Doc. Dainius Vaičiulis

PANEVĖŽYS, 2016

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

**ATVIRO TIPO AERODINAMINIO VAMZDŽIO PARAMETRŲ
TYRIMAS SKAITINIAIS METODAIS**

Baigiamasis magistro projektas
Transporto priemonių inžinerija (kodas 621E20001)

Vadovas

Doc. Dainius Vaičiulis

Recenzentas

Projektą atliko

Paulius Vidugiris

PANEVĖŽYS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

(Fakultetas)

Paulius Vidugiris

(Studento vardas, pavardė)

Transporto priemonių inžinerija, 621E20001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Baigiamojo projekto pavadinimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

20 ____ m. _____ d.
Panevėžys

Patvirtinu, kad mano, **Pauliaus Vidugirio**, baigiamasis projektas tema „Atviro tipo aerodinaminio vamzdžio parametrų tyrimas skaitiniais metodais“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)

BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

Išduota studentui: Pauliui Vidugiriui

Grupė: PMT – 4

1. Darbo tema patvirtinta 2016 m. kovo mėn. 17 d. dekanu potvarkiu Nr. V25-13-8:

Lietuvių kalba: Atviro tipo aerodinaminio vamzdžio parametrų tyrimas skaitiniais metodais

Anglų kalba: Research of the Open-Type Wind Tunnel Parameters by Using Numerical Methods

2. Darbo tikslas:

Ištirti kaip atviro tipo aerodinaminio vamzdžio tūtos (elemento, įgreitinančio į darbinę kamerą patenkantį srautą) geometriniai parametrai įtakoja srauto kokybę aerodinaminio vamzdžio darbinėje kameroje.

3. Reikalavimai ir sąlygos:

Tyrimą atlikti taikant skaitinius metodus. Ištirti bent kelias skirtingas aerodinaminio vamzdžio tūtų formas.

4. Projekto struktūra. Turinys konkretizuojamas kartu su vadovu, atsižvelgiant į MBP pobūdį.

Literatūros apžvalga, Tiriamoji dalis, Išvados ir Literatūros sąrašas.

5. Ši užduotis yra neatskiriama bakalauro baigiamojo projekto dalis.

6. Projekto pateikimo gynimui kvalifikacinėje komisijoje terminas

2016-06-06

(data)

Užduotį gavau:

Paulius Vidugiris

(studento vardas, pavardė, parašas)

2016-02-02

(data)

Vadovas:

doc. Dainius Vaičiulis

(pareigos, vardas, pavardė, parašas)

2016-02-02

(data)

Vidugiris Paulius, Atviro tipo aerodinaminio vamzdžio parametrų tyrimas skaitiniais metodais, Magistro baigiamasis projektas / Vadovas doc. D. Vaičiulis, Kauno technologijos universitetas, Panevėžio Technologijų ir Verslo fakultetas, Technologijų katedra.

Mokslo kryptis ir sritis: Technologijos mokslai sausumos transporto inžinerija

Reikšminiai žodžiai: *aerodinaminis vamzdis, tūta, turbulentiškumas.*

Panevėžys, 2016. – 39 p.

SANTRAUKA

Darbe atliekamas atviro tipo aerodinaminio vamzdžio parametrų tyrimas naudojant skaitinius metodus. Tyrime naudojama kompiuterinio modeliavimo programa *Solidworks* ir jos papildinys *Cosmos FloWorks*. Ištirta kaip aerodinaminio vamzdžio darbinės kameros srauto kokybę veikia skirtingi tūtos geometriniai parametrai ir pateiktas kokybinis nagrinėtų tūtos konfigūracijų vertinimas.

SUMMARY

Vidugiris Paulius, Research of the Open-Type Wind Tunnel Parameters by Using Numerical Methods, *Master's thesis* / supervisor assoc. doc D. Vaičiulis, Kaunas University of Technology, Panevėžys Technologies and Business Faculty, Technology department

Research area and field: Technology Sciences Land Transport Engineering

Key words: *wind tunnel, contraction, turbulent intensity.*

Panevėžys, 2016. 39 p.

The work covers research of open-type wind tunnel parameters using numerical methods. Computer modeling software *Solidworks* and its add-on *Cosmos FloWorks* is used in this study. Research is made about how different configurations of contraction influence air stream quality in the test chamber. Also qualitative assessment is made about analyzed contraction configurations.

TURINYS

TURINYS	7
ĮVADAS	8
1. ATVIRO TIPO AERODINAMINIO VAMZDŽIO KONSTRUKCIJA	9
1.1. Darbinė kamera	10
1.2. Tūta	10
1.3. Stabilizavimo kamera	11
1.4. Difuzorius	11
1.5. Ventiliatorius	11
2. TŪTOS VAIDMUO AERODINAMINIAME VAMZDYJE	12
2.1. Turbulentiškumas	12
2.2. Suspaudimo laipsnis	13
2.3. Skerspjūvio forma	13
2.4. Tūtos kontūro forma	14
2.5. Tūtos dizaino kriterijai	15
3. NUPJAUTINĖS KVADRATINĖS PIRAMIDĖS FORMOS TŪTA	16
3.1. Aerodinaminio vamzdžio modelis	16
3.2. Skaičiavimo schema	18
3.3. Rezultai	20
3.3.1. Srauto greitis	20
3.3.2. Srauto turbulentiškumas	26
3.3.3. Pasienio sluoksnis	27
3.4. Duomenų analizė	28
4. NUPJAUTINĖS KVADRATINĖS PIRAMIDĖS SU KREIVALINIJINĖMIS SUDAROMOSIOMIS FORMOS TŪTA	30
4.1. Aerodinaminio vamzdžio modelis ir skaičiavimo schema	30
4.2. Antrosios tyrimo dalies rezultatai	32
4.2.1. Srauto greitis	32
4.2.2. Srauto turbulentiškumas	33
4.2.3. Pasienio sluoksnis	34
4.3. Duomenų analizė	37
IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS	38
NAUDOTA LITERATŪRA	39

ĮVADAS

Technologinių mokslų universitetuose, kuriuose dėstoma transporto ir pastatų inžinerija, svarbi mokymo ir darbo priemonė yra aerodinaminis vamzdis. Ši priemonė leidžia praktiškai tirti aerodinamines įvairių objektų savybes, naudojant tų objektų sumažintus modelius.

Nors specialių aerodinaminių vamzdžių galima įsigyti iš komercinių gamintojų, neretai universitetai skatina studentus užsiimti vamzdžio projektavimu ir gamyba. Savarankiškai suprojektuoti aerodinaminiai vamzdžiai kokybe gali prilygti komerciniams, o jų kaina būna gerokai žemesnė. Dėl šios priežasties verta finansuoti tokio įrenginio gamybą universitete.

Projektuojant aerodinaminį vamzdį yra svarbu tinkamai parinkti geometrinius jo komponentų parametrus. Literatūroje galima rasti įvairių rekomendacijų, kurios gali pagelbėti projektuojant. Šios rekomendacijos parašytos remiantis autorių atliktais praktiniais tyrimais ir teoriniais skaičiavimais. Vienas iš būdų projektavimo metu parinkti tinkamą vamzdžio geometriją yra kompiuterinis modeliavimas. Naudojant specialias modeliavimo programas galima sukurti aerodinaminio vamzdžio modelį ir išbandyti jį pagal pasirinktus parametrus.

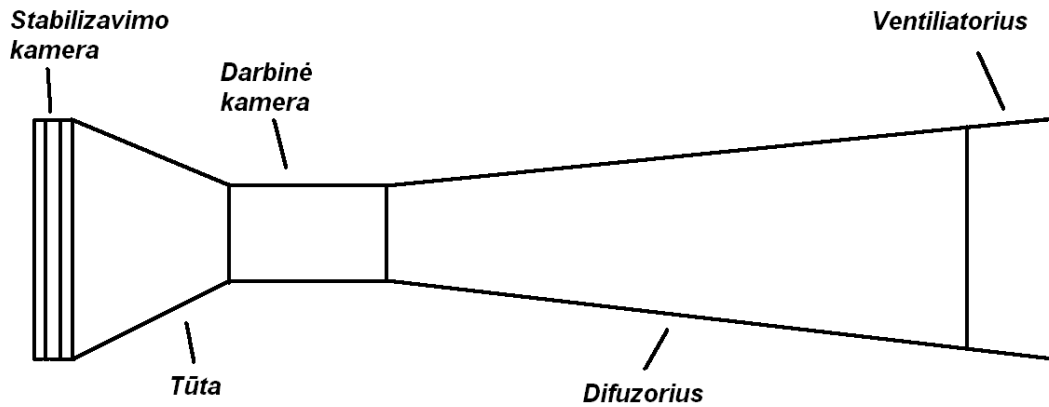
Magistrinio darbo tikslas yra kompiuterinio modeliavimo būdu ištirti atviro tipo aerodinaminio vamzdžio tūtos geometrijos įtaką srauto kokybei.

Darbo uždaviniai:

- apžvelgti kitų autorių rekomendacijas tūtos geometrijai;
- naudojant *Solidworks FloWorks* ištirti tūtos geometrijos įtaką srauto kokybei;
- išanalizuoti kompiuterinio modeliavimo būdu surinktus duomenis ir palyginti juos su kitų autorių rekomendacijomis.

1. ATVIRO TIPO AERODINAMINIO VAMZDŽIO KONSTRUKCIJA

Atviro tipo aerodinaminį vamzdį sudaro stabilizavimo kamera, tūta, darbinė kamera, difuzorius ir ventiliatorius (1 pav.). Vamzdžio kontūro elementai gaminami taip, kad būtų sklandūs perėjimai iš vieno skersmens į kitą, kad srautas niekur neatitrūktų ir nesusidarytų sūkuriai.



1 pav. Aerodinaminio vamzdžio schema

Stabilizavimo kameroje įrengtos srauto tiesinimo grotelės ir turbulencijos mažinimo ekranai. Jų paskirtis yra ištiesinti ir suvienodinti į aerodinaminį vamzdį įtekančio oro srautą. Jie susmulkina didesnius srauto sūkurius į smulkesnius, kurie greitai slopsta ir bendras pratekančio oro srautas tampa tolygesnis.

Tūta vadinama siaurėjanti vamzdžio dalis, kuri nukreipia įsiurbtą orą į darbinę kamerą. Orui judant tūta, srauto greitis didėja dėl mažėjančio pratekėjimo skerspjuvio, todėl darbinėje kameroje mažesnėmis galios sąnaudomis galima pasiekti didesnę srauto greitį. Taip pat tūta sumažina į darbinę kamerą patenkančio srauto turbulentiškumą.

Darbinė kamera yra siauriausia vamzdžio dalis, kurioje atliekami modelio bandymai. Šioje dalyje įrengti modelio tvirtinimo mazgai ir įvairūs matavimo prietaisai. Šioje dalyje labai svarbus srauto tolygumas, kuo mažesnis išilginis slėgio gradientas. Taip pat siekiama, kad darbinėje kameroje srauto nukrypimas nuo vamzdžio išilginės ašies būtų kuo mažesnis.

Difuzoriumi vadinama plėtojanti vamzdžio dalis į kurią patenka darbinėje kameroje panaudotas oro srautas. Difuzorius tolygiai sumažina srauto greitį, kad srauto kinetinė energija efektyviai būtų paverčiama slėgio energija.

Ventiliatorius sukuria oro srautą vamzdyje, pro tūtą įsiurbdamas orą iš aplinkos ir išpūsdamas panaudotą orą pro difuzorių atgal į aplinką.

1.1. Darbinė kamera

Darbinės kameros dydis priklauso nuo siekiamų aerodinaminio vamzdžio charakteristikų – tiriamų modelių matmenų, srauto greičio ir reikalingos srauto kokybės. Kameros dydis nulemia kokių modelių galima jame tirti ir kokius didžiausius Reinoldso skaičius galima pasiekti.

Kameros forma parenkama pagal tiriamų objektų pobūdį. Dažniausiai naudojama (ir paprasčiausios konstrukcijos) yra stačiakampio skerspjūvio forma. Bandant pastatų modelius, jų vidinio plotas turėtų sudaryti ne daugiau kaip 10 proc. kameros skerspjūvio ploto. Aviaciniams tyrimams naudojamų kamerų rekomenduojamas pločio ir aukščio santykis – 4/3 [1].

Rekomenduojama, jog slėgis darbinės kameros viduje būtų lygus išoriniam atmosferos slėgiui. Šiuo tikslu darbinės kameros ir difuzoriaus sankirtoje daroma nedidelė kiaurymė [1].

1.2. Tūta

Tūta yra siaurėjanti vamzdžio dalis kurioje oro srautas įgreitinamas ir sutolyginamas. Tūta pratekančio srauto pagreitėjimas ir vienalytiškumas priklauso nuo tūtos suspaudimo laipsnio C [2]. Tai yra santykis tarp tūtos plačiojo ir siaurojo galų skerspjūvių plotų:

$$C = \frac{S_{i\acute{e}j}}{S_{i\acute{s}e}j}. \quad (1)$$

čia: N – suspaudimo laipsnis; $S_{i\acute{e}j}$ – tūtos plačiojo galo skerspjūvio plotas; $S_{i\acute{s}e}j$ – tūtos siaurojo galo skerspjūvio plotas [1].

Didelis suspaudimo laipsnis padeda pasiekti tolygesnį ir kokybiškesnį srautą, tačiau siekiant, kad šis parametras būtų kuo aukštesnis, padidėja ir aerodinaminio vamzdžio matmenys.

Civiliniams ir pramoniniams tyrimams naudojamų aerodinaminių vamzdžių rekomenduojamos suspaudimo laipsnio vertės tarp 4,0 ir 6,0. Parinkus tinkamą tūtos formą, srauto nevienalytiškumo ir turbulentiškumo lygis gali siekti apie 2,0 proc. Stabilizavimo kameroje įrengus turbulencijos mažinimo ekraną, šis lygis gali nukristi iki 0,5 proc. Tokio srauto tolygumo dažnai pakanka atlikti daugeliui paprastesnių tyrimų. Aviaciniams tyrimams naudojamos didesnį (8,0 – 9,0) suspaudimo laipsnį turinčios tūtos. Toks santykis leidžia stabilizavimo kameroje įrengti du ar tris turbulencijos mažinimo ekranus nepatiriant didelių slėgio nuostolių [1].

Nuo tūtos formos priklauso srauto tolygumas. Parinkus netinkamą formą, tam tikrose tūtos vietose susidaro atvirkštinis slėgio gradientas, galintis sukelti pasienio sluoksnio atotrūkį.

1.3. Stabilizavimo kamera

Siekiant aukštos srauto kokybės, priešais tūtą įrengiama stabilizavimo kamera su įtaisais padedančiais stabilizuoti srautą. Dažniausiai naudojamos srauto tiesinimo grotelės (koriai) ir ekranai.

Korys veiksmingai sumažina skersinę turbulenciją, tačiau sukelia išilginę turbulenciją, kurios didumas priklauso nuo korio akutės skersmens. Korio storis turėtų būti bent jau 6 kartus didesnis už akutės skersmenį.

Išilginę turbulenciją reikšmingai sumažina slopinimo ekranai. Naudojant du ar tris ekranus galima sumažinti išilginės ir skersinės turbulencijos lygį iki 0,15 proc. [1].

Siekiant itin kokybiško srauto rekomenduojama stabilizavimo kameroje įrengti ir korį ir slopinimo ekranus. Tokiu atveju korys montuojamas priekyje (vieno–dviejų) ekranų.

1.4. Difuzorius

Difuzoriaus paskirtis yra atkurti statinį srauto slėgį. Naudojant difuzorių, tūtoje sumažėjęs statinis srauto slėgis srautui tekant plėtėjančiu vamzdžiu vėl sklandžiai grąžinamas į pirminį dydį.

Rekomenduojama, kad difuzoriaus pusiaukampinės dydis būtų mažesnis už $3,5^\circ$ [1]. Kadangi šioje vamzdžio dalyje siekiama kuo labiau sumažinti dinaminį slėgį, patartina imti maksimalią rekomenduojamą pusiaukampinių vertę ir difuzorių daryti kaip galima ilgesnį.

1.5. Ventilatorius

Ventilatorius palaiko pastovaus greičio oro tėkmę aerodinaminio vamzdžio viduje, kompensuodamas visus slėgio nuostolius, kylančius kituose aerodinaminio vamzdžio komponentuose. Pagrindiniai ventilatoriaus parametrai yra slėgio prieaugis – Δp , debitas – Q ir galingumas – P . Šie parametrai apskaičiuojami pagal formules [1]:

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho \cdot V^2 \cdot \zeta ; \quad (2)$$

$$Q = V \cdot S_{dk} ; \quad (3)$$

$$P = \Delta p \cdot \frac{Q}{\eta} . \quad (4)$$

čia: ρ – oro tankis; V – oro tėkmės greitis bandymų metu darbinėje kameroje; ζ – suminis slėgio nuostolių koeficientas; S_{dk} – darbinės kameros skerspjūvio plotas; η – ventilatoriaus naudingumo koeficientas.

2. TŪTOS VAIDMUO AERODINAMINIAME VAMZDYJE

2.1. Turbulentiškumas

Aerodinaminio vamzdžio tekančio oro srauto netolygumas nusakomas turbulentiškumu I . Šis dydis yra procentinis santykis tarp kvadratinio greičio svyravimų vidurkio ir vidutinio greičio:

$$I = \frac{v'}{v_{vid}}. \quad (5)$$

čia v' – kvadratinis greičio svyravimų vidurkis; v_{vid} – vidutinis greitis. [3]

Turbulencijos atsiradimo priežastis tėkmėje gali priklausyti nuo temperatūros, tankio ar greičio pertrūkių joje. Šitokie pertrūkiai tėkmėje gali kilti šalia kietojo kūno kaip tėkmės atsiskyrimo ar įsiliejančios pašalinės oro srovės rezultatas. Dėl dinaminio nestabilumo tokie pertrūkiai sudaro atskirus verpetus, kurie dėl oro klampumo susilieja į pilnai išsivysčiusį turbulentišką judėjimą. Netgi išilgai paviršiaus tekančioje tėkmėje dėl trinties susidaro pertrūkiai, kurie galiausiai lemia turbulentišką judėjimą. [7]

Aerodinaminiame vamzdyje oro tėkmės greitis ir kryptis bet kuriame pasirinktame taške turėtų būti statistiškai pastovūs – be ilgalaikių bei trumpalaikių svyravimų. Kitaip tariant, tėkmė turi būti be didelių sukurių ar greičio pokyčių, susijusių su pasienio sluoksnio atsiskyrimu nuo aerodinaminio vamzdžio sienų.

Turbulencija darbinėje kameroje neturėtų būti tapatinama su įprasta turbulencija vamzdinėje tėkmėje, kai Reinoldso skaičius viršija kritinę reikšmę. Tūta, įgreitindama į darbinę kamerą patenkančią orą, sukuria turintį ploną pasienio sluoksnį srautą, kurio greitis šerdyje tolygus. Kadangi darbinė kamera yra sąlyginai trumpa, pasienio sluoksnio augimas per visą jos ilgį nėra didelis. Dėl šios priežasties aerodinaminiame vamzdyje nesusidaro ilgiems vamzdžiams būdinga turbulentinė tėkmė. [7]

Tūta yra labiau efektyvi mažinant vidutines greičio variacijas nei išilginę turbulenciją. Vidutinio greičio variacijų sumažėjimą galima patvirtinti pritaikius tūta tekančiam netolygiam oro srautui Bernulio lygtį. [6] Bendraja prasme tūtoje skersinis turbulentiškumas yra sustiprinamas, o išilginis turbulentiškumas yra sumažinamas. Tūtos veikimo principas yra ištempti sukūrius, kurių ašys nukreiptos srauto kryptimi, ir suspausti sukūrius, kurių ašys nukreiptos statmenai srautui. Įprastai didelės tūtos gale skersinis srauto svyravimas yra du ar tris kartus didesnis už išilginį srauto svyravimą. Tačiau darbinėje kameroje išmatuotas išilginis srauto svyravimas paprastai būna didesnis nei skersinis srauto svyravimas¹. Srauto nepastovumas, kurį gali sukelti ventilatorius arba

¹ Pagal Wood ir Westphal (1987 m.) duomenis.

ritmingas pasienio sluoksnio atsiskyrimas, dažnai pasireiškia kaip žemo dažnio vibracija, kuri labiausiai prisideda prie išilginio srauto svyravimo. Dėl to, kad darbinėje kameroje išilginis srauto svyravimas būna didesnis, yra laikoma, jog tūtoje pakanka užtikrinti mažą išilginio srauto svyravimą, o skersinis svyravimas turėtų būti žemesnis. Tačiau kalibruojant aerodinaminį vamzdį srauto svyravimas turėtų būti išmatuojamas visomis kryptimis.

2.2. Suspaudimo laipsnis

Didelis tūtos suspaudimo laipsnis lemia mažą srauto greitį stabilizavimo kameroje, o tai leidžia stabilizavimo kameroje įrengti keletą slopinimo ekranų, išvengiant didelių slėgio nuostolių. [7] Kadangi slopinimo ekranų sukeliama vietinis dinaminis slėgis stabilizavimo kameroje yra atvirkščiai proporcingas tūtos suspaudimo laipsnio kvadratui, didelis suspaudimo laipsnis yra naudingas. [1] Tačiau didelis tūtos suspaudimo laipsnis padidina aerodinaminio vamzdžio gamybos ir eksploatacijos kainą. Taip pat esant dideliame tūtos suspaudimo laipsniui gali atsirasti didesnis triukšmas ir tėkmės atsiskyrimas tūtos siaurajame gale. Dėl to mažiems aerodinaminiam vamzdžiams, kurių darbinės kameros skerspjūvio plotas mažesnis nei $0,5 \text{ m}^2$, o srauto greičiai mažesni kaip 40 m/s optimalus tūtos suspaudimo laipsnis yra tarp šešių ir dešimties. [4] [6]

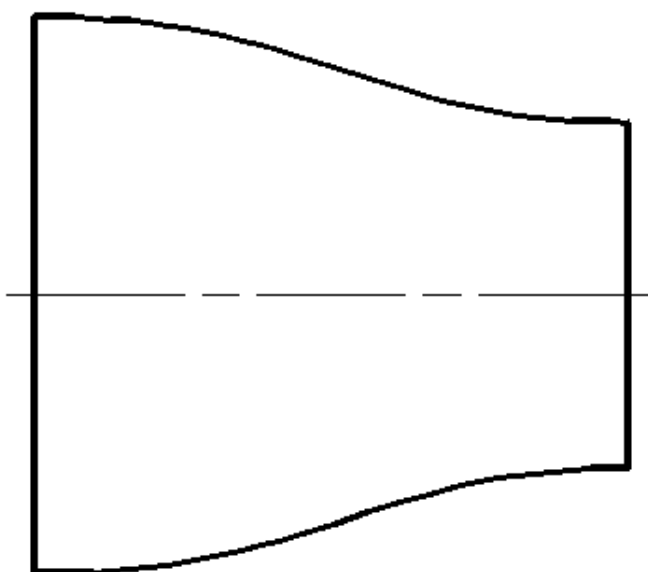
2.3. Skerspjūvio forma

Bet kokioje ne apskrito skerspjūvio tūtoje tėkmė, šalia tūtos sienelių linkusi pasislinkti skersai tėkėjimo kryptimi. [3] Šis reiškinys ypač ryškus šalia daugiakampio skerspjūvio kampų. Bet kokių atveju, pasienio sluoksnis šalia kampų yra labiau linkęs atsiskirti dėl labai žemų greičių šiose vietose. Taip pat kampuose dažniau susidaro skersinės ir antrinės tėkmės. Tačiau tyrimai rodo, kad net ir keturkampio skerspjūvio tūtose kampuose susidarantis srauto netolygumas lokalizuojasi ir reikšmingai nepaveikia darbinės kameros srauto². [6] Taip pat tyrimai rodo, jog pasienio sluoksnio poslinkis netolygiai kintamo kvadratinio skerspjūvio tūtoje gali būti sumažintas kampuose įrengus mažas 45° nuožulas. [3]

² Mehta (1978 m.) tyrimų duomenimis.

2.4. Tūtos kontūro forma

Tiksli tūtos kontūro forma nėra labai svarbi, išskyrus tūtos galus. Daug svarbiau už tikslus matmenis yra tai, jog kontūro forma būtų sklandi. Aukštesnės kokybės aerodinaminiam vamzdžiui naudojama netolygiai kintanti kontūro forma, kuri apibrėžiama trečio ar net penkto laipsnio polinominėmis kreivėmis (2 pav.). Tikslūs kreivę apibrėžiantys kintamieji gali būti apskaičiuojami teoriškai, naudojant sudėtingus skaičiavimo algoritmus arba nustatomi eksperimentiškai. Paprastai aerodinaminiam vamzdžiui gali būti taikomas ir laisvas kontūro formos parinkimas „iš akies“, laikantis rekomendacijos, jog tūtos plačiajame gale kreivės kreivumo spindulys turėtų būti didesnis už kreivumo spindulį siaurajame gale. [3]



2 pav. Netolygiai kintamo skerspjūvio tūta

Kadangi projektuojant aerodinaminį vamzdį siekiama, jog pasienio sluoksnio storis būtų kuo mažesnis, tūtos ilgis turėtų būti kuo mažesnis. Tačiau, kaip jau buvo minėta, trumpinant tūtą iškyla pasienio sluoksnio atsiskyrimo grėsmė. Ši grėsmė kyla dėl tūtos galuose susidarantių atvirkštinio slėgio gradiento regionų. [6] Konstrukcija, tenkinanti visus kriterijus būtų tokia, jog oro tėkmės atsiskyrimo būtų vos išvengta, o tūtos siaurojo galo srauto netolygumas būtų lygus maksimaliam lygiui, kuris yra leistinas projektuojamam aerodinaminiam vamzdžiui. Paprastai už pasienio sluoksnio ribų šis lygis yra ne daugiau kaip 1 proc. srauto išilginio greičio variacijos. [3] [4]

2.5. Tūtos dizaino kriterijai

Apibendrinant galima teigti, kad literatūroje aerodinaminio apie vamzdžio tūtos geometriją akcentuojami šie aspektai:

1. tūta padidina srauto vidutinį greitį darbinėje kameroje, kas leidžia korį ir slopinimo ekranus patalpinti mažo srauto greičio srityje, taip sumažinant slėgio nuostolius aerodinaminiam vamzdyje;
2. tūta sumažina srauto greičio variacijas vamzdyje;
3. tūtos dizainas ir geometrinė forma koncentruojasi į oro tėkmės atsiskyrimo vengimą;
4. projektuojant tūtą siekiama, kad tūtos siaurajame gale būtų kuo mažesnis pasienio sluoksnio storis.

3. NUPJAUTINĖS KVADRATINĖS PIRAMIDĖS FORMOS TŪTA

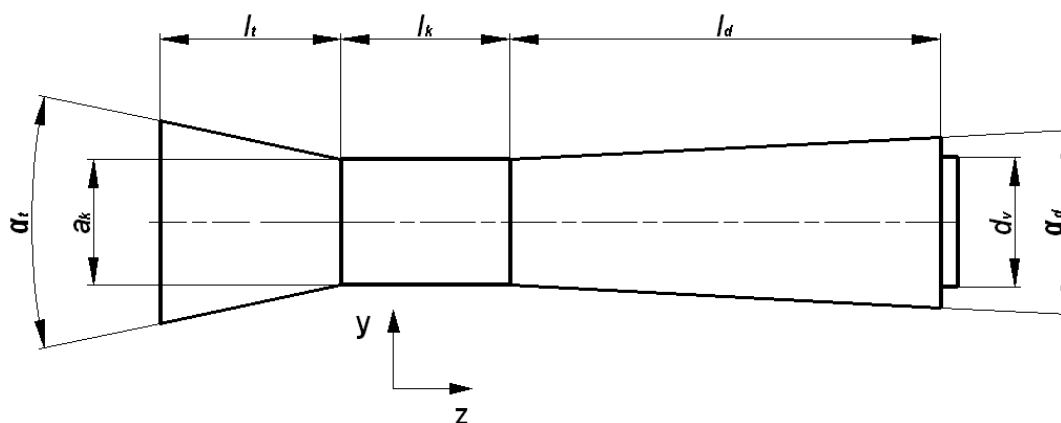
Šioje tyrimo dalyje naudojant kompiuterinę modeliavimo programą, siekiama įvertinti nupjautinės kvadratinės piramidės formos tūtos geometriųjų parametų įtaką atviro tipo aerodinaminio vamzdžio srauto kokybei esant skirtingiems srauto greičiams. Pagrindiniais geometriniais parametrais pasirinkti tūtos suspaudimo laipsnis ir tūtos ilgis.

Aerodinaminio vamzdžio parametrai tiriami *Solidworks* programa, naudojant *Cosmos FloWorks* skaičiavimų paketą. Šiam tikslui, remiantis kitų autorių publikuotomis rekomendacijomis, sukuriamas ir baigtinių elementų metodu tiriamas kompiuterinis aerodinaminio vamzdžio modelis.

3.1. Aerodinaminio vamzdžio modelis

Aerodinaminis vamzdis sukonstruotas iš trijų dalių: darbinės kameros, difuzoriaus ir tūtos. Numatoma, jog visi aerodinaminio vamzdžio komponentai turės kvadrato formos skerspjūvį. Kadangi tiriama tik tūtos geometrijos įtaka, keičiami tik tūtos matmenys – darbinės kameros ir difuzoriaus geometrija viso tyrimo metu išlieka nepakitusi. Aerodinaminio vamzdžio vidinių sienų šiurkštumas $Ra = 0,8 \mu\text{m}$. Aerodinaminio vamzdžio kompiuterinio modelio schema pateikiama 3 paveiksle, o sukurtas modelis 5 paveiksle.

Darbinės kameros matmenys nustatomi pagal numatomų tirti modelių matmenis. Kadangi aerodinaminis vamzdis skirtas sausumos transporto tyrimams, pasirenkami vieno populiariausių mastelių automobilių modeliai – 1:24. Tokio mastelio modelių galima nesunkiai įsigyti ir jie yra pakankamai detalūs. Rekomenduojama, kad automobilio modelio (ar kito tiriamo kūno) midelio plotas sudarytų ne daugiau kaip 10 proc. darbinės kameros ploto. [1] Remiantis šia rekomendacija, darbinės kameros skerspjūvio plotas turėtų būti apie $0,05 \text{ m}^2$. Kameros ilgis pasirenkamas laisvai, taip kad į jį tilptų automobilio modelis.



3 pav. Aerodinaminio vamzdžio kompiuterinio modelio schema

Sumodeliuotos darbinės kameros matmenys:

- skerspjūvio plotas $S_k = 0,05 \text{ m}^2$;
- skerspjūvio kraštinės ilgis $a_k = 0,225 \text{ m}$;
- ilgis $l_k = 0,60 \text{ m}$.

Difuzoriaus matmenys pasirenkami atsižvelgiant į rekomendaciją, jog jo išplatėjimo kampas nebūtų didesnis kaip septyni laipsniai [1]. Difuzoriaus ilgis pasirenkamas laisvai, o jo gale sumodeliuojama apskrita anga, imituojanti ventiliatorių.

Sumodeliuoto difuzoriaus matmenys:

- išplatėjimo kampas $\alpha_d = 6^\circ$;
- ventiliatoriaus skersmuo $d_v = 0,4 \text{ m}$;
- difuzoriaus ilgis $l_d = 2,0 \text{ m}$.

Tūtos kontūro profiliui pasirinkta tiesi linija, be sklendaus perėjimo į darbinę kamerą. Tūtos geometrija keičiama dvejais skirtingais atvejais. Pirmuoju atveju palaipsniui keičiamas tūtos suspaudimo laipsnis, išlaikant pastovų tūtos susiaurėjimo kampą, o antruoju atveju suspaudimo laipsnis palaipsniui keičiamas išlaikant pastovų tūtos ilgį. Sumodeliuotos tūtos matmenys pateikiami 1 ir 2 lentelėse.

Lentelė nr. 1 – Tūtos matmenys pirmuoju modeliavimo atveju

Suspaudimo laipsnis C	Susiaurėjimo kampas $\alpha_t, ^\circ$	Tūtos ilgis l_t, mm
3	24	387
4	24	529
5	24	654
6	24	767
7	24	871
8	24	968
9	24	1059
10	24	1144
11	24	1226

Lentelė nr. 2 – Tūtos matmenys antruoju modeliavimo atveju

Suspaudimo laipsnis C	Susiaurėjimo kampas $\alpha_t, ^\circ$	Tūtos ilgis l_t, mm
3	23,9	390
4	32,2	390
5	39,3	390
6	45,4	390
7	50,8	390
8	55,6	390
9	60	390
10	63,9	390
11	67,5	390

3.2. Skaičiavimo schema

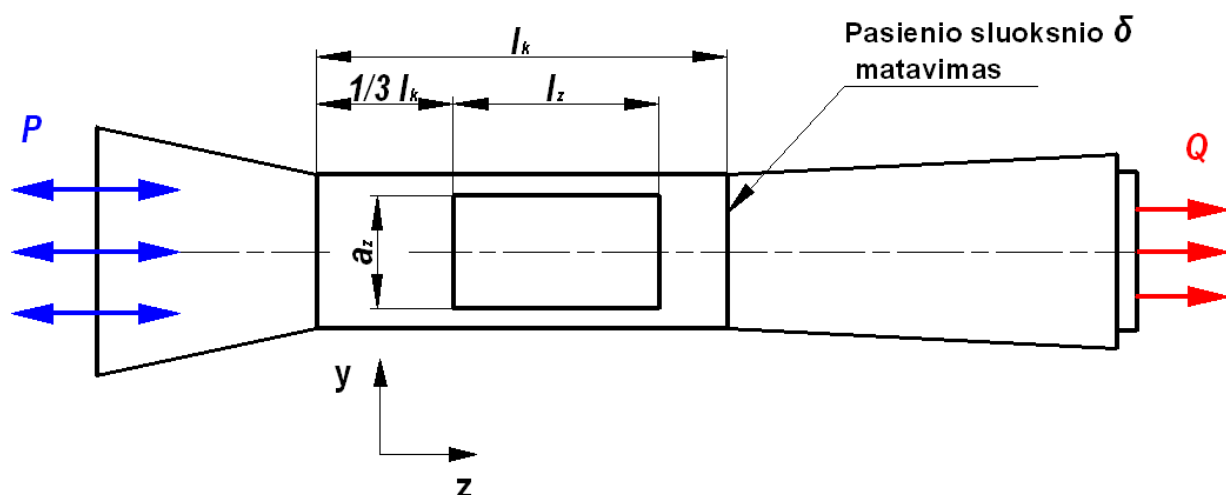
Tyrimo metu dėmesys skiriamas oro srauto charakteristikoms darbinėje kameroje. Numatoma darbinėje kameroje ištirti šias srauto charakteristikas:

- vidutinį srauto greitį v ;
- srauto turbulentiškumo lygį I ;
- pasienio sluoksnio storį δ .

Siekiant nustatyti srauto greitį ir turbulentiškumą, darbinėje kameroje apibrėžiama kvadratinio skerspjūvio zona, kurioje tiriamas oro srauto netolygumas ir greitis. Zonos matmenys ir pozicija parinkta taip, kad joje būtų išvengta srauto greičio kitimo prie kameros sienų dėl pasienio sluoksnio ir srauto netolygumo kameros žiotyse (žr. 4 pav.).

Tiriamos zonos matmenys:

- skerspjūvio plotas $S_z = 0,027 \text{ m}^2$;
- skerspjūvio kraštinės ilgis $a_z = 0,165 \text{ m}$;
- ilgis $l_z = 0,30 \text{ m}$.



4 pav. Aerodinaminio vamzdžio skaičiavimo schema

Turbulentiškumo lygis I ir srauto vidutinis greitis v pasirinktoje zonoje apskaičiuojami Solidworks programos FloWorks papildiniu, nustatymuose juos pasirinkus kaip pageidaujamus sužinoti rezultatus. Pasienio sluoksnio storis δ nustatomas darbinės kameros ir difuzoriaus sankirtoje, kadangi šioje vietoje pasiekama maksimali pasienio sluoksnio storio vertė. Šiuo tikslu, galinėje darbinės kameros dalyje, y ašies kryptimi (4 pav.), naudojant FloWorks “insert XY plot” funkciją surenkami duomenys apie srauto greitį priklausomai nuo atstumo nuo kameros sienos. Pasienio sluoksnio storį apibrėžia atstumas nuo kameros sienos, kuriame srauto greitis yra lygus 99 proc. laisvojo srauto greičio (šiuo atveju – vidutinio srauto greičio zonoje).

Skaičiavimai atliekami laikant, jog vamzdžiu tekančios dujos yra oras, kurio atmosferinis (statinis) slėgis tūtos žiotyse $P = 101\,325$ Pa, temperatūra $T = 293,2$ K, tankis $\rho = 1,205$ kg/m³, kinematinis klampumas $\nu = 15,11 \cdot 10^{-6}$ m²/s, o tėkmės tipas laminarinis ir turbulentinis. Turbulentiškumas tūtos plačiajame gale lygus 2 proc. Šie pradiniai duomenys nustatomi prieš atliekant tyrimą ir kiekvienos simuliacijos metu lieka pastovūs.

Difuzoriaus galinėje dalyje, apskritame plote sukuriamas norimam srauto greičiui pasiekti reikalingas pastovaus dydžio debitas Q . Debito reikšmė apskaičiuojama pagal formulę (3). Ventilatoriaus parametrai nevertinami ir laikoma, jog ventilatorius užtikrina reikiamą debitą neatsižvelgiant į kintamus vamzdžio matmenis ir slėgio nuostolius. Tyrimas atliekamas esant trims skirtingoms debito reikšmėms (lentelė nr. 3). Taip siekiama įvertinti tūtos efektyvumą esant skirtingiems srauto greičio reikšmėms. Taip pat apskaičiuojami Reinoldso skaičiai esant skirtingiems srauto greičiams. Reinoldso skaičiai priklauso nuo vamzdžio hidraulinio skersmens (esant kvadratiniam skerspjūviui jis lygus skerspjūvio kraštinės ilgiui [8]), oro kinematinio klampumo ir srauto greičio:

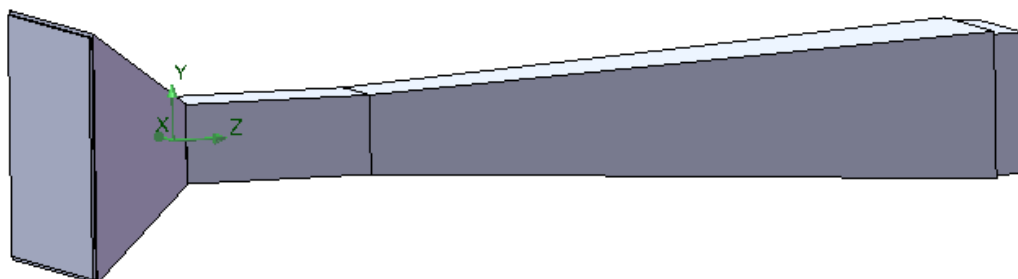
$$Re = \frac{v \cdot d_H}{\nu} \quad (6)$$

čia: Re – Reinoldso skaičius; v – srauto greitis, m/s; ν – oro kinematinis klampumas, m²/s [9]

lentelė nr. 3 – Debitas reikalingas srauto greičiui kameroje pasiekti

v , km/h	v , m/s	Q , m ³ /s	Re
150	41,7	2,11	620450
90	25,0	1,27	372270
50	13,9	0,70	206817

Kadangi visais greičiais Reinoldso skaičius viršija 4000, galima teigti, jog darbinėje kameroje vyrauja turbulentinė tėkmė. [9]

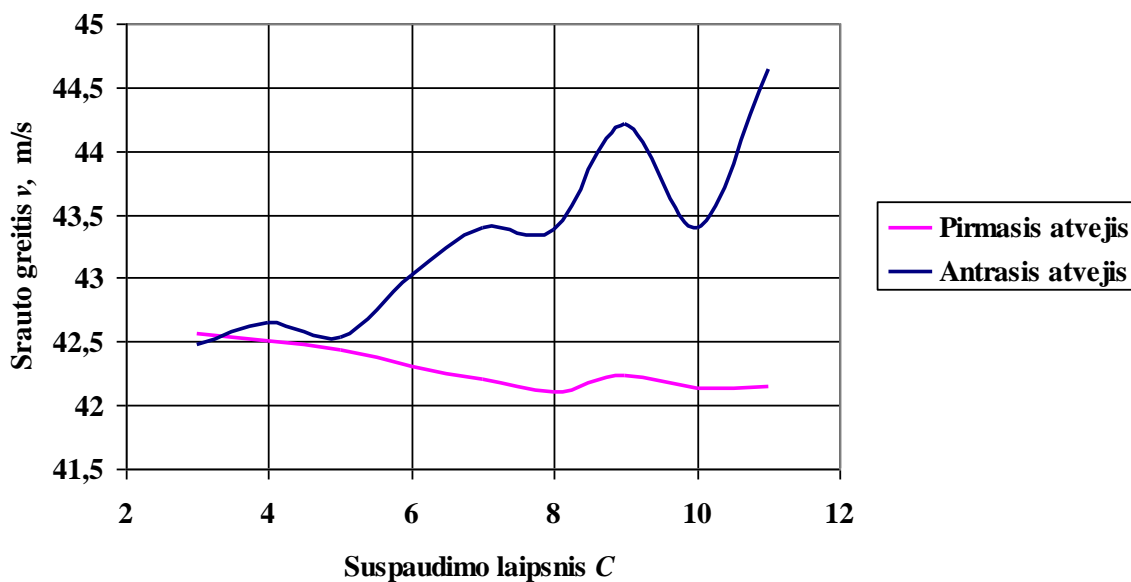


5 pav. Kompiuterinis aerodinaminio vamzdžio su nupjautinės kvadratinės piramidės formos tūta modelis

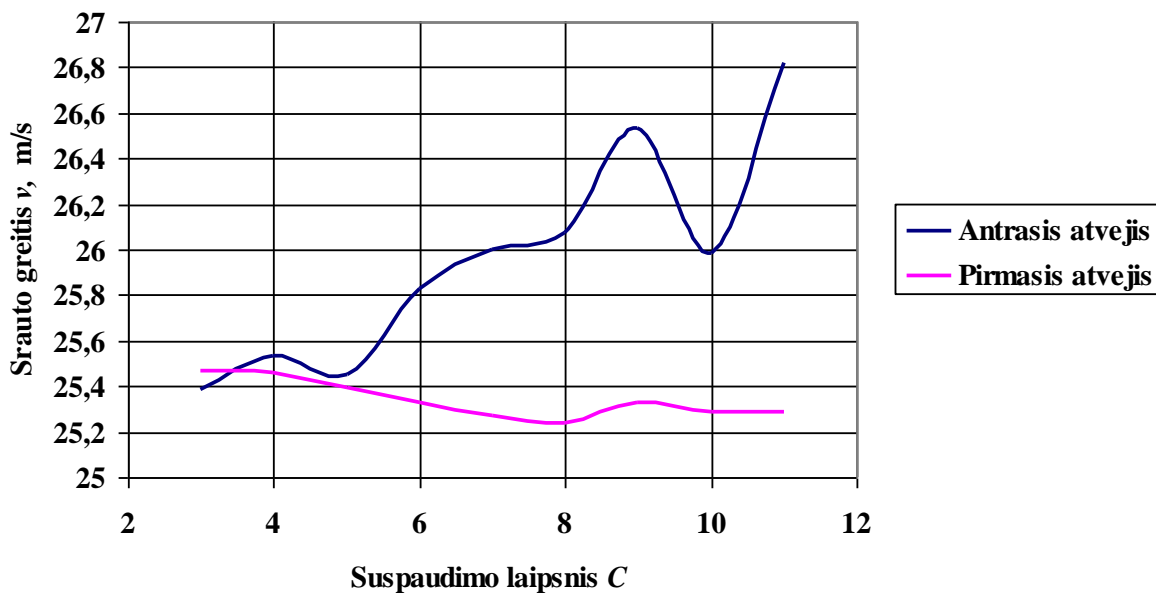
3.3. Rezultai

3.3.1. Srauto greitis

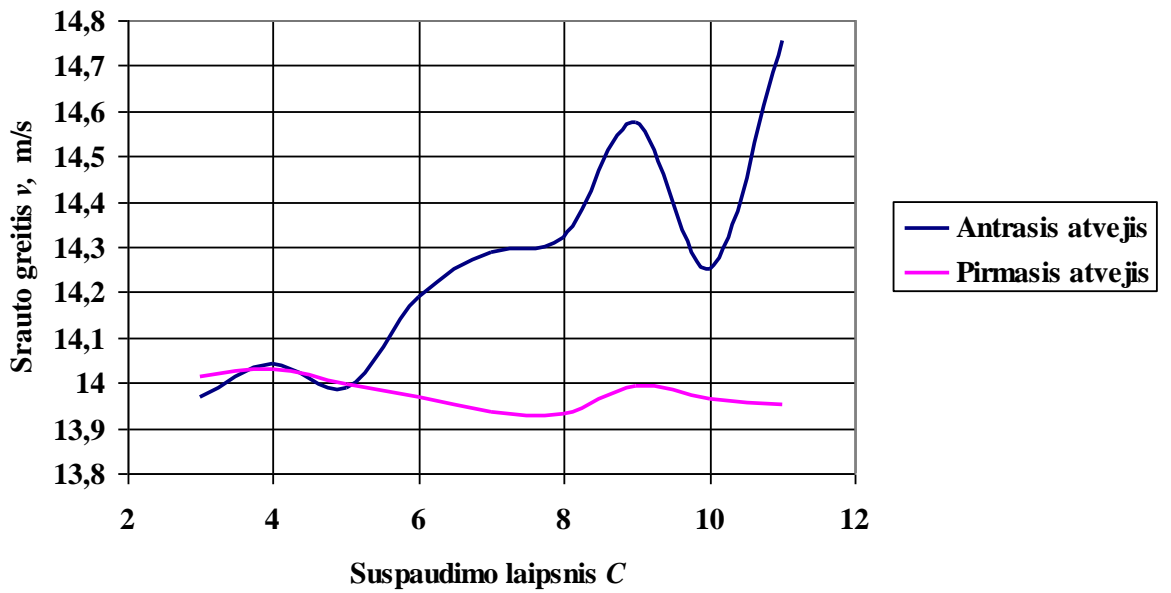
Šiame skyriuje apžvelgiami vidutinio srauto greičio v darbinėje kameroje modeliavimo rezultatai. Gauti duomenys suskirstyti pagal tris skirtingas debito reikšmes ir pateikti grafikų pavidalu (6, 7 ir 8 pav.).



6 pav. Vidutinio greičio kitimas kai debitas $Q = 2,11 \text{ m}^3/\text{s}$



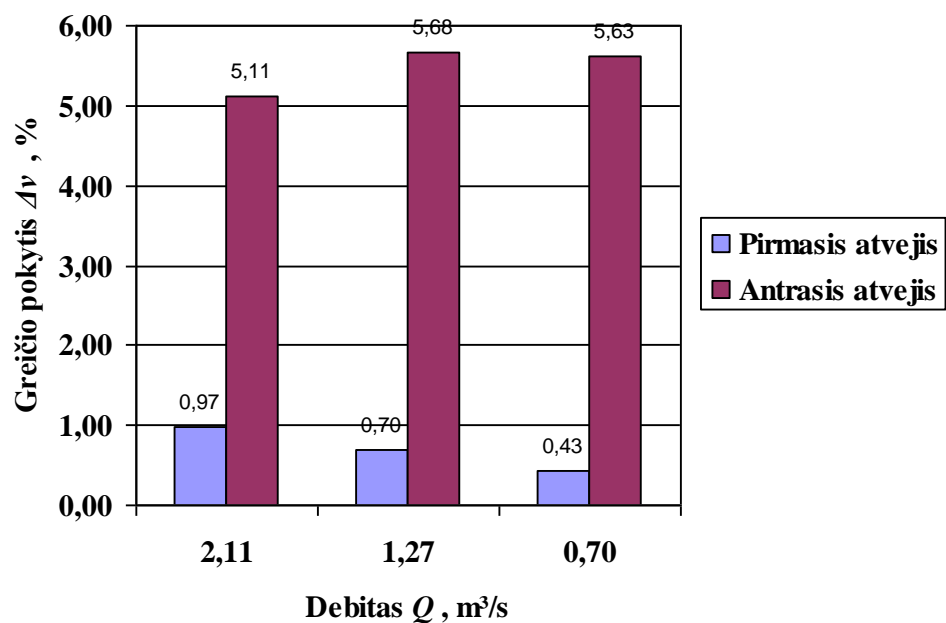
7 pav. Vidutinio greičio kitimas kai debitas $Q = 1,27 \text{ m}^3/\text{s}$



8 pav. Vidutinio greičio kitimas kai debitas $Q = 0,70 \text{ m}^3/\text{s}$

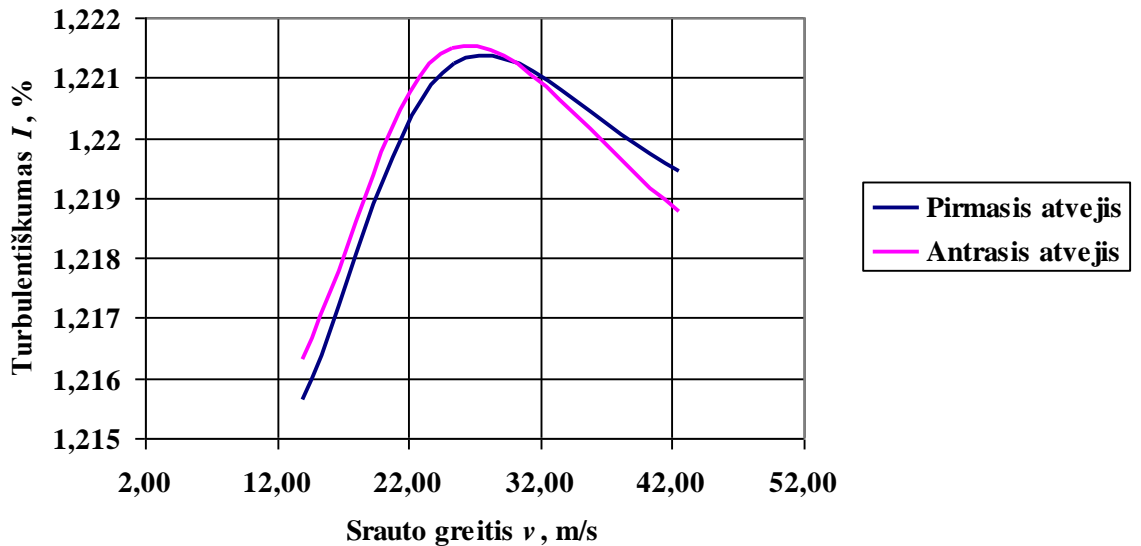
Iš grafikų matyti, jog greičio kitimo kreivės esant skirtingam debitui yra labai panašios. Pirmuoju atveju didinant suspaudimo laipsnį srauto greitis beveik tolygiai mažėja, o antruoju atveju netolygiai svyruodamas didėja. Ypač ryškus skirtumas tarp devinto ir dešimto suspaudimo laipsnių.

Pirmuoju atveju greitis tarp mažiausio ir didžiausio suspaudimo laipsnio kinta nežymiai – nuo 0,43 proc., kai debitas mažiausias, iki 0,97 proc., kai debitas didžiausias (9 pav.) Antruoju atveju greitis išauga nuo 5,11 proc., kai debitas didžiausias iki 5,68 proc., kai debitas lygus $1,27 \text{ m}^3/\text{s}$.

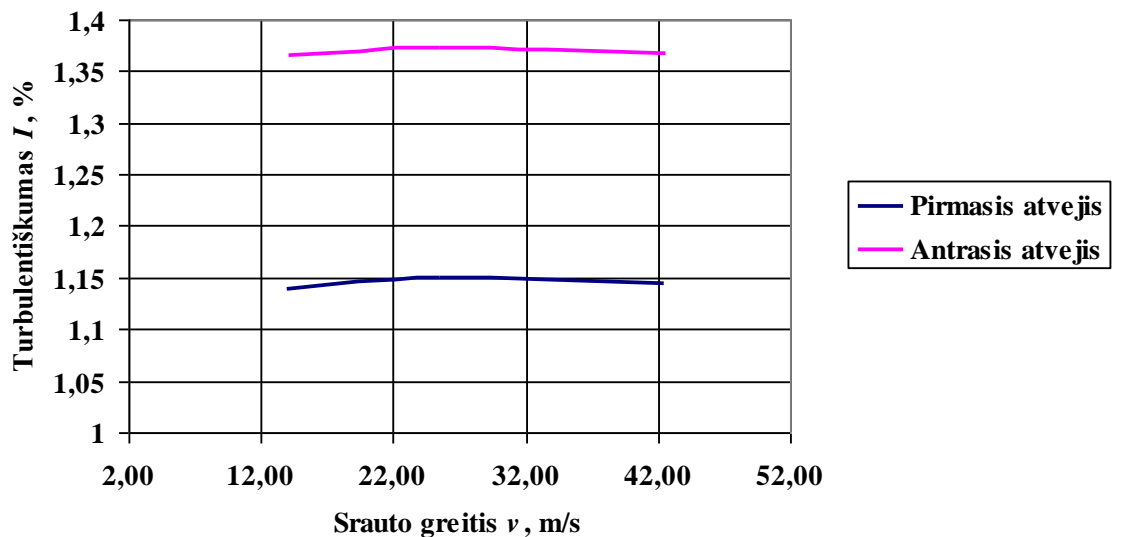


9 pav. Santykinis vidutinio greičio pokytis tarp kraštinių suspaudimo laipsnio verčių

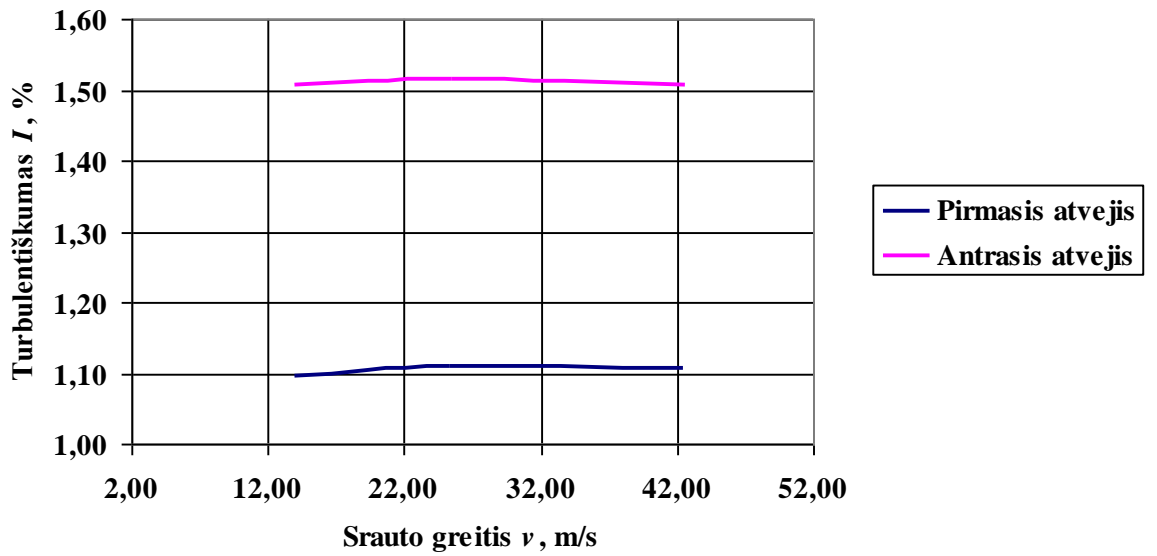
10-18 paveiksluose pateikiama turbulentiškumo priklausomybė nuo vidutinio srauto greičio esant devyniems skirtingiems suspaudimo laipsniams. Iš grafikų matyti, jog kintant srauto greičiui, turbulentiškumas išlieka beveik nepakitęs kai suspaudimo laipsnis yra tarp 3 ir 8. Kai suspaudimo laipsnis viršija 8, turbulentiškumas, didėjant greičiui taip pat išauga. Augimas ryškesnis kintamo ilgio tūtoje.



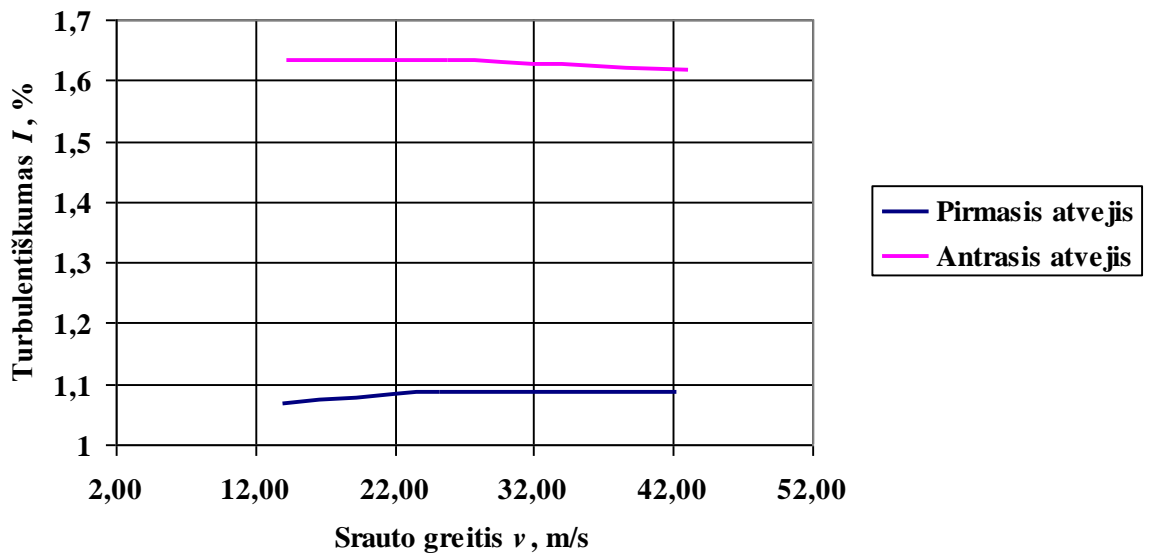
10 pav. Turbulentiškumo priklausomybė nuo srauto greičio kai suspaudimo laipsnis $C = 3$



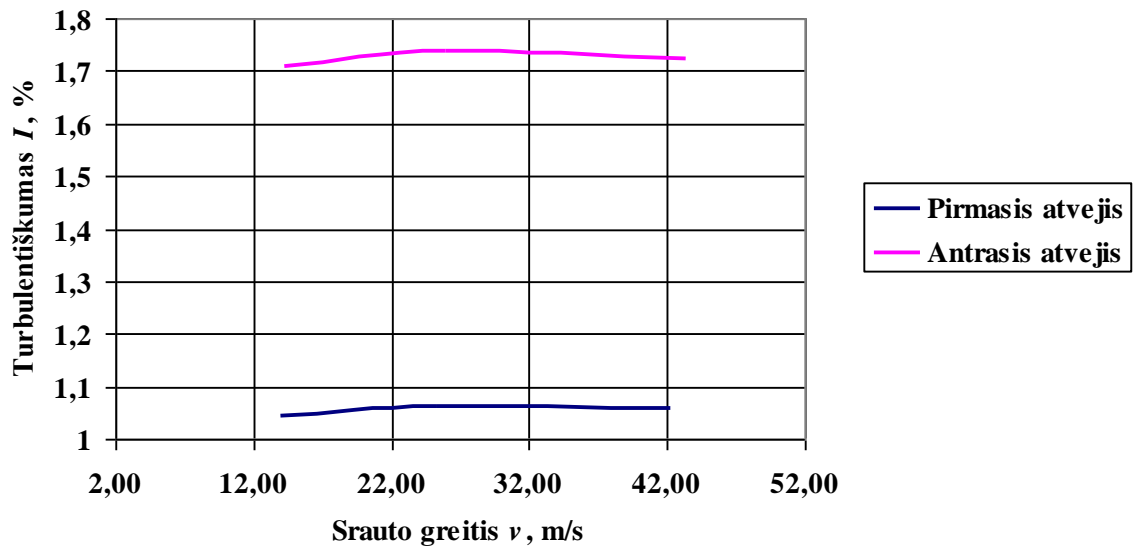
11 pav. Turbulentiškumo priklausomybė nuo srauto greičio kai suspaudimo laipsnis $C = 4$



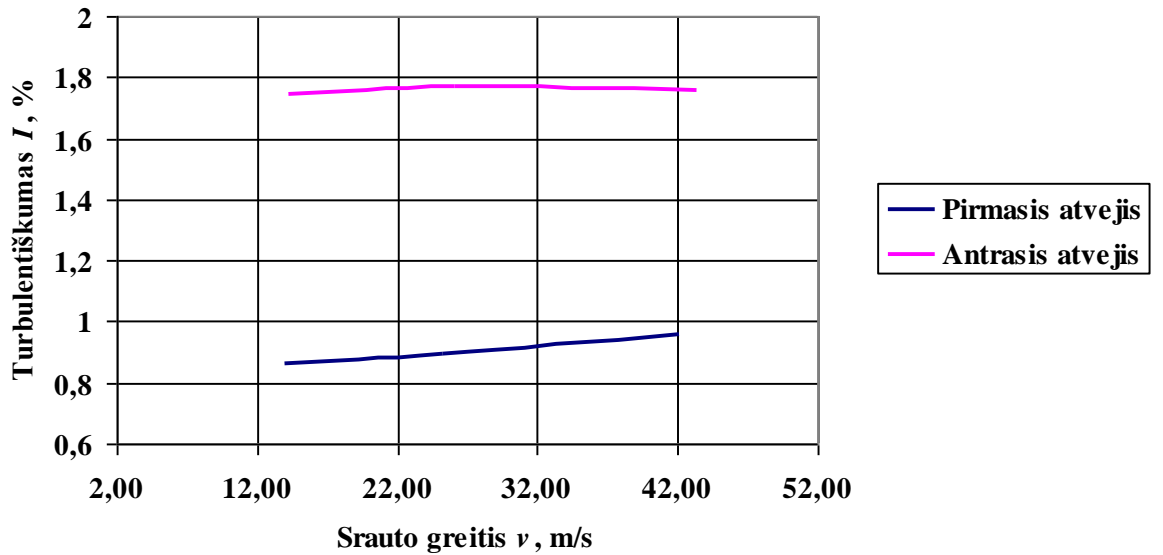
12 pav. Turbulentiškumo priklausomybė nuo srauto greičio kai suspaudimo laipsnis $C = 5$



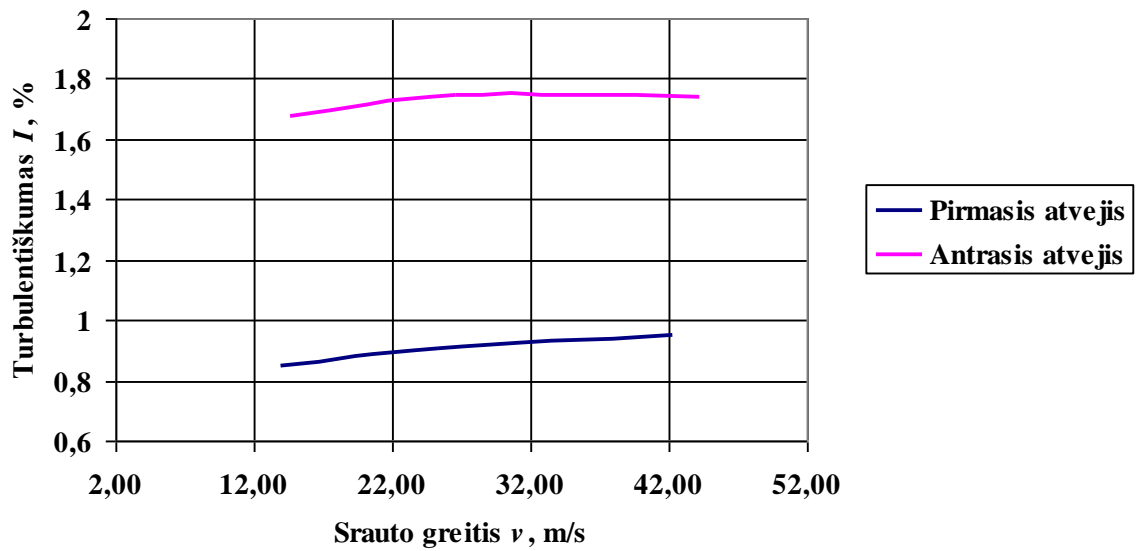
13 pav. Turbulentiškumo priklausomybė nuo srauto greičio kai suspaudimo laipsnis $C = 6$



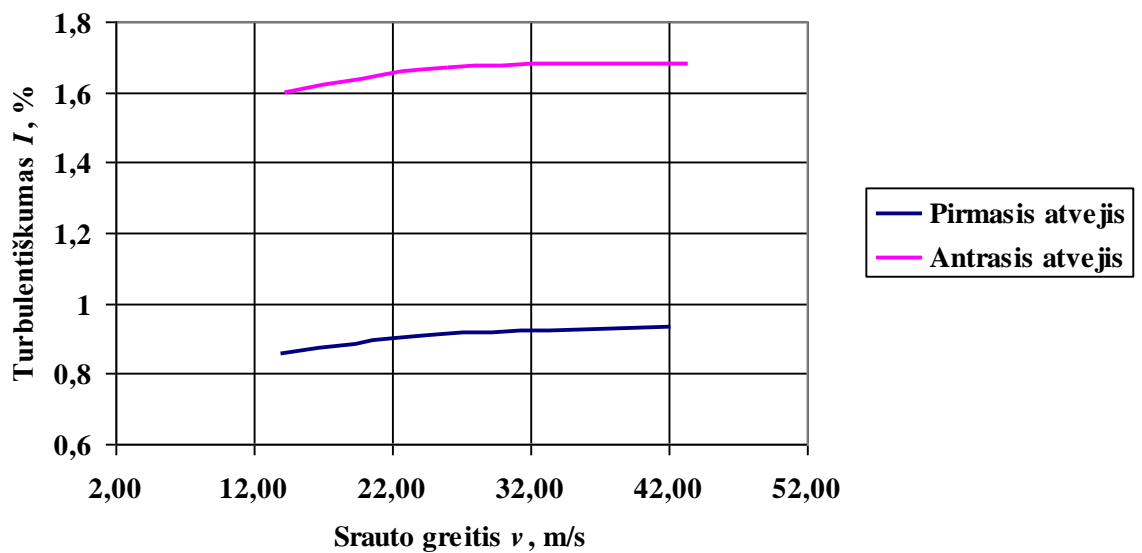
14 pav. Turbulentiškumo priklausomybė nuo srauto greičio kai suspaudimo laipsnis $C = 7$



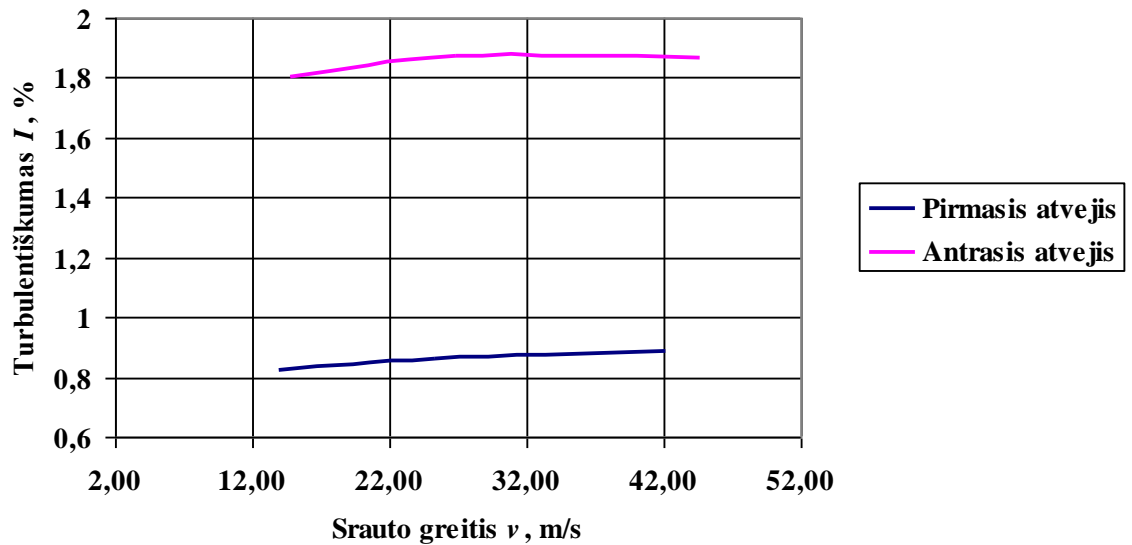
15 pav. Turbulentiškumo priklausomybė nuo srauto greičio kai suspaudimo laipsnis $C = 8$



16 pav. Turbulentiškumo priklausomybė nuo srauto greičio kai suspaudimo laipsnis $C = 9$



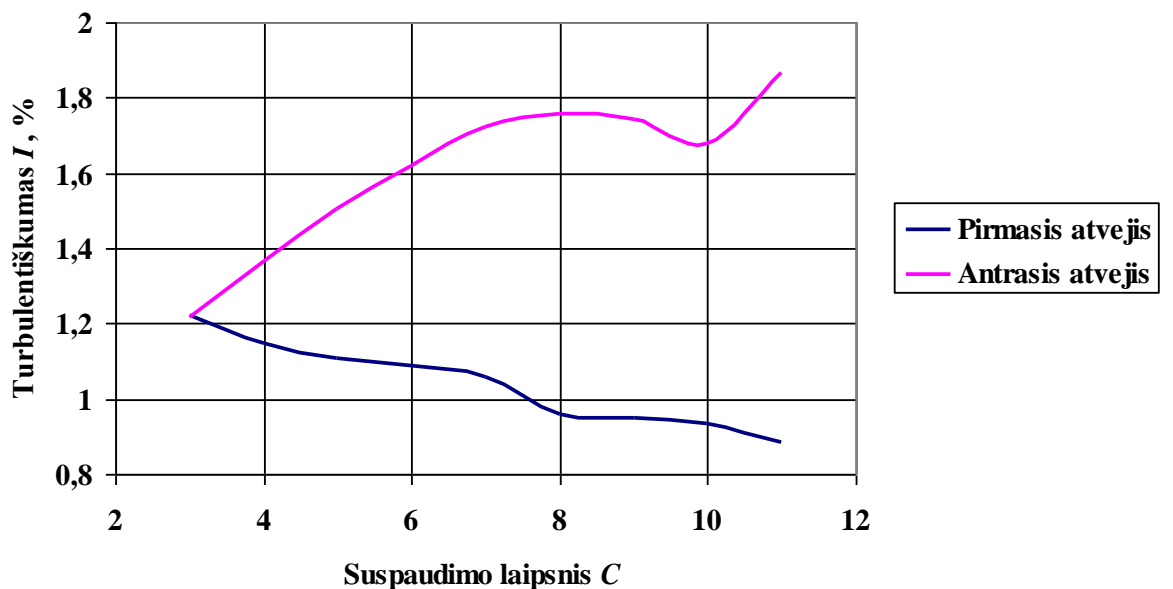
17 pav. Turbulentiškumo priklausomybė nuo srauto greičio kai suspaudimo laipsnis $C = 10$



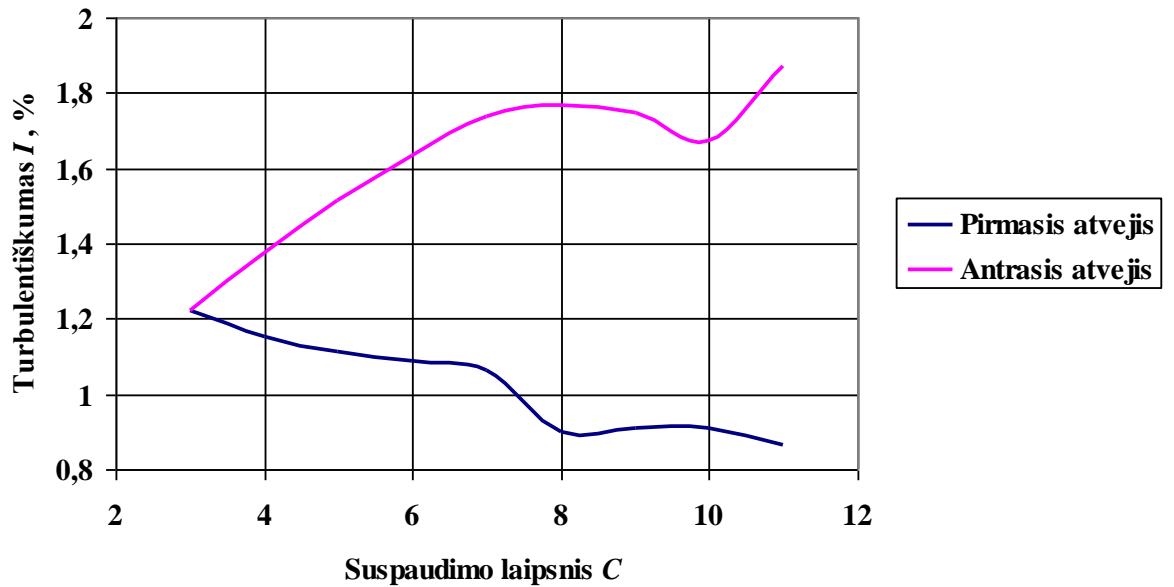
18 pav. Turbulentiškumo priklausomybė nuo srauto greičio kai suspaudimo laipsnis $C = 11$

3.3.2. Srauto turbulentiškumas

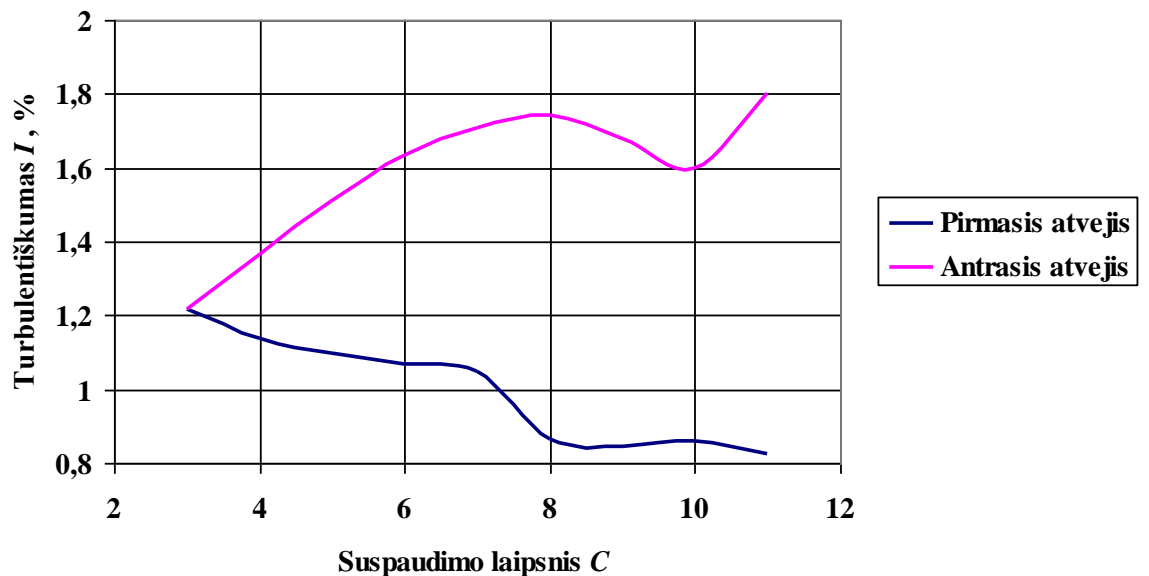
Turbulentiškumo lygio I priklausomybė nuo tūtos suspaudimo laipsnio C pateikiama 19, 20 ir 21 pav. Kaip ir srauto greičio kitimo atveju, visi grafikai tarpusavyje panašūs. Esant pastoviam tūtos siaurėjimo kampui, didinant tūtos suspaudimo laipsnį, turbulentiškumas mažėja nuo 1,22 proc. iki 0,88-0,82 proc. Didžiausias turbulentiškumo sumažėjimas pastebimas esant mažiausiam debitui. Išlaikant pastovų tūtos ilgį ir didinant tūtos suspaudimo laipsnį, turbulentiškumas didėja nuo 1,22 proc. iki 1,80-1,87 proc. Atsižvelgiant į vamzdžio debitą, antruoju atveju labiausiai turbulentiškumas kinta, kai debitas yra lygus $1,27 \text{ m}^3/\text{s}$.



19 pav. Turbulentiškumo kitimas kai debitas $Q = 2,11 \text{ m}^3/\text{s}$



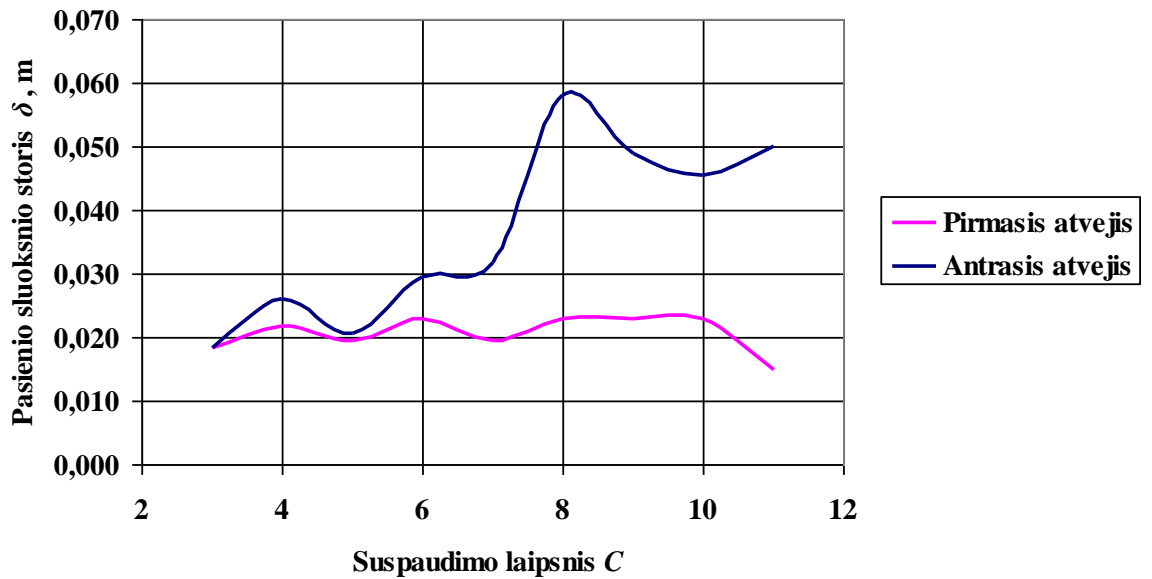
20 pav. Turbulentiškumo kitimas kai debitas $Q = 1,27 \text{ m}^3/\text{s}$



21 pav. Turbulentiškumo kitimas kai debitas $Q = 0,70 \text{ m}^3/\text{s}$

3.3.3. Pasienio sluoksnis

Kadangi iš srauto greičio ir turbulentiškumo duomenų matyti, jog debito įtaka yra mažai reikšminga, o pasirinktas pasienio sluoksnio storio nustatymo metodas yra apytikslis, šis parametras apskaičiuojamas tik esant didžiausiai debito reikšmei $Q = 2,11 \text{ m}^3/\text{s}$. Nustatytas pasienio sluoksnio storis pirmu ir antru tūtos geometrijos kitimo atvejais pateikiamas 22 pav.



22 pav. Pasienio sluoksnio storio kitimas nuo suspaudimo laipsnio

Iš grafiko matyti, jog pirmuoju atveju pasienio sluoksnis didinant suspaudimo laipsnį, kinta nežymiai – nuo 18 iki 23 mm. Kai suspaudimo laipsnis lygus vienuolikai, pastebimas staigus pasienio sluoksnio suplonėjimas iki 14 mm. Antruoju atveju pasienio sluoksnis kinta nuo 18 iki 58 mm, didžiausią storį pasiekdamas esant suspaudimo laipsniui $C = 8$. Ir pirmu ir antru atveju pastebima netolygi duomenų sklaida.

3.4. Duomenų analizė

Iš srauto vidutinio greičio grafikų matyti, jog didinant tūtos suspaudimo laipsnį, kai išlaikomas pastovus susiaurėjimo kampas, greitis kameroje apytiksliai sumažėja iki 1 proc. Nors greičio kritimas ir nedidelis, jį būtų galima laikyti oro trinties pasekme. Didinant tūtos suspaudimo laipsnį didėja ir jos ilgis. Esant didesniai ilgiui padidėja paviršiaus, kurį apteka oras, plotas, todėl kyla didesni slėgio nuostoliai, lemiantys srauto greičio mažėjimą. Šis sumažėjimas ryškiausias esant didžiausiam debitui, kadangi, kaip žinoma iš aerodinamikos pagrindų, oro trinties jėga yra proporcinga oro srauto greičiui.

Didinant tūtos suspaudimo laipsnį pirmuoju atveju, srauto turbulentiškumas darbinėje kameroje sumažėja žemiau 1 proc. ribos. Tai patvirtina antrajame skyriuje pateiktą informaciją, jog kuo didesnis suspaudimo laipsnis ir ilgesnė tūta, tuo geriau išlyginamas srautas. Taip pat pastebima, kad kai suspaudimo laipsnis yra 8 ir daugiau, esant mažesniai srauto greičiui, jo turbulentiškumas taip pat mažesnis – esant mažesniai Reinoldso skaičiui sraute kyla mažiau tėkmės netolygumų.

Pasienio sluoksnio storis pirmuoju tūtos geometrijos keitimo atveju, esant skirtingam suspaudimo laipsniui didėja 4-5 mm, tačiau duomenų pasiskirstymas netolygus (ypač ryškus staigus pasienio sluoksnio suplonėjimas, kai suspaudimo laipsnis lygus 11). Dėl tokio duomenų pasiskirstymo, galima teigti, jog pasirinktas metodas pasienio sluoksnio storiui nustatyti nėra tikslus.

Antruoju atveju, kai tūtos suspaudimo laipsnis didinamas esant pastoviam tūtos ilgiui, pastebimas apie 5 proc. greičio prieaugis (nors duomenys pasiskirstę gana netolygiai). Šį greičio padidėjimą galima būtų susieti su padidėjusiu pasienio sluoksnio storiu, dėl kurio sumažėja laisvai pratekančio srauto skerspjūvio plotas. Pagal Bernulio dėsnį, sumažėjus pratekamam plotui išauga pratekančio srauto greitis. Kadangi turbulentiškumas darbinėje kameroje šiuo atveju taip pat didėja (iki 1,9 proc., kas yra artima nustatytam 2 proc. turbulentiškumui tūtos žiotyse), galima teigti, jog mažo ilgio tūta sukelia didesnę srauto turbulentiškumą tiek laisvajame sraute, tiek pasienio sluoksnyje. Kaip minėta antrajame skyriuje, mažas tūtos ilgis sudaro atvirkštinį slėgio gradientą prie tūtos sienų, o tai gali sukelti pasienio sluoksnio atitrūkimą. Šis reiškinys taip pat gali paaiškinti išaugusį turbulentiškumo lygį.

Kadangi nė vienu atveju turbulentiškumo lygis pasirinktoje darbinės kameros zonoje nebuvo didesnis nei 2 proc. galima patvirtinti, jog kvadratinio skerspjūvio vamzdžio kampuose susidarantys sūkuriai yra lokalizuoti ir neturi didelės įtakos centrinėje dalyje tekančiam srautui.

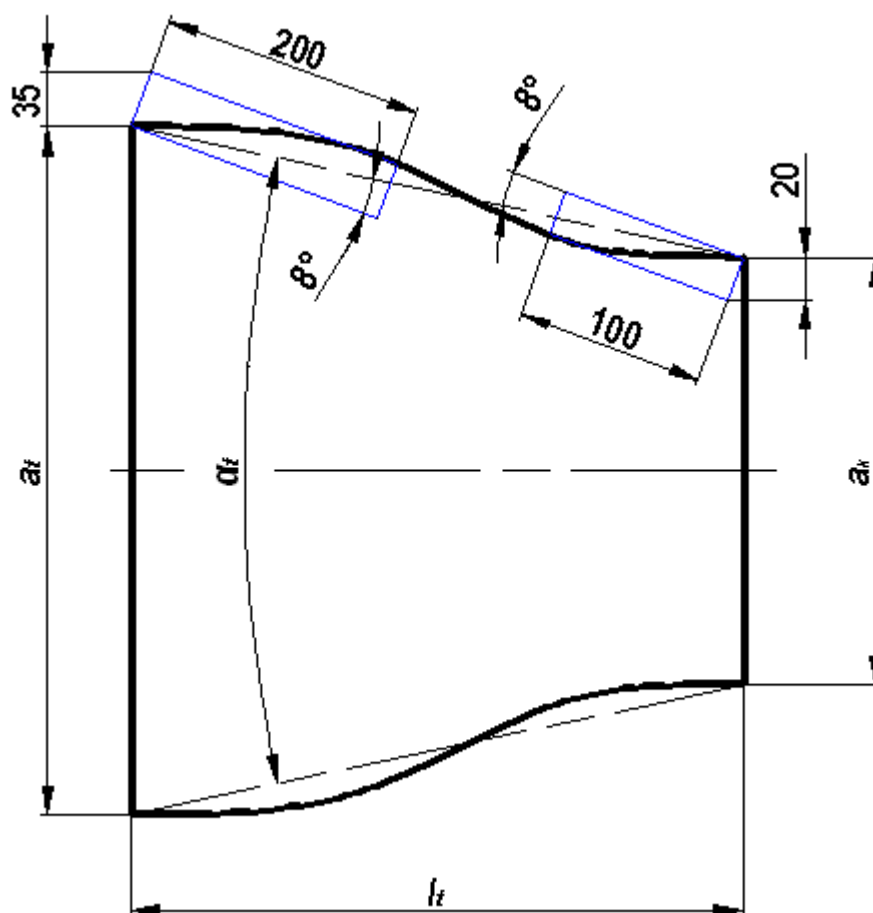
4. NUPJAUTINĖS KVADRATINĖS PIRAMIDĖS SU KREIVALINIJINĖMIS SUDAROMOSIOMIS FORMOS TŪTA

Šioje dalyje tyrimo metu siekiama iširti kokią įtaką srauto kokybei turi netolygiai kintamo skerspjūvio tūtos forma, palyginus su tolygiai kintamo skerspjūvio forma. Modeliavimas atliekamas naudojant tą pačią programinę įrangą kaip ir pirmosios tyrimo dalies metu.

4.1. Aerodinaminio vamzdžio modelis ir skaičiavimo schema

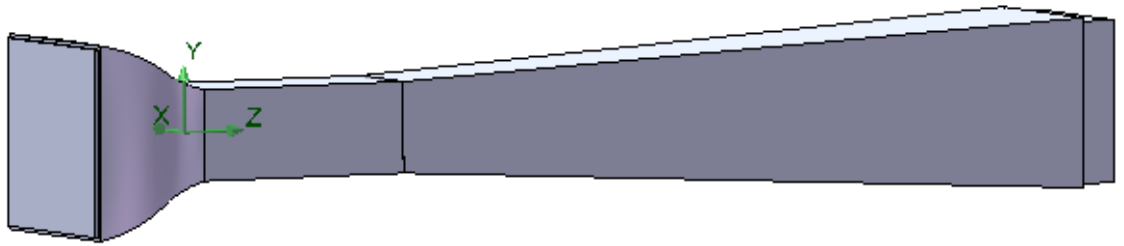
Tyrimui naudojamas tas pats kompiuterinis aerodinaminio vamzdžio modelis naudotas pirmojoje tyrimo dalyje, pakeitus tik tūtą (24 pav.). Darbinės kameros, difuzoriaus ir ventiliatoriaus matmenys lieka tokie patys kaip nurodyta 3.1. skyriuje. Visų aerodinaminio vamzdžio komponentų (išskyrus ventiliatorių) skerspjūvis yra kvadrato formos.

Tūtos kontūro profiliui pasirinkta kreivė, kurios kreivumo spinduliai priklauso nuo tūtos žiočių kampo ir tūtos ilgio. Kreivės galai yra lygiagretūs išilginei aerodinaminio vamzdžio ašiai. Kreivę apibrėžiantys matmenys pavaizduoti 23 paveiksle.



23 pav. Tūtos kontūro forma naudojama antrojoje tyrimo dalyje

Kaip ir pirmosios tyrimo dalies metu, tūtos geometrija keičiama dvejais atvejais (siekiant išvengti painiavos jie vadinami trečiuoju ir ketvirtuoju atvejais). Trečiuoju atveju tūtos suspaudimo laipsnis palaipsniui keičiamas išlaikant pastovų tūtos susiaurėjimo kampą, o ketvirtuoju atveju suspaudimo laipsnis palaipsniui keičiamas išlaikant pastovų tūtos ilgį. Tūtos ilgis ir susiaurėjimo kampas abiem atvejais atitinka matmenis naudotus pirmojoje dalyje, todėl trečiajam atvejui tinka lentelė nr. 1, o ketvirtajam – lentelė nr. 2.



24 pav. Kompiuterinis aerodinaminio vamzdžio su nupjautinės kvadratinės piramidės su kreivalinijinėmis sudaromosiomis formos tūta modelis

Antrojoje tyrimo dalyje numatoma ištirti tuos pačius srauto parametrus kaip ir pirmojoje:

- vidutinį srauto greitį v ;
- srauto turbulentiškumo lygį I ;
- pasienio sluoksnio storį δ .

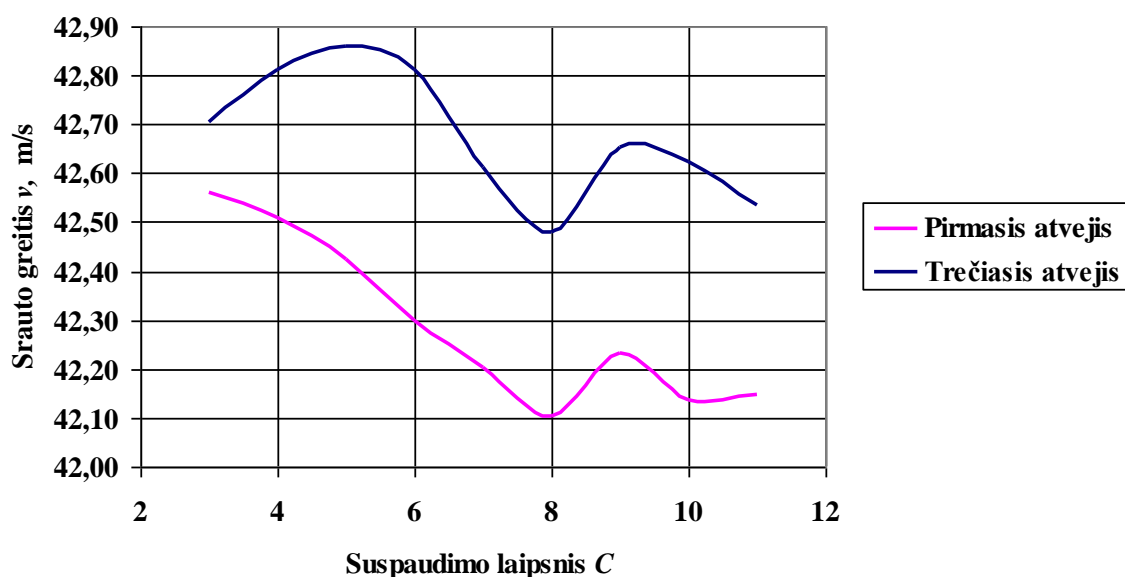
Skaičiavimo schema aprašyta 3.2. skyriuje išlieka ta pati kaip ir tiriant nupjautinės piramidės formos tūta. Kadangi pirmojoje tyrimo dalyje nepastebėta jokių reikšmingų grafikų formos skirtumų esant skirtingam debitui, galima daryti prielaidą, jog ir antrojo tyrimo metu reikšmingų skirtumų tarp skirtingo debito grafikų neturėtų būti. Dėl šios priežasties, antrajame tyrime apsiribojama tik viena debito reikšme $Q = 2,11 \text{ m}^3/\text{s}$.

Apskaičiuotos charakteristikos palyginamos su atitinkamais rezultatais iš pirmosios tyrimo dalies: trečiojo atvejo duomenys palyginami su pirmojo, o antrojo su ketvirtojo duomenimis.

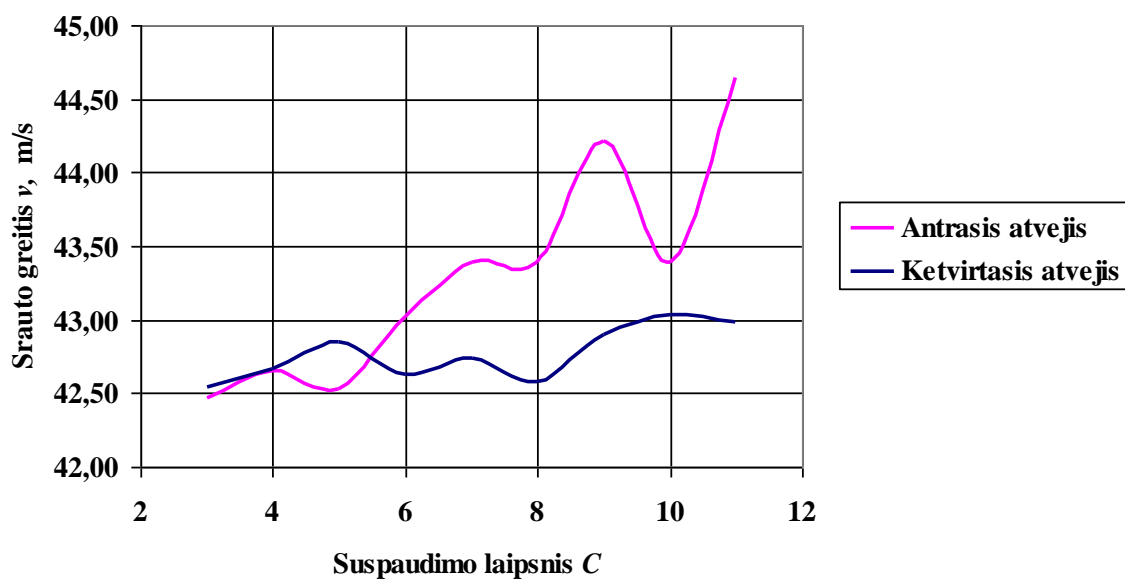
4.2. Antrosios tyrimo dalies rezultatai

4.2.1. Srauto greitis

Srauto vidutinio greičio kitimas pirmuoju ir trečiuoju atveju pateikiamas 25 paveiksle. Iš grafiko matyti, jog trečiuoju atveju vidutinis greitis kameroje yra didesnis nei pirmuoju atveju. Greičio skirtumas didžiausias kai suspaudimo laipsnis $C = 6$ ir yra lygus $0,52 \text{ m/s}$. Nei vienu atveju greičio kitimas priklausomai nuo suspaudimo laipsnio nėra tolygus, tačiau abiem atvejais mažiausias greitis yra kai suspaudimo laipsnis $C = 8$.



25 pav. Srauto greitis pirmuoju ir trečiuoju atveju, kai debitas $Q = 2,11 \text{ m}^3/\text{s}$

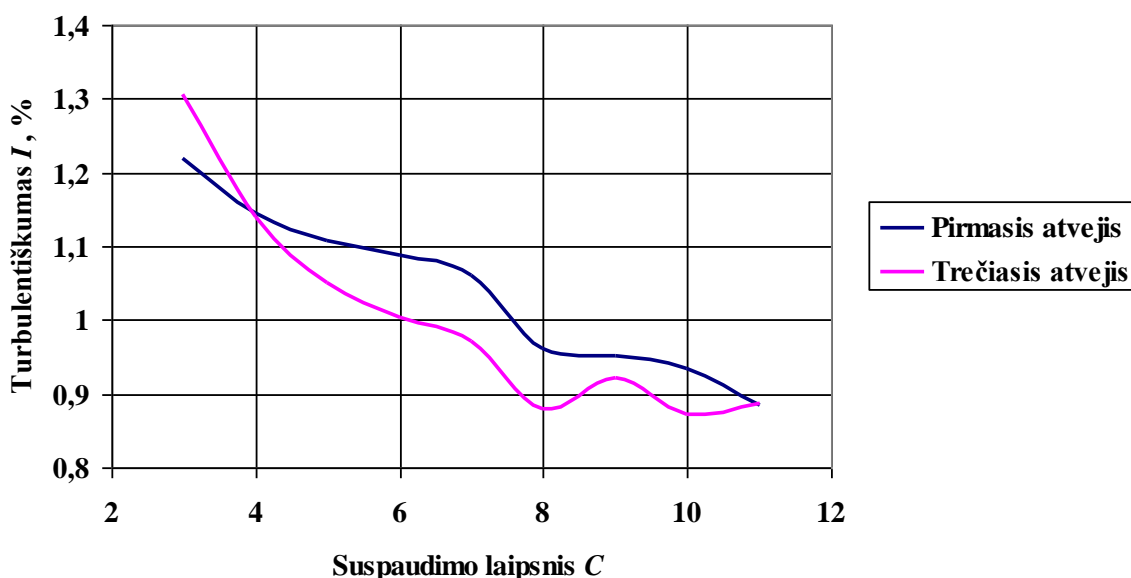


26 pav. Srauto greitis antruoju ir ketvirtuoju atveju, kai debitas $Q = 2,11 \text{ m}^3/\text{s}$

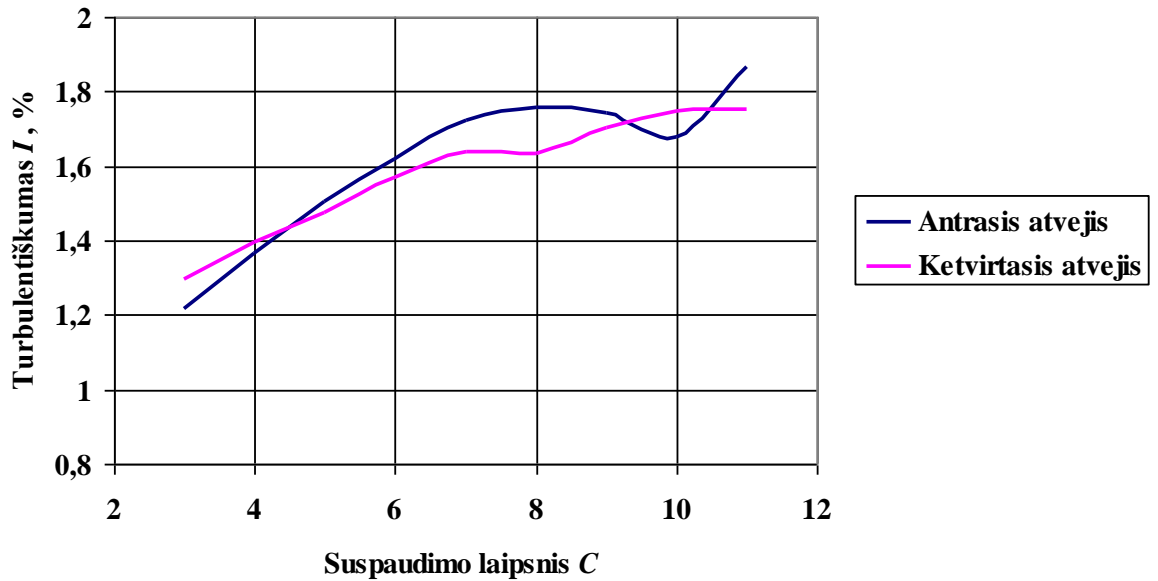
Antrojo ir ketvirtojo atvejų srauto greičio kitimo palyginimas pateikiamas 26 paveiksle. Čia matyti, jog vidutinis srauto greitis didesnis ketvirtuoju atveju tik suspaudimo laipsniui esant nuo 3 iki 5. Nuo suspaudimo laipsnio $C = 6$, srauto greitis didesnis esant antrajam atvejui, kadangi ketvirtuoju atveju greitis nuo suspaudimo laipsnio didėja ne taip staigiai kaip antruoju. Didžiausias greičio skirtumas pastebimas esant didžiausiam suspaudimo laipsniui ir lygus 1,66 m/s.

4.2.2. Srauto turbulentiškumas

Turbulentiškumo lygio I priklausomybė nuo tūtos suspaudimo laipsnio C pirmuoju ir trečiuoju atveju pateikiama 27 paveiksle. Trečiuoju atveju turbulentiškumo lygis darbinėje kameroje yra mažesnis visame suspaudimo laipsnio dydžių diapazone išskyrus mažiausią ir didžiausią suspaudimo laipsnių vertes. Vidutiniškai turbulentiškumas trečiuoju atveju mažesnis už turbulentiškumą pirmuoju atveju 3,6 proc.



27 pav. Turbulentiškumo kitimas pirmuoju ir trečiuoju atveju kai debitas $Q = 2,11 \text{ m}^3/\text{s}$



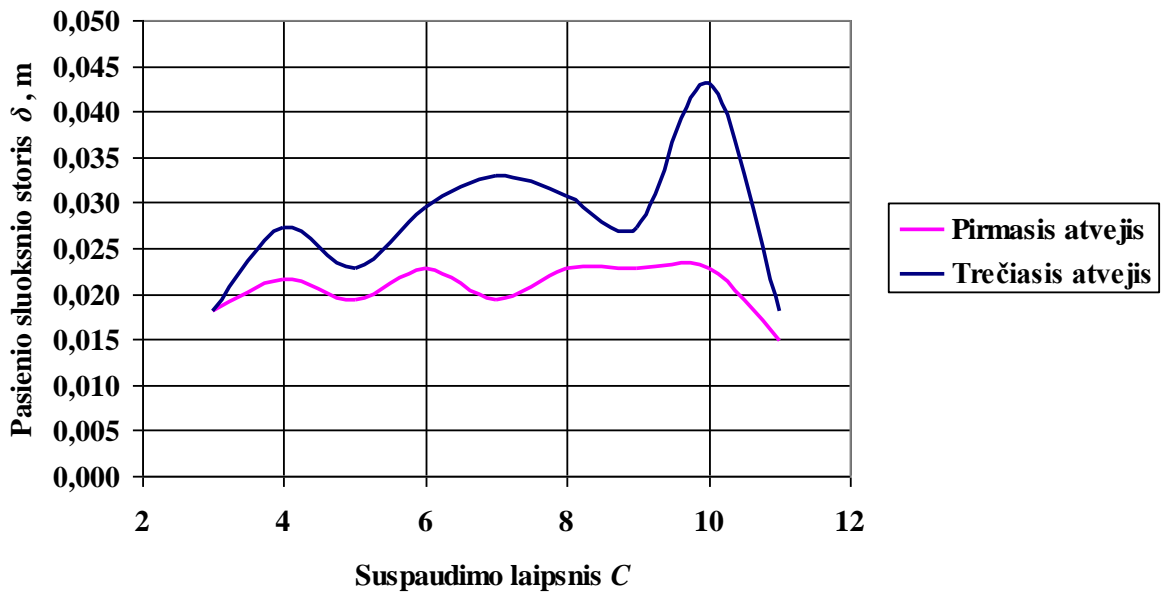
28 pav. Turbulentiškumo kitimas antruoju ir ketvirtuoju atveju kai debitas $Q = 2,11 \text{ m}^3/\text{s}$

Turbulentiškumas antruoju ir ketvirtuoju atveju palyginamas 28 paveiksle. Abiem atvejais turbulentiškumo lygis didinant suspaudimo laipsnį didėja. Kai suspaudimo laipsnis yra tarp 5 ir 11 (išskyrus $C = 10$), turbulentiškumas darbinėje kameroje mažesnis ketvirtuoju atveju. Vidutiniškai turbulentiškumas ketvirtuoju atveju mažesnis už turbulentiškumą antruoju atveju 1,8 proc.

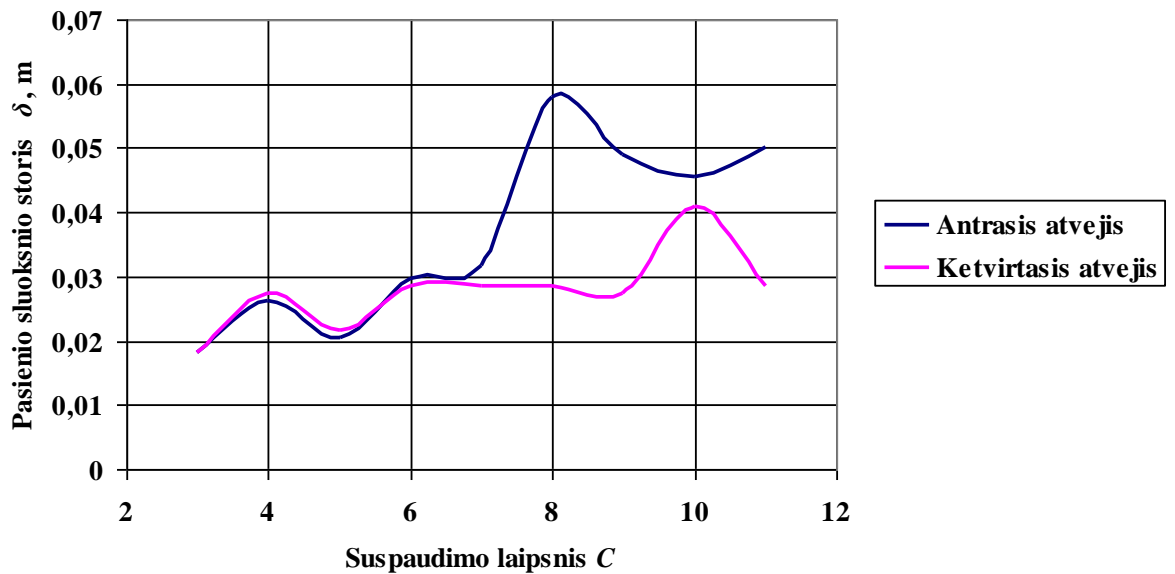
4.2.3. Pasienio sluoksnis

Pasienio sluoksnio storio kitimas nuo suspaudimo laipsnio pirmuoju ir trečiuoju atveju pateikiamas 29 paveiksle. Abiem atvejais pasienio sluoksnio storis kinta netolygiai, tačiau galima išvelgti bendras tendencijas. Trečiuoju atveju pasienio sluoksnis yra storesnis ir kinta nuo 18 iki 43 mm (kai pirmuoju atveju kinta nuo 18 iki 23 mm).

Pasienio sluoksnio storio kitimas nuo suspaudimo laipsnio pirmuoju ir trečiuoju atveju pateikiamas 30 paveiksle. Kai suspaudimo laipsnis nuo 3 iki 7, pasienio sluoksnio storis abiem atvejais beveik sutampa, tačiau esant aukštesniam suspaudimo laipsniui pasienio sluoksnio storis ketvirtuoju atveju yra mažesnis ir kinta nuo 14 iki 40 mm (kai antruoju atveju kinta nuo 18 iki 58 mm).

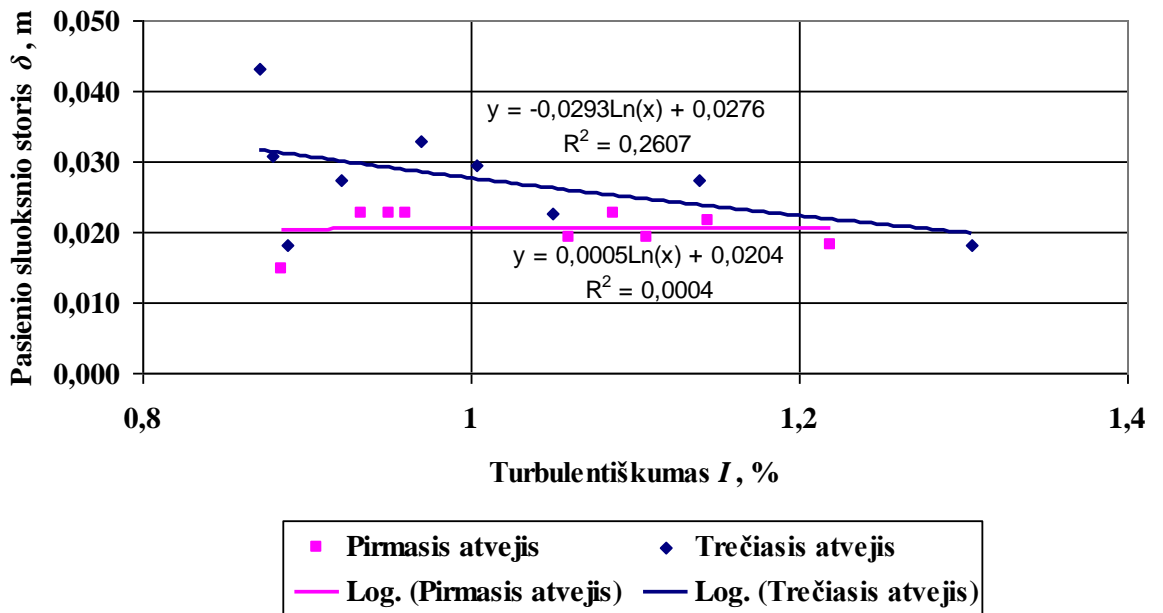


29 pav. Pasienio sluoksnio storio kitimas pirmuoju ir trečiuoju atveju



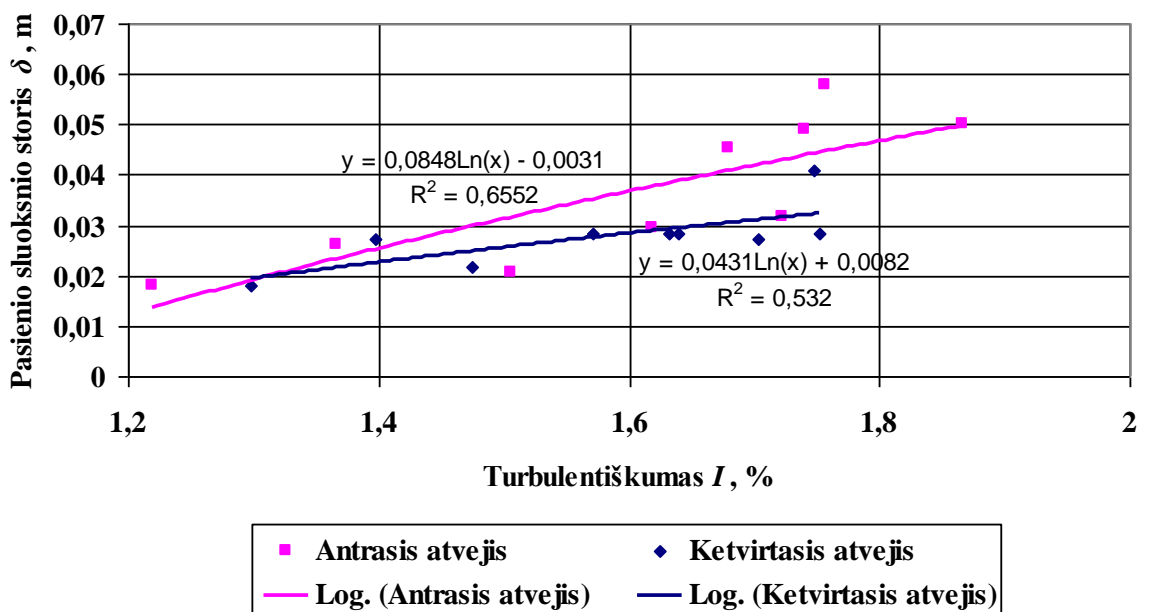
30 pav. Pasienio sluoksnio storio kitimas antruoju ir ketvirtuoju atveju

Pasienio sluoksnio storio priklausomybė nuo turbulentiškumo lygio grafiškai pavaizduota 31 ir 32 paveiksluose. Kadangi duomenys pasiskirstę netolygiai, šalia taškų pateikiamos logaritminės koreliacijos kreivės. Koreliacijos kreivių išraiškos ir koreliacijos kvadrato koeficientai nurodyti grafikuose. Iš 31 paveikslo matyti, jog pirmuoju atveju didėjant turbulentiškumui, pasienio sluoksnio storis beveik nekinta. Antruoju atveju pasienio sluoksnio storis didėjant turbulentiškumui mažėja.



31 pav. Pasienio sluoksnio storio priklausomybė nuo turbulentiškumo pirmuoju ir trečiuoju atveju

Palyginus antrąjį ir ketvirtąjį atvejus galima pastebėti, jog abiem atvejais, didėjant turbulentiškumui, pasienio sluoksnio storis taip pat didėja. Antruoju atveju pasienio sluoksnio pastorėjimas yra staigesnis nei ketvirtuoju atveju.



32 pav. Pasienio sluoksnio storio priklausomybė nuo turbulentiškumo antruoju ir ketvirtuoju atveju

4.3. Duomenų analizė

Palyginus srauto vidutinį greitį pirmuoju ir trečiuoju atveju matyti, jog trečiuoju atveju srauto greitis yra didesnis. Tai gali lemti didesnis pasienio sluoksnio storis, sumažinantis laisvai pratekančio srauto skerspjūvio plotą. Kadangi srauto turbulentiškumas trečiuoju atveju yra mažesnis, negalima tvirtai teigti, jog didesnę pasienio sluoksnio storį lemia srauto sūkuringumas. Storesnį pasienio sluoksnį gali lemti ir ilgesnis kelias, kurį srautas turi tekėti pagal tūtos sieną trečiuoju atveju, tačiau šis kelias palyginti su pirmuoju atveju tik nežymiai ilgesnis (dėl mažų profilio kreivės kreivumo spindulių). Nors pasienio sluoksnis trečiuoju atveju didesnis, akivaizdu, jog tūtos forma su sklandžiais perėjimais iš tūtos žiočių į darbinę kamerą teigiamai įtakoja srauto kokybę pasirinktoje darbinės kameros zonoje. Šioje zonoje turbulentiškumas trečiuoju atveju mažesnis už turbulentiškumą pirmuoju atveju vidutiniškai 3,6 proc., nepaisant storesnio pasienio sluoksnio.

Lyginant antrąjį ir ketvirąjį atvejus pastebima, jog esant tūtai su sklandžiais formos perėjimais vidutinis srauto greitis darbinėje kameroje, didinant tūtos suspaudimo laipsnį, kyla mažiau ir apskritai mažai kinta. Srauto turbulentiškumas taip pat kinta tolygiau ir yra šiek tiek mažesnis ketvirtuoju atveju. Pasienio sluoksnio storis taip pat mažesnis ketvirtuoju atveju, tačiau šis ir anksčiau minėti parametrai pranoksta antrąjį atvejį tik kai tūtos suspaudimo laipsnis yra didesnis už 5-6. Dėl to galima teigti, jog parinkta tūtos profilio kreivės forma veiksminga tik esant aukštesniam suspaudimo laipsniui ir didesniai susiaurėjimo kampui.

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

1. Literatūros šaltiniuose rekomenduojama projektuojant aerodinaminio vamzdžio tūtą vengti pasienio sluoksnio atotrūkio, kurį sukelia atvirktinis slėgio gradientas dėl per didelio tūtos susiaurėjimo kampo. Taip pat rekomenduojama siekti, kad tūtos siaurojoje dalyje pasienio sluoksnio storis būtų kuo mažesnis. Teigiama, jog tinkamai parinkus tūtos ilgį, suspaudimo kampą ir profilio kontūrą galima sumažinti srauto turbulentiškumo lygį aerodinaminiam vamzdyje.
2. Pirmojoje tyrimo dalyje naudojant kompiuterinį modeliavimą nustatyta, jog didinant paprastos formos tūtos suspaudimo laipsnį nuo trijų iki vienuolikos, kai jos suspaudimo kampas yra pastovus – 24° , pastebimas 0,43-0,97 proc. srauto greičio sumažėjimas ir turbulentiškumo mažėjimas nuo 1,22 proc. iki 0,82-0,88 proc. Didinant tūtos suspaudimo laipsnį nuo trijų iki vienuolikos, kai jos ilgis yra pastovus ir lygus 0,39 m, pastebimas 5,11-5,68 proc. srauto greičio sumažėjimas ir turbulentiškumo didėjimas nuo 1,22 proc. iki 1,80-1,87 proc. Iš šių duomenų matyti, jog kokybiškesnis srautas gaunamas pirmuoju tūtos geometrijos atveju – kai tūtos ilgis sąlyginai didelis.
3. Antrosios tyrimo dalies metu nustatyta, jog parinkus kreivą tūtos profilio kontūrą, srauto turbulentiškumas darbinėje kameroje vidutiniškai sumažėja nuo 1,8 proc. tūtos susiaurėjimo kampo didinimo atveju iki 3,6 proc. tūtos ilgio didinimo atveju. Abiem atvejais tokio kontūro veiksmingumas pasireiškia kai suspaudimo laipsnis didesnis už 4. Atliekant daugiau kompiuterinių simuliacijų, priartėjimo būdu būtų galima parinkti optimalią tūtos kontūro formą norimam projektuojamos tūtos suspaudimo laipsniui ir ilgiui.
4. Išanalizavus gautus duomenis galima patvirtinti, jog esant per mažam tūtos ilgiui (antrasis ir ketvirtasis tūtos geometrijos kitimo atvejai) srauto kokybė darbinėje kameroje nukenčia – padidėja pasienio sluoksnio storis ir srauto turbulentiškumas. Pastebėta, jog esant didėjančiam tūtos ilgiui (pirmasis ir trečiasis tūtos geometrijos atvejai) greičio kritimas dėl trinties ir kitų veiksnių nėra didesnis nei 1 proc., o srauto turbulentiškumas sumažėja netgi taikant paprastą tūtos formą, be sklandžių perėjimų.

NAUDOTA LITERATŪRA

1. **Miguel A. González Hernández, Ana I. Moreno López, Artur A. Jarzabek, José M. Perales Perales, Yuliang Wu and Sun Xiaoxiao (2013).** Design Methodology for a Quick and Low-Cost Wind Tunnel, Wind Tunnel Designs and Their Diverse Engineering Applications, Dr. Noor Ahmed (Ed.), ISBN: 978-953-51-1047-7, InTech, DOI: 10.5772/54169. Nuoroda: <http://www.intechopen.com/books/wind-tunnel-designs-and-their-diverse-engineering-applications/design-methodology-for-a-quick-and-low-cost-wind-tunnel>
2. **Paknys L.** Transporto priemonių aerodinamikos pagrindai. Kaunas „Technologija“ 1999 m.
3. **Mehta R. D., Bradshaw P.** Technical notes. Design Rules for Small Low-speed Wind Tunnels. The Aeronautical Journal of the Royal Aeronautical Society, November 1979.
4. **Bell J. H., Mehta R. D.** Boundary-Layer Predictions for Small Low-Speed Contractions // AIAA Journal 27(3) – Washington, DC, 1989. p. 372-374.
5. Turbulence intensity. Prieiga per internetą: < http://www.cfd-online.com/Wiki/Turbulence_intensity > [žiūrėta 2016-03-24].
6. **Bell J. H., Mehta R. D.** Contraction Design for Small Low-speed Wind Tunnels. Stanford University Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford, CA, April 1988.
7. **Dryden H. L., Abbot I. H.** The Design of Low-turbulence Wind Tunnels. NACA Headquarters, Washington, November 1948.
8. Hydraulic diameter. Prieiga per internetą: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hydraulic_diameter> [žiūrėta 2016-05-25]
9. Reynolds number. Prieiga per internetą: <http://www.engineeringtoolbox.com/reynolds-number-d_237.html> [žiūrėta 2016-05-25]
10. Basics of Turbulent Flow. Prieiga per internetą: <<http://www.mit.edu/course/1/1.061/OldFiles/www/dream/SEVEN/SEVENTHEORY.PDF>> [žiūrėta 2016-05-25]