

**KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS**

Jūros technologijų ir gamtos mokslų fakultetas

Jūrų inžinerijos katedra

Deividas Krivickas

**LAIVŲ TEMPIAMO LYNO VIBRACIJŲ MAŽINIMO TYRIMAS**

Laivų projektavimo ir statybos studijų programos (612H52001) magistro baigiamasis darbas

Klaipėda, 2018

**LAIVŲ PROJEKTAVIMO IR STATYBOS STUDIJŲ PROGRAMOS (621H52001)  
BAIGIAMOJO DARBO LYDRAŠTIS**

Pildo magistro baigiamojo darbo autorius

.....  
(magistro baigiamojo darbo autoriaus vardas, pavardė)

.....  
(magistro baigiamojo darbo pavadinimas lietuvių kalba)

**Patvirtinu, kad magistro baigiamasis darbas parašytas savarankiškai, nepažeidžiant kitiems asmenims priklausančių autorių teisių, visas baigiamasis magistro darbas ar jo dalis nebuvo panaudotas Klaipėdos universitete ir kitose aukštosiose mokyklose.**

.....  
(magistro baigiamojo darbo autoriaus ir parašas)

**Sutinku, kad magistro baigiamasis darbas būtų naudojamas neatlygintinai 5 m. Klaipėdos universiteto studijų procese.**

.....  
(magistro baigiamojo darbo autoriaus ir parašas)

Pildo magistro baigiamojo darbo vadovas

**Magistro baigiamąjį darbą ginti** .....

(įrašyti – leidžiu arba neleidžiu)

.....  
(data )

.....  
(magistro baigiamojo darbo vadovo vardas, pavardė ir parašas)

Pildo Jūrų inžinerijos katedros, kuruojančios studijų programą, administratorė

Baigiamasis darbas įregistruotas katedroje .....

(registracijos numeris, data)

.....  
(katedros administratorės vardas, pavardė ir parašas)

Pildo Jūrų inžinerijos katedros, kuruojančios studijų programą, vedėjas

**Magistro baigiamąjį darbą ginti** .....

(įrašyti – leidžiu arba neleidžiu)

.....  
(data )

.....  
(katedros vedėjo vardas, pavardė ir parašas)

**Recenzentu skiriu** .....

(įrašyti recenzento vardą, pavardę)

(įrašyti recenzento vardą, pavardę)

.....  
(data )

.....  
(katedros vedėjo vardas, pavardė ir parašas)

Jūrų inžinerijos katedros vedėjas:

.....  
(data )

.....  
(katedros vedėjo vardas, pavardė ir parašas)



## Laivų projektavimo ir statybos magistro studijų (621H52001) baigiamasis darbas

Užduotis studentui(–ei): **Deividas Krivickas**

Temos pavadinimas: **Laivų tempiamo lyno vibracijų mažinimo tyrimas**

### DARBO SUDĖTIS

1. Titulinis lapas (viršelis)
2. Santrauka
3. Užduotis
4. Lentelių sąrašas
5. Paveikslų sąrašas
6. Turinys
7. Įvadas (problemos analizė)
8. Darbo tikslas ir uždaviniai
9. Literatūros analizė
10. Teorinė dalis
  - 10.1. Tyrimo objekto eksploatacinių sąlygų nustatymas ir analizė
  - 10.2. Sparno vandens aptekimo teorijos analizė
  - 10.3. Vibracijų atsiradimo priežasties analizė
11. Matematinis eksperimentas
  - 11.1. Sparno vandens aptekimo modeliavimas naudojant skaičiuojamosios skysčių dinamikos (SSD) programą
  - 11.2. Lyno su sparnais aptekimo modeliavimas naudojant skaičiuojamosios skysčių dinamikos (SSD) programą
  - 11.3. Naujų sparno formos optimizavimo variantų sukūrimas pagal sparno vandens aptekimo teoriją
  - 11.4. Lyno su sukurtomis sparno formomis aptekimo modeliavimas naudojant skaičiuojamosios skysčių dinamikos (SSD) programą
12. Skaičiavimo rezultatų duomenų palyginimas bei analizė
13. Išvados
14. Literatūros sąrašas
15. Priedai

Darbo vadovas: doc. dr. Vasilij Djačkov

## SANTRAUKA

Krivickas D. *Laivų tempiamo lyno vibracijų mažinimo tyrimas*. Laivų projektavimo ir statybos magistro studijų programos baigiamasis darbas. Darbo vadovas doc. dr. Vasilij Djačkov, Klaipėdos universitetas: Klaipėda. 53 psl.

Šiame magistro baigiamajame darbe atliktas tęstinis tyrimas, kuris pradėtas įmonės „HAMPIDJAN BAL TIC“ prašymu bei K. Budgino „Tempiamo lyno vibracijų mažinimo galimybių tyrimas“ magistro baigiamojo darbo tyrimo rekomendacijomis. Darbe atliktas laivų tempiamo lyno vibracijų mažinimo tyrimas, tiriamasis objektas - kreipiantieji sparnai, kurie mažina tempiamo metalinio lyno vibracijas. Iškilusi problema - iškraipyti seisminių laivų gaunami dugno tyrimo duomenys. „HAMPIDJAN BAL TIC“, siekdami pašalinti lyno vibracijas, siūlo naudoti vandens srautą kreipiančiuosius sparnus, kurie turėtų sumažinti lyno vibracijas. Siekdamas toliau optimizuoti ir prieiti prie optimalios sparno konstrukcijos, remdamasis K. Budgino darbe pasiūlyto sumodeliuotu sparnu efektyviausio sprendimo atlikau tris sparno patobulinimus bei patobulintos konstrukcijos sparnų tyrimus.

Eksperimentas atliktas FLOW-3D SSD programa, siekiant sukurti efektyvesnę sparno konstrukciją, pagerinančią sparno aptakumą. Tyrimo metu lyginti skirtingų konstrukcijų sparnų duomenys ir išrinktas optimaliausias variantas. Išanalizuota mokslinė literatūra, teorija apie reiškinį veikiančius sparną jam plaukiant vandenyje. Suformuluotos išvados bei rekomendacijos tolimesniam tyrimui.

Raktažodžiai: Vandens srautas, vandens pasipriešinimas, lynas, sparnas, vibracijos, skaičiuojamoji skysčių dinamika, tyrimas, optimizacija.

## SUMMARY

Krivickas D. *Research of vessel's towed rope vibration reduction*. Ship design and shipbuilding study program Master Degree thesis. Thesis leader Assoc. dr. Vasilij Djačkov, Klaipėda University: Klaipėda.

This master thesis was written to continue the study, started by request of the company „HAMPIDJAN BALTIC“ and on the basis of K. Budginas Master Thesis „Tension rope vibration reduction feasibility study research“ recommendations. In this master thesis a research of vessel's towed rope vibration reduction has been made. Research object – wing profile, which reduces towed rope vibrations. The issue is that seismic vessels exploring the seabed, receive incorrect data, because of the sensors hanging on a rope that vibrates. To minimize vibrations „HAMPIDJAN BALTIC“ proposes to use wing profiles that should reduce towed rope vibrations. In order to make further optimization and to find more effective wing profile solution, in this master thesis I have created three wing profile modifications and have made a study about their performance.

The experiment was made using FLOW 3D software in order to create the better design of the wings, improving water flow around them. Comparing different profile data, the best option selected. The theory of waterflow around the wings has been also analyzed in this thesis.

Conclusions about selection of wings have been composed and further recommendations created.

Key words: water flow, water resistance, rope, fender, vibration, computation fluid dynamics, research, optimization.

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Gėlo vandens, jūros vandens ir oro klampumas.....	18
2 lentelė. Gėlo vandens, jūros vandens ir oro tankis.....	18

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Esamų sparnų pavyzdžiai.....	10
2 pav. Elipsinė plokštė (sparnas).....	13
3 pav. Tekėjimo sūkurių slopinimas aptaku.....	14
4 pav. Dalinai aktyvus sparnas.....	14
5 pav. Banguoto cilindro tiriamo modelio koordinacių ašies išdėstymas.....	15
6 pav. Tiriamos sistemos pavyzdys.....	17
7 pav. Prie lyno pritvirtinti slopinantieji siūlai.....	18
8 pav. Tiesioginis spaudimas.....	19
9 pav. Pereinantis spaudimas.....	19
10 pav. Perėjimo krūvis.....	19
11 pav. Perėjimo spaudimas.....	20
12 pav. Srovės linija.....	21
13 pav. Nenutrūkstamumas.....	22
14 pav. Slėgio ir klampumo pokytis.....	23
15 pav. Pasienio sluoksnis ir išorinis srautas.....	23
16 pav. Skysčio sferinio elemento spaudimas.....	24
17 pav. Turbulentinis srautas.....	24
18 pav. Tipinių greičių profiliai pasienio sluoksnyje.....	25
19 pav. Paviršiaus trinties linijos.....	26
20 pav. Ribinio sluoksnio storis.....	27
21 pav. Paviršiaus šiurkštumo efektas.....	28
22 pav. Jėgos ant kūno.....	29
23 pav. Slėgio jėgos poveikis ir pėdsakas.....	29
24 pav. Srautų atsiskyrimas.....	30
25 pav. Laminarinis ir turbulentinis tekėjimas.....	31

26 pav. Slėgio pasiskirstymas aplink sparną.....	31
27 pav. Teisingo kintančio tinklelio suformavimas srauto tėkmės kryptimi.....	36
28 pav. Vandens srauto greičių pasiskirstymas, vaizdas iš viršaus.....	38
29 pav. Vandens srauto greičių pasiskirstymas, vaizdas iš šono.....	38
30 pav. Optimaliausias sparnas su kaverna 100 mm atstumu.....	40
31 pav. Optimizuotas sparnas su pailgintu ir užapvalintu priekiu.....	41
32 pav. Optimizuotas sparnas su kaverna, pailgintu, užapvalintu priekiu.....	41
33 pav. Sparno su kaverna greičių pasiskirstymo vizualizacija.....	42
34 pav. Sparno su pailgintu, užapvalintu sparnu greičių pasiskirstymo vizualizacija.....	43
35 pav. Optimizuoto sparno su kaverna, pailgintu, užapvalintu priekiu greičių pasiskirstymo vizualizacija.....	44
36 pav. Vandens pasipriešinimo jėgos pokytis tarp optimizuotų sparnų.....	44
37 pav. Vandens srauto greičio pokytis tarp optimizuotų sparnų.....	44

## TURINYS

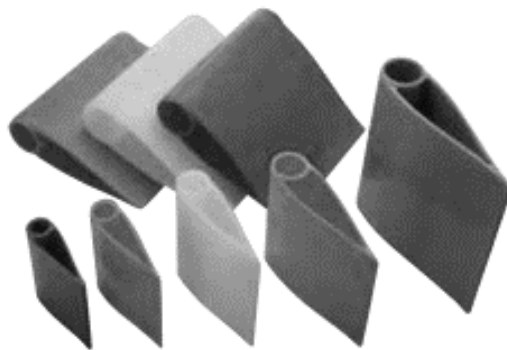
<b>ĮVADAS</b> .....	10
<b>I. LITERATŪROS ANALIZĖ</b> .....	12
1.1. Mokslinės literatūros analizė.....	12
<b>II. TEORINĖ DALIS</b> .....	17
2.1. Tiriamo objekto eksploatacinių savybių bei sąlygų nustatymas.....	17
2.2. Esminės skysčių savybės.....	18
2.3. Skysčio judėjimo sukeltos jėgos.....	21
2.4. Pasienio sluoksnis.....	23
2.5. Srauto atsiskyrimas.....	30
2.6. Kavitacija.....	31
<b>III. MATEMATINIS EKSPERIMENTAS</b> .....	33
3.1. Tinklelio sudarymas.....	34
3.2. Sparno vandens aptekėjimo modeliavimas naudojant skaičiuojamosios skysčių dinamikos (SSD) programą.....	36
3.3. Naujos sparno formos optimizavimo variantų kūrimas.....	39
<b>IV. SKAIČIAVIMO REZULTATŲ Palyginimas ir analizė</b> .....	42
<b>IŠVADOS</b> .....	46
<b>REKOMENDACIJOS</b> .....	47
<b>LITERATŪRA</b> .....	48
<b>PRIEDAI</b> .....	50

## IVADAS

Opiausia XXI a. problema – klimato kaita, susijusi su išmetamųjų anglies dvideginio dujų sukurto šiltnamio efektu, dėl kurio atmosfera šildo žemės planetą. Vis labiau šylanti žemės temperatūra sukelia ryškesnius gamtos kataklizmus, kaip žemės drebėjimai, uraganai, potvyniai, ugnikalnių išsiveržimai ir kt. Siekdami užtikrinti optimaliausią teisingą ir tikslų informacijos surinkimą, apdorojimą bei perdavimą, moksliniais tiriamaisiais laivais bei seisminiais laivais nuolatos yra atliekami moksliniai tyrimai, nustatyti artėjantiems gamtos reiškiniams. Kasmet įvyksta seisminiai įvykiai, dėl kurių didėja žala bendrai pasaulio infrastruktūrai. Staiga lūžtant tektoninėms žemės plokštėms įvyksta žemės drebėjimas giliai vandenynuose, sukeldamas seismines bangas, kurios galimai lemia ir cunamio pavojų kranto, uosto infrastruktūroms. Siekiant išvengti žalos, reikalingas šių zonų nuolatinis stebėjimas.

Nuolatos besivystančios technologijų inovacijas sparčiai gausėja bei tobulėja. Išauga jų našumas, tikslumas bei panaudojimo galimybės, suteikiančios gebėjimus iširti, nustatyti bei įvertinti povandeninio pavojaus signalus. Jūrinės geofizikos tyrimuose naudojami seisminių atspindžių stebėjimo būdai pasiekė aukštus kokybės lygmenis. Paskutiniųjų metų metodai suteikė stiprias galimybes stebėti infrastruktūras.

Moksliniame tiriamajame darbe bus atliktas laivo tempiamo lyno vibracijų mažinimo tyrimas pasitelkiant sparną. Tempiamos išilgai sujungtų akustinių imtuvų eilės, kurios yra sujungtos kryžminiu lynu. Prie didelių Reinoldso skaičių, vyksta turbulentinis vandens srauto tekėjimas apie šį kryžminį lyną ir už jo liekantis hidrodinaminis pėdsakas, vandens srautas sukuria priverstinius lyno svyravimus, lynai pradeda virpėti. Lyno virpesių dažnis iškraipo gaunamus vandens dugno atspindžių dažnius, tai daro įtaką seisminių akustinių imtuvų priimamiems duomenims. Siekiant sumažinti kryžminio lyno virpesius ir sukuriama turbulentinį vandens srautą buvo sukurti sparnai (1 pav).



1 pav. Esamų sparnų pavydžiai [6]

Šitie sparnai dalinai pateisino konstrukcinius ypatumus, tačiau pasiekus 5 - ių mazgų greitį ir jį viršijant susiformuoja lyno virpesiai [2]. Buvo atliktas sparno konstrukcijos tyrimas, patobulinto sparno konstrukcijos tyrimas bei iširta, dėl kokių reiškinių susiformuoja lyno virpesiai.

**Tyrimo aktualumas.** Tyrimas aktualus visoms mokslinėms institucijoms turinčioms mokslinius tiriamuosius laivus, seisminės geofizikos bei seisminių laivų valdytojams, mokslininkams, verslo sektoriui, jūrų uosto direkcijai ir kitoms institucijoms.

**Tyrimo problema.** Tempiamo lyno virpesiai sukuria turbulentinį vandens tekėjimą, kuris iškraipo akustinių imtuvų duomenis.

**Tyrimo objektas.** Laivų tempiamas lynas ir lyno sparnas.

**Darbo tikslas:** Išanalizuoti tiriamo objekto hidrodinamines charakteristikas, pasiūlyti jo formos optimizavimo būdą ir ištirti naujai suprojektuoto sparno hidrodinaminį aptekėjimą.

#### **Uždaviniai:**

1. Atlikti mokslinės literatūros analizę;
2. Nustatyti laivo tempiamo lyno virpesių atsiradimo priežastis;
3. Atlikti esamų sparnų hidrodinaminio aptakumo tyrimą naudojantis kompiuterinės skaičiuojamosios skysčių dinamikos (SSD) programa FLOW 3D;
4. Atlikti naujai suprojektuoto sparno hidrodinaminio aptakumo tyrimą naudojantis kompiuterinės skaičiuojamosios skysčių dinamikos (SSD) programa FLOW 3D;
5. Atlikti esamų ir suprojektuotų sparnų skaičiavimo rezultatų analizę bei palyginimą;
6. Remiantis tyrimų rezultatais suformuluoti optimaliausia sparno konstrukciją;
7. Pateikti išvadas bei pasiūlyti rekomendacijas.

**Tyrimo metodai.** Magistro baigiamajame darbe taikysime mokslinės literatūros analizę, sudarytą matematinį eksperimentą naudojant skaičiuojamąją skysčių dinamikos programą FLOW 3D.

**Darbo struktūra.** Magistro baigiamąjį darbą sudarys įvadas, literatūros analizė, teorinė darbo dalis, mokslinė tiriamoji darbo dalis, išvados su rekomendacijomis, literatūra ir priedai.

## I. LITERATŪROS ANALIZĖ

Atliekant literatūros analizę visas dėmesys orientuotas į užsienio šalių mokslinę literatūrą. Srauto hidrodinaminio aptekėjimo teoriją apima daugybė aspektų bei reiškinių. Analizuojant šaltinius orientuotasi į sparno optimizavimo ir vandens aptekėjimo tyrimus. Įtraukti ir kiti šaltiniai, kurie tiesiogiai nėra susiję su nagrinėjama tema, bet pateikiama informacija prisideda prie temos nagrinėjimo bei išsigilinimo į ją. Tokie kaip: sparno optimizavimas, sparnų tyrimai, srauto savybės ir kt. Atsižvelgta į tyrimo būdus ir orientuotasi į skaičiuojamosios skysčio dinamikos SSD (ang. CFD) tyrimo metodika ir būdus. Tai naudingi informacijos šaltiniai, norint sėkmingai tyrimui pritaikyti skaičiuojamųjų skysčių dinamikos programą ir būdą. Reikia žinoti ne tik šį vieną taikymo būdą (programą), bet ir tinkamo sudarymą, tikslumą (elementų kiekį) norėdami gauti tikslius mokslinio tyrimo rezultatus. Literatūros paieška gimtąja kalba taip pat atlikta, tačiau panašių mokslinių straipsnių ir šaltinių rasti nepavyko.

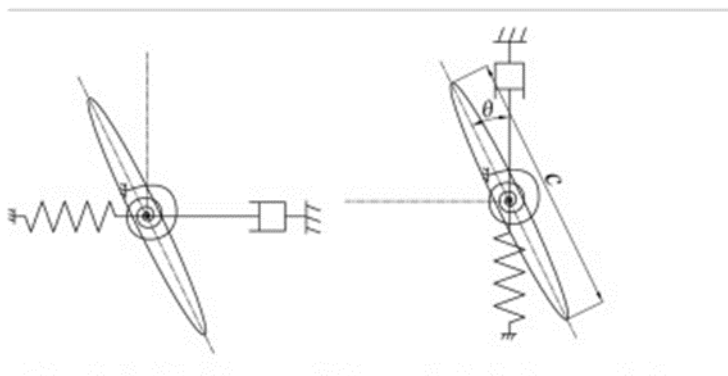
### I.I. Mokslinės literatūros analizė

B. G. Paik, K.Y. Kim, J.W. Ahn, Y. S. Kim, S. P. Kim, J.J. Park (2007) tyrimas atliktas naudojant PIV (Particle Image Velocimetry) analizės būdą kartu su oro burbuliukų atsiradimu, tirti vandens srauto elgesį ant sparno paviršiaus. Slėgio matavimai atlikti ant sparno paviršiaus, bei visuose plyšiuose. Tikrinami skirtingai vairai, be sraigto, parenkant skirtingus pasukimo kampus. Srautui pratekant pro plyšius pastebėta, kad susidaro rezonanso reiškiny. Nustatyta, kad slėgio pasiskirstymas aplink kiaurymes glaudžiai susijęs su vibracijų atsiradimu.[14]

O.S. Gim. (2013) atliktas tyrimas - dviejų sparnų bandymas naudojant PIV metodą. PIV (Particle Image Velocimetry) yra optinis metodas srauto vizualizavimui, skirtas moksliniams tyrimams. Naudojamas siekiant gauti momentinius greičio matavimus ir skysčio savybes. Bandymas atliekamas parenkant skirtingus atstumus tarp dviejų sparnų. Parinkti tokie atstumai 0.5C, 0.75C ir 1C kur (C=100mm). Sparnų pasukimo kampai 10°, 20° ir 30° atitinkamai. Bandymas atliekamas su NACA 0018 profiliu. Per bandymą Reinoldso skaičius NASA 0018 profilio laikomas  $1,5 \times 10^4$ . Gautus rezultatus palyginus su rezultatais skaičiuojant kiekvieną sparną atskirai. Tiriant vieno sparno skysčio aptekėjimą, bei sukurių susidarymą parinkti tokie sparnų pasukimo kampai 10°, 20° ir 25°. Gauti rezultatai palyginti, norint nustatyti kritinį atstumą tarp atskirų sparnų. Nustatyta, kad šis kritinis atstumas turėtų būti mažesnis nei 1.0C siekiant sumažinti turbulencijos srautą ir sukurius [18].

W.Jiang, D.Zhang, Y.H.Xie. (2017) atliktas elipsinės plokštės (sparno) sukeltų savaiminių virpesių energijos išgavimo skaitmeninis modeliavimas. Naudojamas savireguliuojantis, svyruojantis sparnas (plokštė), kuris išgauna skysčio tekėjimo sukuriamą energiją (2 pav.). Tyrimo tikslas - ištirti išilginio sparno supimosi sąveiką su hidrodinaminio aptekėjimo efektyvios energijos gavybą. Tyrimo metu naudojama dviejų dimensijų Navier-Stokes simuliacija esant Reinoldso skaičiui  $Re = 10^4$ . Tiriama trys sparno judėjimo trajektorijos: išilginis supimasis, išilginis supimasis su srautiniu panardinimu ir išilginis supimasis kombinuotas su skersiniu judėjimu.

Tyrimas atliktas naudojant struktūrinius parametrus (masės santykį, standumo koeficientą, slopinimo koeficientą). Tyrimo rezultatai atskleidžia jog išilginis supimasis kombinuotai su skersiniu sukimusi pasiekia geriausia energijos gavybos efektyvumą. Su tiksliai parinktais struktūriniais parametrais, galios generatorius gali pasiekti maksimalų 32 % galios koeficientą, o energijos išgavimo efektyvumas 20 %. Tai rodo, kad savaiminis sparno svyravimas yra perspektyvus ir gali pasiekti patenkinama energijos gavybos efektyvumą[19].

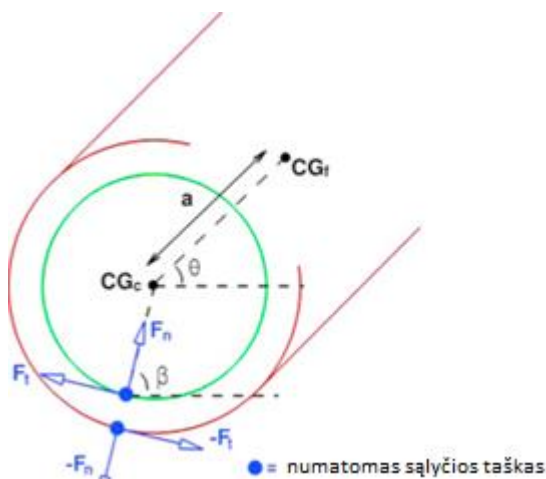


2 pav. Elipsinė plokštė (sparnas).[19]

H.Hashimoto, S.Yoneda, Y. Tahara, E.Kobyashi. (2016) bangų sukeltos jėgos prognozavimo tyrimas CFD metodu. Tyrimo tikslas nustatyti bangų sukeltos jėgos poveikį laivui esančiam jūroje, tačiau pagrindinė tyrimo problema kaip įvertinti bangų mūšos ir pakilimo fenomeną. Tyrime pažymėta, kad Froude – Krylov apskaičiavimu yra pervertinama bangų sukeltos jėgos amplitudė. Todėl buvo pasiūlyta paprasta korekcinė formulė Froude – Krylov skaičiavimams, kuri atitinka IMO stabilumo reikalavimus. Šiame tyrime naudojama RANS sprendimo metodas su padidinto tinklelio sistema, taip suteikiant galimybę išgauti tikslesnes bangos jėgas. Tuomet CFD metodu atlikti tyrimai, siekiant įvertinti esamą korekcijos formulę, naudojant skirtingas korpuso formas. Galiausiai atlikti kelios CFD simuliacijos, kurios atskleidžia esminius elementus siekiant tiksliai prognozuoti bangos jėgas.[20]

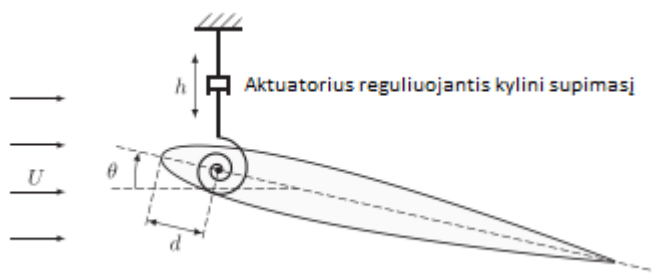
Y.Yu, F.Xie, H.Yan, Y.Constantinides, O.Oakley, G.E.Karniadakis. (2015) Skaitmeninis tyrimas. Tekėjimo sūkurių sukeltos vibracijos slopinimas aptakais (3 pav). Tyrime tiriamas aptakas, kuris yra beveik neutralus plūduriuojantis įtaisas, sumontuotas išilgai ilgosios apskritos stovo ašies, skirtas slopinti sūkurių sukeltus virpesius VIV (Vortex – Induced Vibration) bei sumažinti vilkimo pasipriešinimo jėgą. Tyrime aprašoma, kaip paprastai pašalinti sūkurių virpesius naudojant laisvai besisukančius aptakus. Dėl to, kad aptake inercija yra maža, skaičiuojant tiesiogines skaitmenines modelius remiantis skysčių struktūros sąveikos algoritmais, gali būti neefektyvus, dėl vadinamojo pridėtinės masės efekto. Norint išspręsti šią problemą, tyrime pasitelkiam fiktyvūs metodai ir sėkmingus, stabilus modelius. Tuomet tiriamas sukimosi frikcijos  $C_f$  poveikis stabilizavimosi efektui. Per dvimatį modeliavimą pastebėta, esant mažam Reinoldso skaičiui  $Re = 100$ ,  $C_f = 0$ , tuomet yra labiausiai efektyvus sūkurių vibracijos slopinimas. Esant žemam Reinoldso skaičiui, egzistuoja  $C_f$  kritinė reikšmė, apie kurią pastebimi dideli ir nesimetrinės trajektorijos

svyravimai. Tačiau esant didesniam Reinoldso skaičiui  $Re = 500$ , pastebėtas pakitęs elgesys. T.y. VIV nuolat slopinami, nes  $C_f$  didėja. Reindolso skaičiui pasiekus  $Re = 1000$  atliktas 3D modeliavimas iširti trijų matmenų poveikį vibracijai ir sukimuisi. Tyrime pirmą kartą kiekybiškai išmatuotos svarbios laisvojo sukimosi savybės VIV slopinimo prietaisuose.[21]



3 pav. Tekėjimo sukurių slopinimas aptaku. [21]

N.Thaweewat, S.Phoemsapthawee, V.Juntasaro. (2018) Dalinai aktyvus sparnas, skirtas jūriniam varikliui. Tyrime nagrinėjama pusiau aktyvus laivagalio sparnas, kurio kinematika yra charakterizuota sukonzentruotu kyliniu judėjimu ir sukamojo judėjimo laisvumu (4 pav). Prie sparno pritvirtinta spyruoklė, kuri gražina sparną į paralelinį greitį. Apibūdintas sparnas sumodeliuotas ribiniu elementu metodu kartu su Niutono – Eulerio sprendžiamuoju metodu, siekiant iširti slopinimo dažnio ir pavaros standumo įtaką našumui. Spyruoklės standumas turi stiprią įtaką sparno kampui ir efektyviam vandens srautui panaudojimui, kurį lemia vandens charakteristikos. Spyruoklė pasižymi dideliu įtempimo jėga, todėl elastingi vyriai vėlina kiekvieno smūgio pabaigą. Tyrimo rezultatai parodė, kad pusiau aktyvi sparno konstrukcija tinkamai pritvirtinta prie standumo spyruoklės dirba efektyviai plačiame diapazone su kontroliuojamo žingsnio sraigtu. Geriausias efektyvumas išgautas pagal Strouhal skaičių ir piko amplitudę, kaip nurodytą tyrime. Skaičiavimų rezultatai atspindi, kad rezonansas turi mažesnę įtaką propulsinio komplekso efektyvumui.[22]



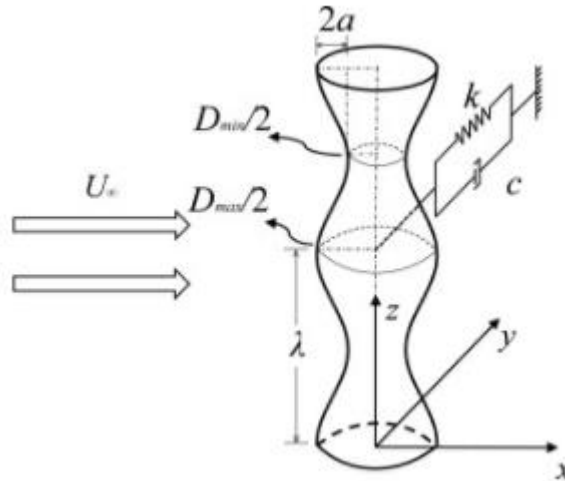
4 pav. Dalinai aktyvus sparnas. [22]

Y.K.Demirel, M. Khorasanchi, O. Turan, A. Incecik, M.P.Schultz (2014 m.) atliko pasipriešinimo trinties atsparumo dangos prognozavimo tyrimą CFD modeliu. Laivo korpuso dangos būklė daro didelę įtaką trinties pasipriešinimui. Padidėjęs korpuso šiurkštumas lemia didesnę atsparumą trinčiai, išauga degalų sąnaudos, išmetamas didesnis kiekis CO<sub>2</sub>. Tyrimas naudingas tuo, jog CFD metodu, galima prognozuoti nešvarumų įtaką atsparumui. Tyrime pateikiamas skaičiavimo skysčių dinamikos modelis, su kuriuo galima prognozuoti dangos poveikį trinties pasipriešinimui. Taip pat šis tyrimas apibūdina CFD atsparumo simuliacijas bandymams ant plokščių dengtų vilkimo paviršių. Tyrime netiesioginiu būdu įvertintos šiurkštumo funkcijos ir šiurkštumo Reinoldso skaičiai, kelioms dangoms. CFD tinklinio programinės įrangos sienos funkcijai naudojamas tinkamiausias dangų nelygumo funkcijos modelis. Atliktos CFD simuliacijos vilkimo bandymuose ir gauti rezultatai buvo patvirtinti pagal eksperimentinius duomenis. Galiausiai anti – faunos dangų poveikis tanklaivių trinties atsparumui buvo patvirtintas prognozuojant CFD modeliu.[23]

K. Zhang, H. Katsuchi, D.Zhou, H.Yamada, T. Zhang, Z. Han (2017 m.) atliktas skaitmeninis tyrimas apie lanksčiai sumontuoto banguoto cilindro (5 pav.) sūkurinių vibracijų mažinimą esant kritiniams Reinoldso skaičiams. Banguoti cilindrai veiksminga kontroliuojamoji srauto konstrukcija, sumažinanti skysčio sukeltą jėgą. Tačiau, dar neaiškus lanksčiai sumontuoto banguoto cilindro hidro – elastingas elgesys. Šis tyrimas pateikia sistemingą srautą aptekėjimą aplink banguotą cilindrą esant Reinoldso skaičiui  $Re = 5000$ , kurio rezultatai lyginami su paprastu cilindru tame pačiame skystyje ir tų pačių struktūrinių savybių. Tyrimo metu nustatyta, kad banguotas cilindras, beveik pašalina užnugarinius sūkurius, jei yra fiksuotoje pozicijoje, bet nustatytoje pozicijoje rodo tik ribotą sūkurių srauto sukeltos vibracijos poveikio švelninimą, nulinio slopinimo atveju. Banguoti cilindro hidrodinamines jėgos ženkliai padidina lankstumą standžiai sumontuos konstrukcijos. Fazinis atsilikimas tarp kilimo koeficiento ir poslinkio yra aiškus iš pradinės padėties 0 laipsn. į 180 laipsn. Apibendrintai, nepaisant fakto, kad nereikia išlyginti dažnio konstrukcijoje, banguotas cilindras turi visus panašumus iš paprasto cilindro. Tai reiškia kad sūkurių sukeltas vibracijos nėra dėl užnugarinio sukeltų sūkurių. Atliekant papildomus tyrimus su nuliniu struktūriniu slopinimu leidžia atskleisti, pakankamai aukštus banguoto cilindro struktūrinius slopinimus, tuomet vibracija sumažinama efektyviau nei su paprastu cilindru.[24]

S. H. Rhee, C. Lee, H. B. Lee, J. Oh (2010) atliktas skaitmeninis ir eksperimentinis kavitacijos atsiradimo tyrimas. Pradžioje eksperimentas nustato kavitacijos ir slėgio skirtumus vairo srityje, tipiniams kroviniams laivams su slopinimo įrenginiais ir be jų. Eksperimentai buvo modeliuojami naudojant skysčių dinamikos įrankiais, rezultatai palyginti atsižvelgiant į kavitacijos atsiradimo vietas ir paviršiaus slėgio pasiskirstymą. Pagrindinis supratimas apie kavitacijos atsiradimą plyšiuose buvo gautas kartu su slėgio

pasiskirstymu vairo srityje. Eksperimentas patvirtino, kad slopinamieji įrenginiai ne tik sumažina kavitacijos atsiradimą, bet ir pailgina eksploatacijos laiką. [8]



5 pav. Banguoto cilindro tiriamo modelio koordinatinių ašies išdėstymas.[24]

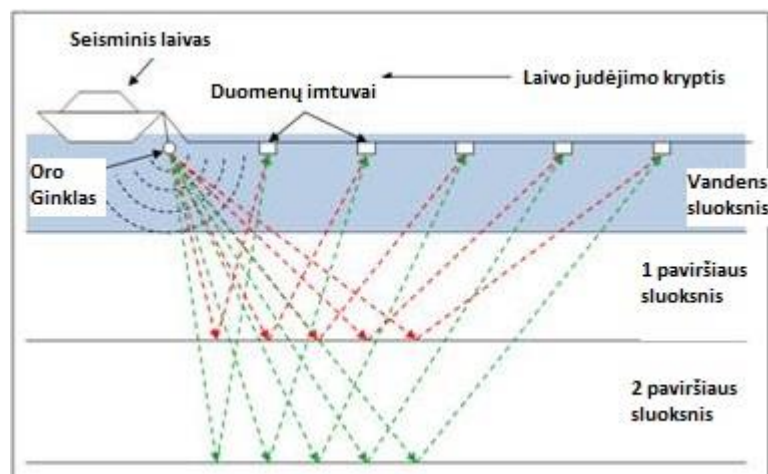
**Išvada:** Atlikę mokslinės literatūros analizę, išanalizavome atliktus tyrimus susijusius su sparnų, lyno aptekėjimu, patobulinimais, skaičiuojamosios skysčių dinamikos ir kitų metodų pritaikymu. Tai leidžia susidaryti platesnį vaizdą apie atliekamą mokslinį tyrimą ir jo svarbą.

## II. TEORINĖ DALIS

### 2.1. Tiriamo objekto eksploatacinių savybių bei sąlygų nustatymas

Seisminis tyrimas tai – vienas iš pažangiausių būdų suteikiančių galimybę išgauti informaciją iš jūros dugno bei ją analizuoti. Gaunami duomenis turi svarios priežasties atrandant naujus iškasenų šaltinius naftos, angliavandenių pramonės šakoms. Atliekamo seisminio tyrimo principas – sugeneruojant seisminę bangą po dugno paviršiumi, kuri perduoda duomenis į jautrius tempiamus lino esančius vandens paviršiuje. Tokie tyrimai leidžia tirti ne tik jūros dugno infrastruktūrą bet ir kitas uolienas esančias giliai po pirmu žemės sluoksniu. Procesą apsunkina ir tai, jog yra atliekami tyrimai, kai jūros dugnas šimtą ar net tūkstantį metrų po vandeniu. Jautrių sugeneruota informacija paverčiama į skaitmeninį signalą, kuris keliauja į pagrindinį kompiuterį laive. Gautas signalas apdorojamas specialia programine įranga, kuris galiausiai gautus signalus suformuoja į skaitmeninių sluoksnių žemėlapius. Gauti duomenis yra išanalizuojami geofizikos ir geologijos mokslininkų bei nustatoma, potencialias vietas išgauti naudingas iškasenas žmonijai. Pats tyrimas kainuoja didelius kaštus bei ilgoje perspektyvoje jis atsiperka, todėl, kad šis tyrimas galimai leidžia apdrausti įmonės statinius, sumažinant riziką į nuostolius bei padidinant potencialią naudą.

Mokslinio tyrimo objektas – sparnas pritvirtintas prie laivų tempiamo metalinio lino. Šios sistemos taikomos laivuose, kurie tiria vandens dugno infrastruktūrą (6 pav.), tyrimai naudingi dėl daugelio priežasčių, o tiriamasis objektas reikalingas siekiant išvengti tempiamo skersinio lino sukeltų vibracijų, kurios iškraipo jautrių priimamus duomenis.



6 pav. Tiriamos sistemos pavyzdys[6]

Laivui tempiant lyną, prie kurio tvirtinami seismografiniai jutikliai yra veikiami vibracijų, dėl šios kritinės priežasties gaunami iškraipyti rezultatai. Vandens srautui aptekant tempiamą lyną už jo susidaro turbulentinis tekėjimas, susidaręs tekėjimas sukelia vibracijas. Siekdami išvengti sukeltų vibracijų bei

pailginti metalinio lyno eksploatacijos laiką buvo suprojektuoti kreipiantieji sparnai, padedantys sumažinti sukiamas neigiamas vibracijas.

Taip pat yra naudojami alternatyvus būdai, leidžiantys mažinti lyno vibracijas. Vienas iš tokių konstrukcinių būdų yra “švelninantys” siūlai (7 pav.). Šią konstrukciją sukūrė ir pasiūlė kompanija “Dyneema” seisminių laivų užsakovu reikalavimu [6].



7 pav. Prie lyno pritvirtinti slopinantieji siūlai

Vandens dugno tyrimai atliekami visame pasaulyje, pasitelkiant seisminius laivus. Pasitelkus vienos iš kompanijų, kuriuos atlieka šiuos tyrimus patikimais duomenimis žinome, jog laivo greitis apytiksliai siekia 6 mazgus.

## 2.2. Esminės skysčių savybės

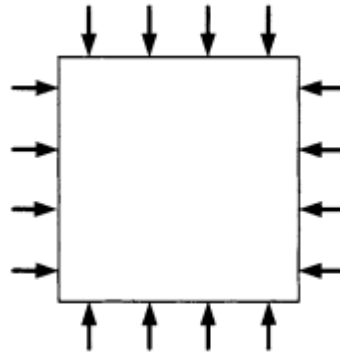
Atlikus literatūros šaltinių analizę, inžineriniu lygmeniu, prieita išvada, kad skystį pakanka laikyti, kaip esančią pastovią priemonę, kuriai būdingas nenutrūkstamas deformavimasis, priklausant nuo talpos į kurią jis bus patalpintas. Tačiau negebančiu išlaikyti savo pastovios formos tiek, kiek galėtų leisti šis atitikmuo [16]

Žinodami, jog yra dviejų rūšių skysčiai, vieni gali būti santykinai suspaudžiami ir natūraliai užimti numatyta poziciją pačioje žemiausioje talpos vietoje, kiti – dujos, kurios gali būti suspaustos bei išsiplėsti iki tiek, kad užimti visą talpą.

Žemuose greičių srautuose dažniausiai nėra išskiriama rūšis iš šių dviejų skysčių, kadangi besikeičiant skysčių spaudimui, jis santykiniai toks mažas, kad nesukeltų žymaus tankio pokyčio, net jei tai būtų dujos, bet kieta medžiaga, esanti skystyje, ne normalioje būsenoje, susidaro iš dviejų komponentų:

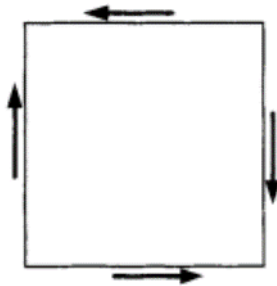
**Tiesioginis spaudimas**, tai – spaudimas įprastai veikiantis medžiagos elementus paviršiaus atžvilgiu, (8 pav.), ir lokalizuotas (vietinis) spaudimas, kuris įvardinamas kaip: spaudimas ekvivalentiškas normalinės jėgos poveikiui paviršiaus ploto vienetui [16]. Skystyje esant ramybės ar judėjimo būsenoje,

tiesioginiam spaudimui veikiant per mažą skysčio elementą, susiformuoja skysčio slėgis, kuris veikia būtent tą skysčio tašką.



8 pav. Tiesioginis spaudimas [16]

**Pereinantis spaudimas** – spaudimo rūšis veikianti skirtingai su medžiagos elemento paviršiumi, (9 pav.), o vietinis judėjimo spaudimas minimas kaip, judesio spaudimas, lygus tangentinės jėgos paviršiaus ploto vienetui.



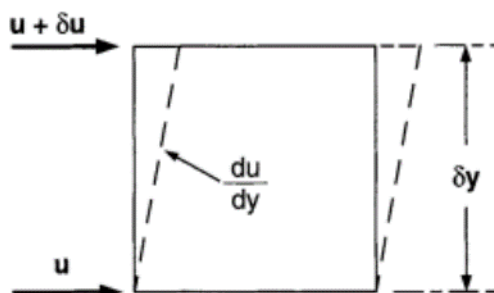
9 pav. Pereinantis spaudimas [16]

Ramioje būsenoje, judėjimo spaudimo skystyje – nėra. Kietosiose medžiagose, judėjimo spaudimas – judėjimo krūvio funkcija. Skystyje, kuris juda, spaudimas yra rodiklio funkcija, kurioje atsiranda judėjimo krūvis, (10 pav.). Galima tai įvardinti, kaip greičio pokytis srauto metu.



10 pav. Perėjimo krūvis [16]

Daugelio inžinerinių skysčių santykis, (11 pav.) – linijinis.



11 pav. Perėjimo spaudimas [16]

Skysčiai sukeltys judėjimo spaudimą dėl pereinančios srovės – vadinami klampiais ir skaičiuojami pagal formulę:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1)$$

čia:  $\mu$  – dinaminio klampumo koeficientas;

$\rho$  – skysčio masės tankis.

1 lentelė. Gėlo vandens, jūros vandens ir oro klampumas.

Temperatūra (°C)	10	15	20
Kinematinis klampis (m <sup>2</sup> /s)			
Gėlas vanduo x 10 <sup>5</sup>	1.30	1.14	1.00
Jūros vanduo x 10 <sup>5</sup>	1.35	1.19	1.05
(Slėgis = 1 atm)			
Oras x 10 <sup>5</sup>	1.42	1.46	1.50

2 lentelė. Gėlo vandens, jūros vandens ir oro tankis.

Temperatūra (°C)	10	15	20
Tankis (kg/m <sup>3</sup> )			
Gėlas vanduo	1.000	1.000	0.998
Jūros vanduo	1.025	1.025	1.025
(Slėgis = 1 atm)			
Oras	1.26	1.23	1.21

Plačiausiai pasitaikantys skysčiai – oras ir vanduo, bet jie sąlyginiai nedaug klampūs. Inžinerinio dizaino taikymui, kinematinio klampumo reikšmės ir tankio rodikliai pateikti lentelėse 1 ir 2. Gėlo ir jūros vandens bei oro kinematinio klampumo vertės – pateiktos lentelėje 1, o gėlo ir jūros bei oro tankio vertės – lentelėje 2.

- **Vienodas srautas** - aptinkamas greičio, spaudimo ir tankio parametruose. Jei išvardinti parametrai nėra kintantys nuo taško iki taško numatytame regione, galime teigti, jog srautas šiame regione yra laikomas pastoviu.
- **Pastovus srautas** – esant pastoviai srovei, įvairių parametų, tokių kaip spaudimas, tankis ar greitis, nekitimas bet kuriame laiko taške. Tačiau greitis ir spaudimas gali skirtis nuo taško iki taško.
- **Srovės linija**, tai – virtuali kreivė, esanti skystyje, per kurią neteka jokie skysčiai bet koku momentu. Tokiu metu, kiekvienos dalelės greitis srovės linijoje yra kitokios krypties, nei pati linija (12 pav.). [16]



12 pav. Srovės linija [16]

Tai suteikia tinkamą srauto indikaciją, bet esant pastoviai srovei modelis išlieka nepakitęs. Priimame, kad modelis turi būti laikomas momentiniu. Srovės linijos yra ribos, per kurias neteka srovė. Įpurškus į vandenį indikatorių, toki kaip dažai, galime nustatyti pastovią srovės liniją.

### 2.3. Skysčio judėjimo sukeltos jėgos

Srovės greičio kitimas leidžia įvairiuose skysčiuose aptikti jėgas. Pritaikius Antrąjį Niutono dėsnį:

$$F = \text{masė} \times \text{momento pokyčio} \quad (2)$$

Fiksuotos masė  $m$ , kur viskas juda vienodu greičiu  $u$ , dėsnį galime užrašysime taip:

$$F = \frac{d(mu)}{dt} \quad (3)$$

Pritaikius tipinį propelerį, kur trauka ( $T$ ) – pagaminama didinant skysčio tekėjimo greitį nuo  $V_1$  iki  $V_2$  užrašoma taip:

$$T = m(V_1 - V_2) \quad (4)$$

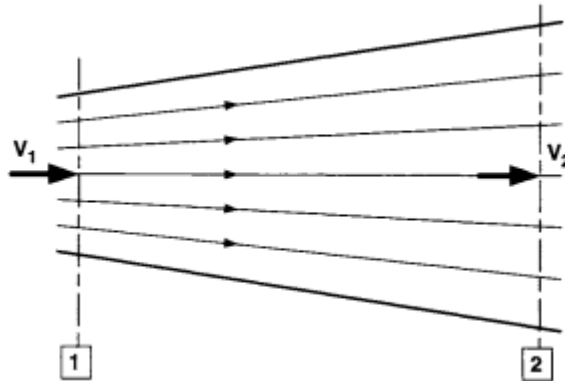
čia:  $m$  – masės srovės rodiklis;

Atliktus analizę tarp tarškų (1) ir (2), (13 pav.), vamzdyje. Srovei nesant prie sienelės ir pastoviam srovės tęstinumui:

$$T = \delta_1 A_1 V_1 = \delta_2 A_2 V_2 \quad (5)$$

Jei  $\delta_1 = \delta_2$  tuomet:

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 = \text{const} \quad (6)$$



13 pav. Nenutrūkstamumas

**Judančiame skystyje slėgio ir greičio pokytis** – aprašomi remiantis Bernulio dėsnio:

$$\frac{P}{\delta g} + \frac{u^2}{2g} + z = H = \text{const} \quad (7)$$

Dėsnis galioja tuomet, kai srovė neturi trinties ir ji vadinama netąsia, stabilia ir pastovaus tankio.

$H$  reiškia visą energiją. Esant šioms sąlygoms ji lygi konstantai bet kuriai skysčio dalelei, per visą jos judėjimą bet kuria srovės linija.

Lygtyje,  $\frac{P}{\delta g}$  reiškia slėgio maksimumą, o  $\frac{u^2}{2g}$  - greičio maksimumas (kinetinė jėga).  $Z$  potencialią jėgą dėl gravitacijos. Alternatyvi Bernulio dėsnio slėgio formulė yra:

$$P_0 + \frac{1}{2} \rho u_0^2 + \delta g z = P_T \quad (8)$$

čia:  $P_T$  – visas slėgis;

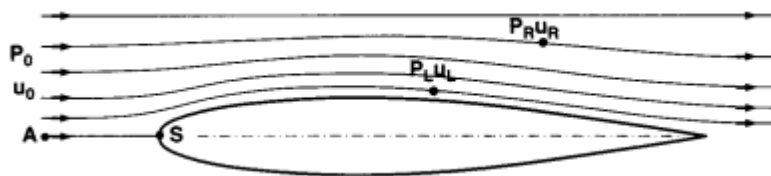
Pavyzdžiui, svarstydami srovę tarp dviejų taškų srovės linijoje, (14 pav.)

$$P_0 + \frac{1}{2} \delta u_0^2 + \delta g z_0 = P_r + \frac{1}{2} \delta u_R^2 + \delta g z_R \quad (9)$$

Kur  $P_0$  ir  $u_0$  – netrukdoma srovė prieš srovę ir  $P_L$  ir  $U_L$  yra šalia kūno.

*Bernulio dėsnio bendrinis komentaras.* Dėsnis yra tikslingai taikomas netąsiems skysčiams, bet turėtų būti pažymėta, kad, nors ir realybėje skysčiai be trinties ir netąsūs neegzistuoja tai yra aktuali įžvalga, kuri dažnai įtraukiama į skysčio srovių aprašymus. Jei Bernulio dėsnį taikytume realiems skysčiams, tai nebūtinai privedtų prie žymių klaidų, kadangi klampumo įtaka stabilioje srovėje įprastai yra pritaikoma

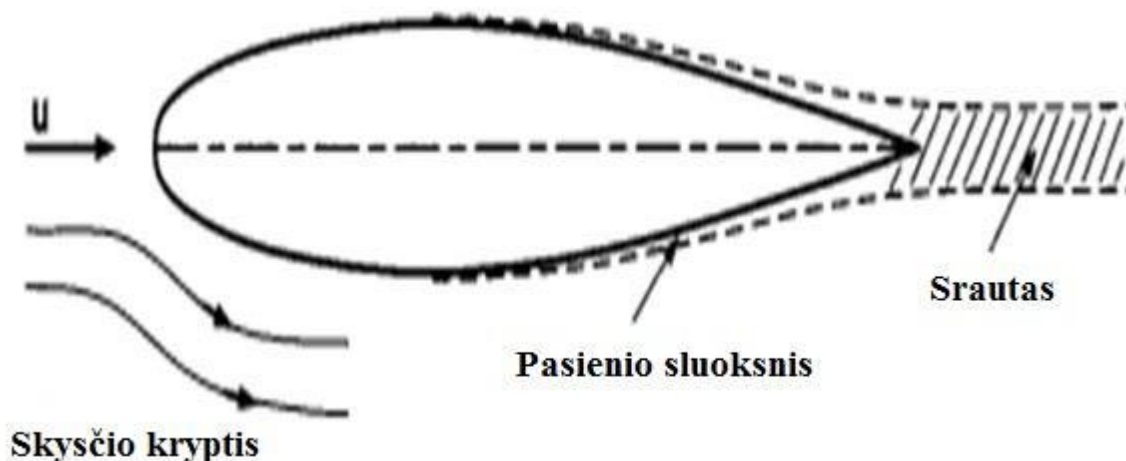
efektyviam prisitaikymui prie kietų ribų ir išdėstoma už kietų ribų. Srovės likutis gerai išsklaidytas kietame kūne ir vadinamas išorės srove, elgiasi efektyviai, tarsi tai būtų netąsus skystis, net jei yra priešingai [9].



14 pav. Slėgio ir klampumo pokytis

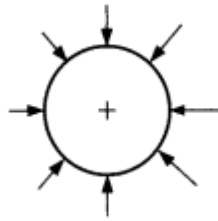
## 2.4. Pasienio sluoksnis

Ne daug klampiam skysčiui aptekant kūną, judėjimo sukelta įtampa yra juntama tik plonyčiame sluoksnyje šalia kūno, kuris vadinamas pasienio sluoksniu. Klampaus srauto suformuotame skysčio pasienio sluoksnyje yra išvaloma kūnui judant pasroviui (15 pav.). Pasienio sluoksnio storis kinta pagal kūno ilgį ir tipiškai yra 2-3% kūno ilgio, atsižvelgus į jo storį kūno galinėje dalyje [18].



15 pav. Pasienio sluoksnis ir išorinis srautas [12]

**Išorinis srautas** – pasienio sluoksnio išorėje (16 pav.). Judėjimo sukelta įtampa yra atmestiniai maža ir skystis elgiasi tarsi būtų visiškai netąsus, t. y. neklampus ir be trinties. Tokios rūšies skystyje, jo elementai juda tik dėl spaudimo įtakos. Svarstant dėl skysčio sferinio elemento, galime teigti, kad tokie spaudimai veikia per sferos centrą, tam kad pagaminti grynąją jėgą, sukelti perkėlimo judesį, (16 pav.). Tačiau nėra mechanizmo, kuris pagamintų momentą, galintį pakeisti elemento kampinį momentą. Darant prielaidą, kampinis momentas išlieka konstanta visam laikui, nors jei iš pradžių srovė pradėjo judėti nuo ramybės būsenos. Viso skysčio kampinis momentas yra lygus 0 – ui visam laikui, todėl išorinė srovė neturi rotacijos ir yra netaisyklinga [16].

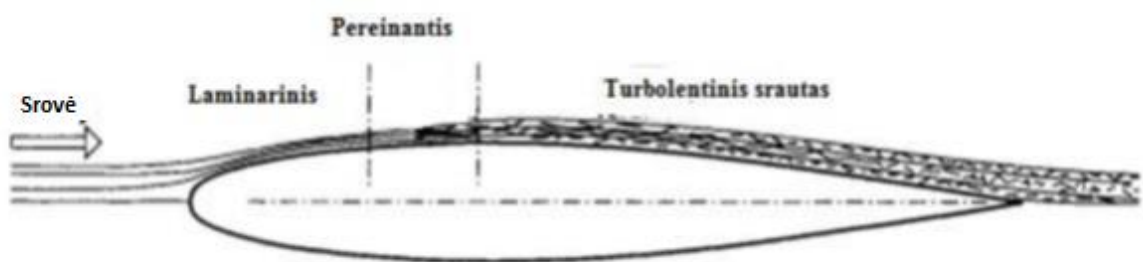


16 pav. Skysčio sferinio elemento spaudimas [16]

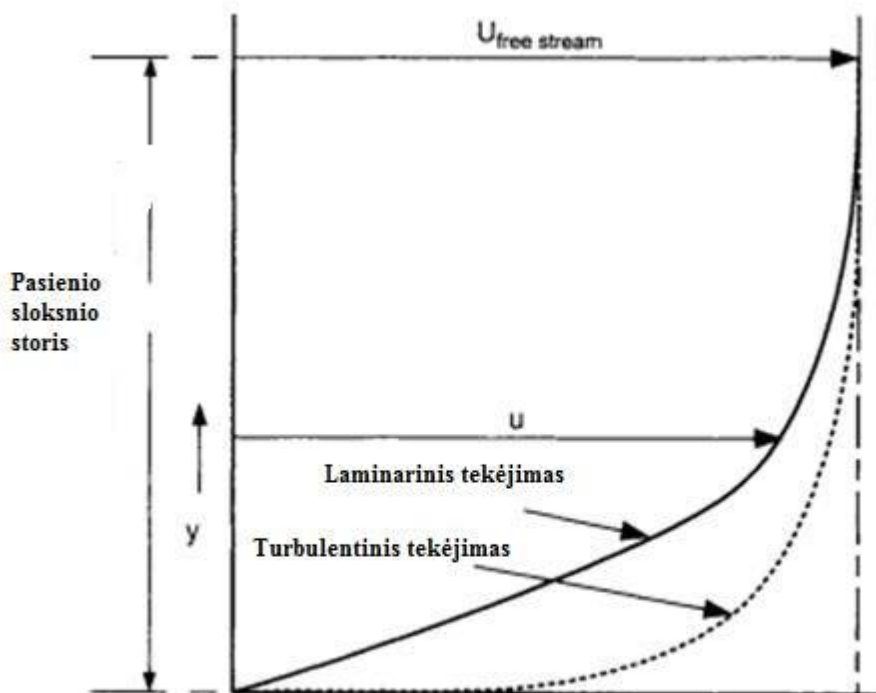
**Tekėjimas pasienio sluoksnyje** – nestabilus ir srovė, kuri pasienio sluoksnio priekyje pastovi ir sklaidi, pabaigoje išsiskaidys į labai nestabilią srovę, galinčią tęstis per didžiąją dalį pasienio sluoksnio.

Išskiriamos 3 tekėjimo rūšys, (17 pav.)

- **Laminarinio tekėjimo sluoksnis** – pasienio sluoksnio regione esanti srovė yra sklaidi, tvarkinga ir pastovi, arba besikeičianti nuosekliai, lėtai.
- **Perėjimo sluoksnis** – sklandžio srovės lūžis šiame regione.
- **Turbulentinės srovės sluoksnis** – šiame regione srovė pasidaro nepastovi su besikeičiančiais judesiais bei pasienio sluoksniu. Turbulentiniame regione, srovę galime aprašyti pridodant turbulencijos greičio komponentus, turint nulinį vidurkį per laiko periodą, virš stabiliai ar lėtai besikeičiančio vidurkio. Įvairiai paskirsčius turbulencijos greičio komponentus, tipinis paskirstymas –  $\pm 20\%$  vidutinio greičio. Būtina paminėti: srovė esanti turbulencijos pasienio sluoksnio išorėje gali būti sklaidi ir pastovi ir turbulentinė srovė susiformuoja ne dėl srovės linijos, kaip tai gali nutikti plokštumoje. (18 pav.) parodytas tipinis greičio pasiskirstymas sluoksniniams ir turbulentiniams paribio sluoksniams. Kieto kūno paviršiuje, skystis yra ramioje būsenoje, santykinai su kūnu. Išorinio paribio sluoksnio kraštelyje, distancijoje  $\delta$ , skystis turi laisvos srovės greiti santykinai su kūnu.



17 pav. Turbulentinis srautas [12]



18 pav. Tipinių greičių profiliai pasienio sluoksnyje [12]

Perėjimo nuo sluoksninio iki turbulentinio srauto antplūdis priklausys nuo skysčio greičio ( $v$ ), atstumo ( $l$ ), kurį jis nukeliavo palei kūną ir skysčio kinematinio klampumo ( $\nu$ ). Tai yra charakterizuojama Reinoldso srovės skaičiumi ( $Re$ ), įvardijamu kaip:

$$Re = \frac{vL}{\nu} \quad (10)$$

Yra žinoma, kad kai  $Re$  viršija  $0.5x$  tada, net ir sklandžiam kūnui, srovė taps turbulentine. Tuo pačiu metu, kūno paviršiaus baigtis, pavyzdžiui, jo šiurkštumo lygis, darys įtaką perėjimui nuo sluoksninio iki turbulentinio srauto.

Perėjimas taip pat priklausys nuo turbulencijos kiekio, patirto tuo metu, kai kūnas keliavo skysčiu. Atsižvelgiant į vandenyno bangų, srovių, seklių vandenų ir kitų lokalių griovimų veiksmus, laivo varas ir valdymo paviršiai veiks pagrindė vandenyse su aukšto lygio turbulencija. Galiausiai, jų pasienio sluoksnis bus normaliai turbulentinis. Tik palyginti ramioje būsenoje ir esant mažam greičiui, tikėtina išlaikyti sluoksninį pasienio sluoksnį.

**Paviršiaus trinties pasipriešinimas** – kūno paviršiuje frikcinio judėjimo spaudimo veiksmas veda prie frikcinės traukos jėgos, priešingai jei kūnas juda skystyje. Tipiškas pasienio sluoksnio greičio profilis sluoksninėms ir turbulentinėms srovėms yra parodyti (17 pav.). Paviršiaus judėjimo spaudimas ( $\tau_w$ )

priklauso nuo skysčio klampumo ir greičio profilio šlaito, ar greičio nuolydžio kūno paviršiuje.

Tai yra:

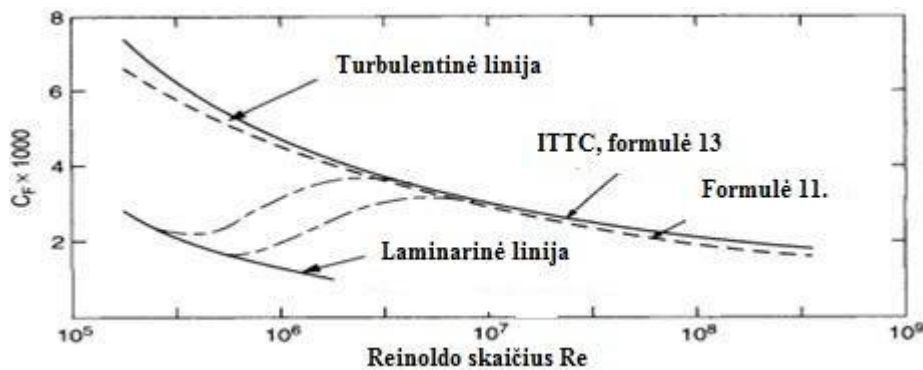
$$\tau_w = \mu \left( \frac{\beta u}{\beta \gamma} \right)_{y=0} \quad (11)$$

tada paviršiaus trinties koeficientas galėtų būti įvardintas kaip:

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (12)$$

(19 pav.) matome, jog greičio nuolydis kūno paviršiumi yra didesnis dėl turbulentinio pasienio sluoksnio. Paviršiaus frikcijų trauka kartu su turbulentine pasienio sluoksniu yra didesnė nei sluoksninio pasienio sluoksnio. Bendras  $C_F$  per intervalą  $Re$ . Žemame Reinoldso skaičiuje sluoksninė srovė atsiranda su žemesniu  $C_F$ , o su didesniu  $Re$  skaičiumi srovė yra turbulentinė [16].

Išraiškos intervale  $Re = 10^5 - 10^6$ , srovė gali būti sluoksninė arba turbulentinė, tai priklauso nuo kūno paviršiaus baigties ir srovės turbulencijos lygio.



19 pav. Paviršiaus trinties linijos

Paviršiaus trinties koeficiento  $C_F$  ir pasienio sluoksnio storio apskaičiavimai gali būti atlikti dėl laminarinių arba turbulentių reiškinių. Laminariniam tekėjimui skaičiuoti, naudojama Blazijaus formulė:

$$C_F = 1,328Re^{-\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$\frac{\delta}{x} = 4,91Re_x^{-\frac{1}{2}} \quad (13)$$

čia:  $x$  - atstumas nuo priekinio krašto.

Turbulencinei srovei, naudojant 1/7 jėgos-dėsni greičio pasiskirstymas:

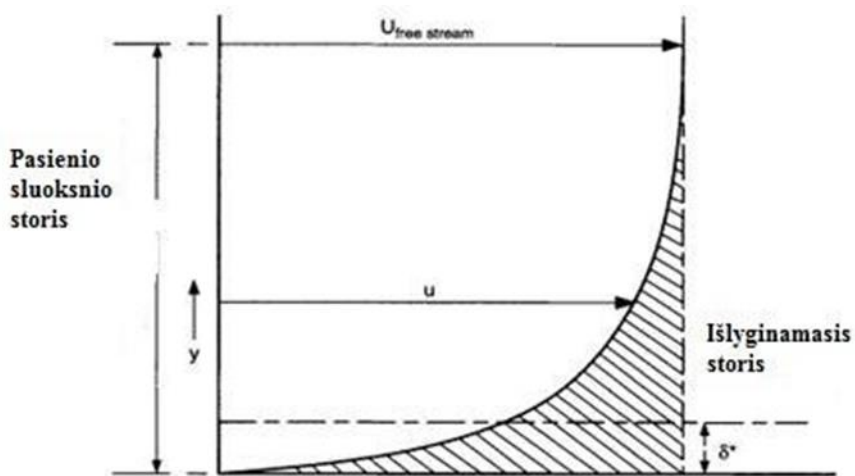
$$C_F = 0,072Re^{-\frac{1}{5}} \quad (14)$$

$$\frac{\delta}{x} = 0,370Re_x^{-\frac{1}{5}} \quad (15)$$

Tolimesnė apytikslė formulė, tinkanti plačiam intervalui Re yra ITTC (formulė 16) paviršiaus trinties koreliacijos koeficientas:

$$C_F = \frac{0,075}{[\log Re - 2]^2} \quad (16)$$

**Ribinio sluoksnio storis** - paribio sluoksnis suteikia srovės sumažėjimą, parodytą (20 pav.) kaip užtamsinta erdvė.



20 pav. Ribinio sluoksnio storis [16]

Ne klampių, skysčių be trinties srovės gali būti sumažintos tuo pačiu kiekiu, jei paviršius yra išstumtas išorėn atstumu  $\delta$ , kai  $\delta$  yra pavadintas poslinkio tankumu. Poslinkio tankumas - skirtas tam, kad sumažinti valdymo paviršiaus efektyvią trukmę ir efektyvų vaizdo santykį, kurių pagrindinis plotas veikia pasienio sluoksnyje. Taip pat galime įtraukti laivo vairą, dirbantį po plokščiu korpusu, ar kilio stabilizatorių, veikiantį pasienio sluoksnyje šalia triumo ar jo spindulyje. Skysčio srovės teorinėse simuliacijose su išgalvota klampia srove, nors ten nėra pasienio sluoksnio, kūno paviršius gali būti perkeltas į viršų, kad pagaminti kūno formą, tokia pačia, kaip be pasienio sluoksnio. Apytiksliai poslinkio tankumo skaičiavimai atliekami - Laminarinei srovei:

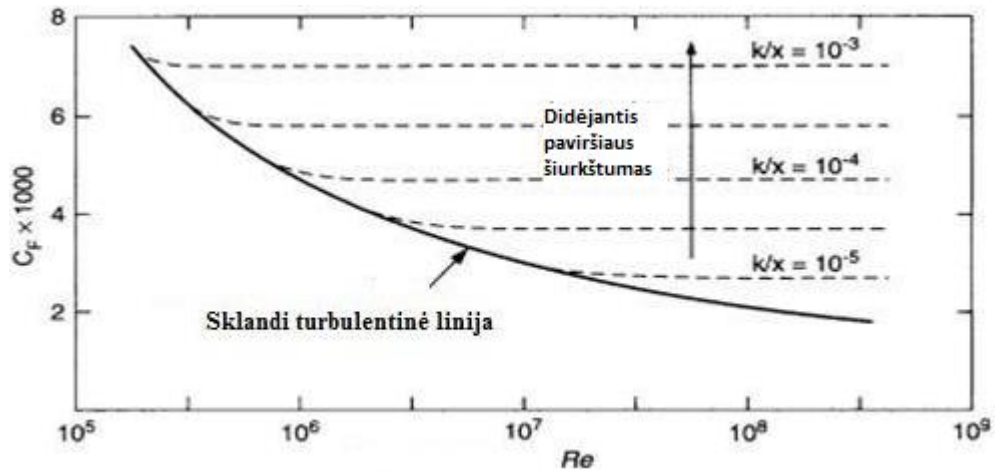
$$\frac{\delta}{x} = 1,721 Re_x^{-\frac{1}{2}} \quad (17)$$

Turbulentinei srovei, naudojant 1/7 jėgos-dėsnių greičio išsidėstymą:

$$\frac{\delta}{x} = 0,0463 Re_x^{-\frac{1}{5}} \quad (18)$$

Paviršiaus šiurkštumas suformuoja pasipriešinimą. Turbulentinis sluoksnis, kartu su laminarinio tekėjimo sluoksniu, esančiu prie paviršiaus, galimai sušvelnina nelygumus, tekančius mažyčiais nelygumais, be susiskaidymo. Nelygumas tik sukelia padidėjusią trauką, jei ši yra pakankamai didelė, kad

pranykti po posluoksniu (sluoksnis po pasienio sluoksniu).



21 pav. Paviršiaus šiurkštumo efektas [16]

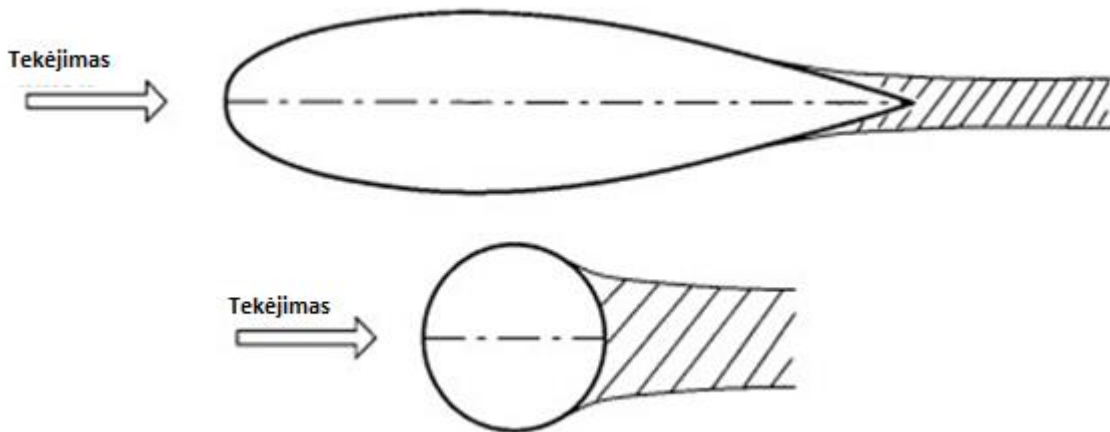
Jei paviršius - sąlyginai mažas, kad pilnai panirti laminariniame posluoksnyje, toks paviršius vadinamas hidrodinamiškai lygiu. Šiuo atveju parodytas, kaip lygi turbulentinė linija, (21 pav.). Reinoldso skaičiui padidėjus, tarkime, dėl padidėjusio tekėjimo greičio, posluoksnis tampa plonesnis ir galiausiai yra pasiekiamas taškas, kuriame traukos koeficientas nustoja galioti sklandžiai turbulentinei linijai, (21 pav.) nuo šio taško, padidėjusi separatinė trauka subalansuoja kritusį  $C_f$ . Nuo šiol, traukos lygis yra priklausomas tik nuo šiurkštumo lygio,  $k/x$ , kur  $k$  - šiurkštumo aukštis, o  $x$  - atstumas nuo priekinio krašto. Apytiksliai traukos lygiai nelygumų padidėjimui yra parodyti (21 pav.). Į detalią analizę būtų įtraukiamas nelygumo tankis ir lokacija, tokie kaip pasiūlyti Grigson'u.

Jei valdymo paviršius yra santykinai idealios būklės, be korozijos ir nesugadintas, jo apvalkalo frikcijos trauka gali būti apytiksliai nustatyta pakankamai tiksliai dizaino tikslais, naudojant sklandžią turbulentinę liniją, tokią kaip (19 pav. ar 21 pav.).

**Slėgio pasipriešinimas** – esant tekėjimui aplink kreivą paviršių, taip kaip apvalkalo slėgio pasipriešinimas, yra papildoma veiksnys, atsiradęs dėl spaudimo po kūno pasiskirstymo. Slėgio pasipriešinimas atsiranda dėl klampumo efekto. Kadangi, tai priklauso nuo kūno formos, taip pat gali vadintis formos pasipriešinimu. Taigi, paviršiaus slėgio pasipriešinimas atsiranda nuo judėjimo jėgos, tangentinės (priešingos) paviršiui ir spaudimo traukai nuo spaudimo jėgos  $P$  skiriamosios gebos normalios paviršiui, (3.4.8.pav.) Aptakūs kūnai turės, palyginti, mažą srautą ir pasipriešinimas bus daugiausia paviršiaus trintimi, tuo tarpu status kūnas su dideliu srautu turės didesnę spaudimo pasipriešinimo jėgą, (3.4.9.pav.). Aerodinaminio ar valdymo paviršiaus skirsnio atveju, frikcinės ir formos pasipriešinimo suma yra vadinama profilio ar skirsnio pasipriešinimu [16].



22 pav. Jėgos ant kūno [12]



23 pav. Slėgio jėgos poveikis ir pėdsakas

**Mastelio efektas** – tęsiant diskusiją apie laminarinį srautą, turbulentinį srautą ir Reynoldso skaičių ( $Re$ ), galima nustatyti mastelio efektą. Rezultata, kuomet keičiamas kūno dydis nuo modelio iki pilnos, realios apimties.

Pilnam dinaminiam panašumui ar tekėjimo sąlygoms, giliai panardintame kūne be paviršiaus bangų poveikių,  $Re$  turi būti vienodas abiem, tiek modeliui, tiek pilnos apimties kūnui. Visos apimties  $Re$  valdymo paviršiams, remiantis stygos ilgiu, tęsiasi apytiksliai nuo  $5 \times 10^5$  ant mažos jachtos vairo iki  $10^8$  ant didelio greito laivo vairo. Toks didelis skaičius  $Re$ , kaip  $10^8$  normaliai nepasiekiamas ant modelio. Atsargumo priemonių įprastai imamas mastelio modelyje, kad testuoti, kiek įmanoma didesnę Reinoldso skaičių, t. y., reikia turėti didelį modelį ir atlikti didelio greičio testą bei pritaikyti, kai kurias turbulentes simuliacijas šalia priekinio modelio krašto. Tai užtikrina, kad modelio pasienio sluoksnis yra turbulentinis, todėl atkartojama pilna apimties turbulentinė tėkmė. Bet koks likęs skirtumas  $Re$  skaičiuje gali vesti prie rezultatų poveikio nuo modelio apimties iki tikslios apimties. Pavyzdžiui, tai yra akivaizdu (23 pav.), kad pilnos apimties paviršiaus trinties jėga būtų didesnė, nei yra iš tikrųjų, jei tinkamas ryšys paviršiaus trinties pasipriešinimui, kai juda nuo modelio  $Re$ , sakykime,  $10^8$  iki pilnos apimties  $Re$ , sakykime,  $10^8$  būtų

netaikomas. Galimos tolimesnės valdymo paviršių pasekmės, tokios kaip maksimalaus pakėlimo ir pertvaros kampo pokytis.

## 2.5. Srauto atsiskyrimas

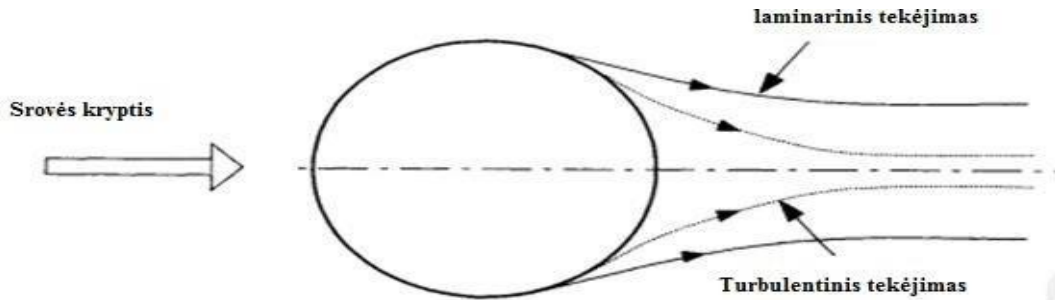
Srauto tėkmei lygiu paviršiumi, su pastoviu spaudimu tėkmės kryptimi, pasienio sluoksnis, atstumui didėjant, didėja tankis, bet tekėjimas neatsiskirs nuo paviršiaus. Jei spaudimas krenta tekėjimo kryptimi, vadinamas palankaus spaudimo nuolydžiu, tada tėkmė greičiausiai neatsiskirs. Jei, vis dėlto, spaudimas kyla pagal tekėjimo kryptį, žinomas kaip nepalankaus spaudimo rodiklis, tuomet yra santykinis greičio praradimas pasienio sluoksnyje. Šis procesas gali sumažinti greitį iki nulio tam tikrame taške palei kūno ilgį pasienio sluoksnio vidiniuose sluoksniuose, kaip parodyta (24 pav.) taške A. Tokiame taške, būdingas tėkmei vidurkis pasienio sluoksniuose keičiasi pastebimai ir pasienio srautai tampa tankesni. Tėkmė yra priešinga ant kūno paviršiaus, pagrindinis pasienio sluoksnis atsiskiria nuo kūno paviršiaus taške A. Atskirtos tėkmės įprastai yra nepastovios, sūkuriai periodiškai atsiskiria ir patenka į srautą, kuris juda pasroviui.

Turėtų būti paminėta, kad atsiskyrimas gali atsirasti laminarinio paribio sluoksniuose, taip kaip ir turbulentinė, be abejo didesnė tikimybė atsirasti laminarinio atveju. Pasienio sluoksnio greičio tyrimo profilis (18 pav.) rodo, kad laminarinis tekėjimas turi mažesnę momentą šalia paviršiaus, nei turbulentinis ir todėl yra labiau tikėtina, kad šis atsiskirs anksčiau, (3.5.2.pav.). Taigi, turbulentinė riba yra labiau atspari atskyrimui, nei laminarinė. Tai veda prie išvados, kad trauka dėl separacijos yra didesnė laminariniam tekėjime, nei turbulentiname. Tai taip pat paaiškina, kodėl golfo kamuoliukai su įdubomis, kurios sukelia turbulenciją turi mažesnę trauką ir nukeliauja didesnę atstumą nei originalūs lygūs golfo kamuoliukai.

Taip pat verta paminėti, kad tanki srovė sekančio atsiskyrimo neturėtų būti supainiota su pasienio sluoksnio tankėjimu pagal judėjimą nuo laminarinio iki turbulentinio srauto.



24 pav. Srautų atsiskyrimas [12]



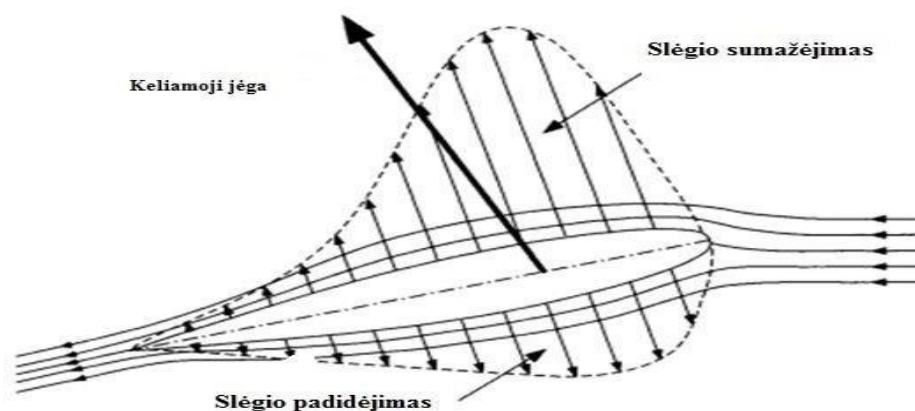
25 pav. Laminarinis ir turbulentinis tekėjimas [16]

## 2.6. Kavitacija

Įrenginiai, panardinti į skystį, gali turėti sumažėjusi veiksmingumą dėl tuštumų ar skylių formavimosi skystyje. Pavyzdžiui, taip gali atsitikti, kai siurbimas (neigiamas spaudimas) tampa aukštu ant kėlimo įrenginio. Kavitacija atsiranda, kai lokalinio skysčio spaudimas krenta iki skysčio garų spaudimo, t. y., spaudimas, kuriame skystis garuoja. Garų spaudimas priklauso nuo skysčio turinio temperatūros ir kokybės. Kavitacija gali atsirasti ant jūrinių laivų, valdymo paviršių, tokių kaip stabilizatoriai, atraminiai stovai ir propeleriai.

Ventiliacija ar aeracija yra bendrai panašūs į kavitaciją fenomenai, nepaisant to, kad ta tuštuma yra užpildyta oru, nukreiptu žemyn laisvuju paviršiumi. Slėgis tuštumoje yra įprastai atmosferinis, nors tuštuma gali užsidaryti po formacijos ir tada spaudimas krenta žemiau atmosferinio lygio, nes tuštumos apimtis didėja. Ventiliacija tipiška gali atsirasti ant paviršių persmelkiančių laivo vairų, tokių kaip laivo vairo ar jachtų ir valdymo paviršių ant povandeninių laivų.

**Keliamųjų sparnų duomenys** - įprastas skysčio įrenginys su povandeninis sparnas, sukurtas, kad gamintų kėlimo jėgą per visą įeinančios srovės kryptį. Kėlimo veiksmas atsiranda iš skirtumo tarp vidutinio skysčio spaudimo virš pakeliamojo sparno viršutinio ir apatinio paviršiaus, (26 pav.) Tokių pakeliamųjų sparnų tipiniai pritaikymai yra lėktuvų sparnai, povandeninių laivų, laivo vairų, stabilizatorių, propelerio geležčių ir irklų.



26 pav. Slėgio pasiskirstymas aplink sparną

**Išvada:** Išanalizavus skysčių hidrodinamikos principus susidarėme gilesnį vaizdą apie kūną veikiantį slėgio pasiskirstymą, laminarinį ir turbulenti tekėjimą, srautų atsiskyrimą, slėgio ir jėgos poveikį.

### III. MATEMATINIS EKSPERIMENTAS

Matematinis eksperimentas atliekamas kompiuterinės įrangos pagalba naudojant skaičiuojamosios skysčių dinamikos (SSD) programą. SSD tinka vietinėms srauto savybėms tirti bei nustatyti konstrukcijos elementų trūkumus. SSD padeda sumažinti dėl mastelio gautus netikslumus. SSD tyrimų darbo eiliškumą galime suskirstyti taip:

- **Sąlygų sudarymas** (tinklelio ir tyrimo modelio sudarymas). SSD eksperimentą (sąlygas) turi sudaryti kvalifikuotas SSD specialistas. Tinklelio sudarymas užima didžiausią laiko dalį. Automatinis tinklelio generavimas laivų tyrimams nėra labai plačiai paplitęs.
- **Skaičiavimas**. Skaičiavimams atlikti nereikia žmogaus darbo laiko. Neklampūs skysčiai gali būti nesunkiai skaičiuojami asmeniniuose kompiuteriuose, tačiau skaičiuoti klampiams skysčiams, rekomenduojama naudoti galingus kompiuterius arba naudoti kompiuterius sujungtus į skaičiavimo tinklą.
- **Duomenų apdorojimas** (grafinis duomenų atvaizdavimas, dokumentacija ir ataskaitos). Grafinis duomenų atvaizdavimas reikalauja galingesnės programinės įrangos. Duomenų apdorojimas užima tam tikrą laiko dalį (įprastai apie 10-15% viso laiko), bet gali būti atliekamas kvalifikacijos siekiančių įgyti specialistų. Dažniausiai duomenų apdorojimo sudėtingumas priklauso nuo SSD programos naudojimo paprastumo. Teisingas duomenų interpretavimas reikalauja aukštos kvalifikacijos ir ilgų darbo valandų.

**Apibrėžtinių elementų metodai** (*BEM angl. Boundary element methods*). BEM naudojamas potencialiems (*angl. Potential*) srautams. Tokiems srautams visos skysčio srities integralai gali būti transformuojami į integralus ties skysčio krašto ribomis. Šis perėjimas iš 3D į 2D paviršių supaprastina tinklelio sudarymą ir skaičiavimo laiką. *BEM* metodas apima paviršius, suskaidytus tam tikrą elementų skaičių ir atitinkamą jų išsidėstymo skaičių [12]. *BEM* - pagrindinai naudojamas SSD metodas, laivų statybos ir projektavimo srityje [12] nepaisant esamų klampaus skysčio modeliavimo metodų. *BEM* dažniausiai naudojamas bangoms ir laisvajam paviršiui tirti.

**Baigtinių elementų metodai** (*FEM angl. Finite element methods*). *FEM* dominuoja atliekant konstrukcijų analizę (*angl. structural analysis*). Laivo hidrodinamikai jie turi tik nedidelę reikšmę, todėl šis metodas detaliau nebus nagrinėjamas.

**Baigtinių skirtumų metodai** (*FDM angl. Finite difference methods*). *FDM*, kaip ir *FEM* metodas apima visą skysčio vietą. Baigtinių skirtumų metodas pagrįstas aproksimacija, t.y. dalinių išvestinių lygčių pakeitimu dalinių skirtumų lygtimis. Ši baigtinių skirtumų aproksimacija yra

algebrinės formos ir ieškomo kintamojo sprendimo vertė nustatoma iš greta esančių mazgų verčių [4].

**Baigtinių tūrių metodai** (*FVM angl. Finite volume methods*). Baigtinių tūrių metodas - universalus baigtinių skirtumų schemų sudarymo metodas. Jis taikomas net tada, kai diferencialinio uždavinio koeficientai turi trūkio taškų, taip pat kai tinklo žingsnis nėra pastovus arba uždavinys suformuluotas sferinių ir cilindrinų koordinačių sistemose [13]. Dauguma komercinių *RANSE* lygtimis paremtų programų yra paremtos *FVM*.

*FEM*, *FDM* ir *FVM* yra vadinami "lauko metodais" (*angl. Field methods*), nes jie apima visą skysčio lauką (tūrį), skirtingai nei *BEM*, kuris apima tik krašto ribas pvz.: (tik laisvąjį paviršių).

**RANS** - skaičiuojamoji skysčių dinamikos programa. Skysčių aptekėjimo skaičiavimams aplink kietą kūną - naudoja RANS (*angl. Reynolds averaged Navier – Stokes simulation*) skaičiavimų algoritmas. Dekarto koordinačių sistemoje ši lygtis užrašoma taip (Weymouth, et al, 2005, 81 p):

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \hat{p}}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{u_i u_j} \quad (19)$$

čia:  $U_i = (U, V, W)$  Reinoldso vidutinio greičio komponentai;

$x_i = (x, y, z)$  nepriklausomo koordinačių sistemos kryptys;

$p = \left[ \frac{(p - p_0) / \rho U^2 + z / Fr^2}{\infty} \right]$  yra pjezometrinis slėgio koeficientas;

$\overline{u_i u_j}$  - Reinoldso stresas, kuris turi koreliaciją dviem taškais su turbulenciniais svyravimais  $u_i$ ;

$Fr = \frac{U_0}{\sqrt{gL}}$  Frudo skaičius;

$Re = U_0 L / \nu$  Reinoldso skaičius;

### 3.1. Tinklelio sudarymas

SSD skaičiavimo metodikos remiasi į virtualios erdvės (ploto) suskaidymą į mažesnius elementus/daleles, kuriuose nustatomi vidutiniai srauto kintamieji [5]. Ši erdvė (plokštuma, paviršius arba tūris) vadinama tinkleliu. Tinklelis turi didelės įtakos konvergencijos (susiliejiimo) greičiui, sprendimo ir gautų rezultatų tikslumui, bei skaičiavimo trukmei ir reikalingiems kompiuterio resursams. Tinklelis pasižymi šiomis savybėmis:

- Tinklelis žymi elementą ar dalelę, kuriame sprendžiami srauto reiškiniai.
- Jis yra diskretus geometrijos problemos atvaizdavimas t.y. duomenys esantys jame sudaryti iš

skirtingų fizinių dydžių (pvz. temperatūra, masė, greitis).

- Dalelės yra sugrupuotos į apibrėžtinę ribą (*angl. Boundary zone*), kurioje nustatoma krašto/pasienio sluoksnio sąlyga (*angl. Boundary condition*) [1].

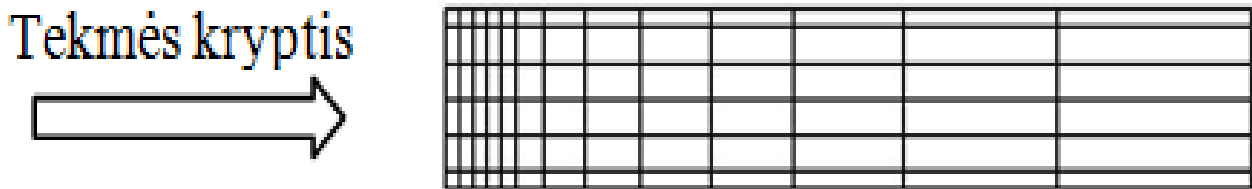
Svarbios tinklelio savybės į kurias reikia atsižvelgti norint gauti tikslius rezultatus:

- Tinklelio tankumas;
- Gretutinių elementų ilgio ir tūrio santykis;
- Asimetrija;
- Šešiakampis ar keturkampis elementas;
- Pasienio sluoksnio (arba krašto ribos) tinklelis;
- Tinklelio detalumas ir prisitaikymas prie objekto geometrijos.

Tinklelio tipas ir konstrukcija lemia SSD rezultatus. Pasirinkimas priklauso nuo geometrijos sudėtingumo, srauto krypties ir tipo, bei dalelių ir elementų, kuriuos palaiko skaičiuojamoji SSD programa. Sudarant tinklelį reikia atsižvelgti į tokias rekomendacijas ir reikalavimus:

- Trimatė sistema yra stačiakampių sistema apibrėžta plokštumomis lygiagrečiomis X, Y, Z koordinatėms[4].
- Šešiabriauniai elementai (*angl. cell*) duos tikslesnius rezultatus esant tam pačiam elementų skaičiui, ypač jei tinklelio linijos yra išdėstytos atsižvelgiant į srautą [1].
- Tinklelio tankumas turi būti pakankamai didelis, kad užfiksuotų visus reikiamus srauto reiškinius ir savybes [1].
- Didesnis kiekis elementų ir detalesnis tinklelis suteikia tikslesnius rezultatus, tačiau padidės reikalingi kompiuterio resursai ir skaičiavimo laikas, nes didėja skaičiavimo apimtis.
- Tinklelis esantis prie sienų (paviršių) turi būti pakankamai tankus, kad modeliuotų pasienio sluoksnio reiškinius. Šiose vietose labiau tinka, keturkampiai, šešiakampiai, ar kiti elementai[1].
- Kraštinių santykis tai santykis tarp ilgiausios ir trumpiausios kraštinės ilgių. 1 santykis idealus lygiakraščiams trikampiams ir kvadratui [1].
- Tinklelio dalelių dydžio pasikeitimas turi būti laipsniškas, švelnus ir sklandus. Gretimų elementų dydžio skirtumas neturėtų būti didesnis nei 20%.
- Rekomenduojama maža lygiakampių asimetrija, ji netūrėtų viršyti 0,85-0,9 reikšmės.
- Atitinkamam srautui turėtų būti sukurtas atitinkamas tinklelis. Elementų kraštinių santykis turėtų būti artimas vienetai ten kur srautas yra daugiamatis (juda x, y, z ašių kryptimis).
- Keturkampės arba šešiakampės formos elementai gali būti ištempti srauto tekėjimo kryptimi, ten kur srautas daugiausiai teka viena kryptimi (4.4.1.pav.).

- Tam kad dalelių (elementų) kiekis nebūtų per didelis, o rezultatai būtų pakankamai tikslūs reikia naudoti nevienodą (kintantį) tinklėlį, sutelkiant tinklelio elementus tik ten, kur jie reikalingi arba panaudojant preliminarius rezultatus esant grubiam tinkleliui tobulinti tinklėlį atsižvelgiant į gautus srauto rezultatus. Hibridinis tinklelis suteikia lanksčiausias galimybes.



27 pav. Teisingo kintančio tinklelio suformavimas srauto tėkmės kryptimi

### 3.2. Sparno vandens aptekėjimo modeliavimas naudojant skaičiuojamosios skysčių dinamikos (SSD) programa

Pagrindinis SSD trūkumų tai, jog rezultatai ir jų tikslumas priklauso nuo naudojamos SSD kompiuterinės programos, skaičiavimo metodo, sąlygų ir kitų parametrų. Tam, kad būtų gauti tikslūs tyrimo duomenys, būtina sudaryti teisingą eksperimento modelį ir sąlygas, todėl visų pirma orientuosimės į teisingą eksperimentinio modelio sudarymą. Pradžioje sudarysime keletą preliminarių bandymų. Eksperimentas atliekamas panaudojant FLOW-3D SSD kompiuterinę programą. FLOW-3D yra viską apimantis programinis paketas, kuriuo galima sudaryti simuliaciją (eksperimentą), ją apskaičiuoti ir apdoroti, todėl nereikalingi jokie kiti papildomi moduliai. Šia programa galima tirti reiškinius susijusius su šiluminės energijos perėjimu, 6 - iais laisvės laipsnių skysčio judėjimu ir sąveika bei mechaniniais, ir šiluminiais įtempimais, jėgomis. Laisvojo paviršiaus sekimui naudojamas TruVOF algoritmas. Tinklelio sudarymas atliekamas paprastai (pusiau automatiškai). Vizualizacija ir duomenų apdorojimas padeda lengviau suprasti tiriamus reiškinius, bei pateikti juos vartotojams ir klientams. Šios galimybės padeda tirti įvairius skysčių ir dujų reiškinius skirtingose pramonės ir mokslo srityse. Tyrimui reikalinga trimatė sparno konstrukcija. Kadangi FLOW-3D aproksimacijos (tiriama objekto atvaizdavimo) tikslumas daugiausiai priklauso nuo tinklelio dalelių kiekio (tankio), labai tiksliam sparno atkartojimui SSD programoje reikalingas ypač tankus tinklelis. Tokiu atveju smarkiai išauga skaičiavimo laikas ir reikalingi kompiuterio resursai. Padidinus dalelių kiekį iki tam tikros ribos skaičiavimas gali būti pernelyg ilgas arba neįmanomas, todėl itin aukštas dalelių kiekis yra nepraktiškas ir reikalauja daug laiko. Aproximuojant sparno konstrukciją taip pat iškyla problema norint atkartoti briaunas ir lūžius. Kuo tankesnis tinklelis, tuo sparnas atkartojamas tiksliau.

Dėl šios priežasties sparno korpusą modeliuosime apytiksliai, nes aukštesnis sparno korpuso tikslumas neduos mums jokio papildomo tikslumo jį aproksimuojant (atvaizduojant) FLOW-3D

programoje. Sparno braižymui naudosime kompiuterinę programą Autodesk AutoCAD. Pirmiausia programa AutoCAD bus braižomas jau esamo sparno brėžinys trimatėje erdvėje. Sparno korpuso modelį eksportuosime į .STL formatą, kurį vėliau importuosime į FLOW-3D programą.

**Preliminarus eksperimento sąlygų nustatymas** - teisingam eksperimento sudarymui būdingos tam tikros sąlygos ir reikalavimai. Pradiniame eksperimento sudarymo etape bandysime nustatyti optimaliausias eksperimento sąlygas, kurios suteiks mažiausiai klaidingus rezultatus. Pradžioje nustatysime teisingus tinklelio krašto ribų nustatymus. Tinklelio bloko krašto ribos nustatymai suteikia tinklelio bloko plokštumoms tam tikrą fizikinę būvį (savybes), pavyzdžiui priklausomai nuo nustatymų, skystis gali sąveikauti su minėta plokštuma, kaip su siena arba atvirkščiai, ištekėti.

Programoje FLOW-3D eksperimentą atliksime SI matavimo vienetų sistemoje, todėl laivo greitį išreiškiame metrais per sekundę. Užsakovo duomenimis, laivo ant kurio pakabinti šie sparnai maksimalus greitis - 6 mazgai. Maksimalus sparno plaukimo greitis apskaičiuojamas pagal formulę:

$$v = v_s \cdot 0.5144 = 6 \cdot 0.5144 = 3.086 \frac{m}{s}; \quad (21)$$

Čia:  $v$  – laivo greitis, m/s;

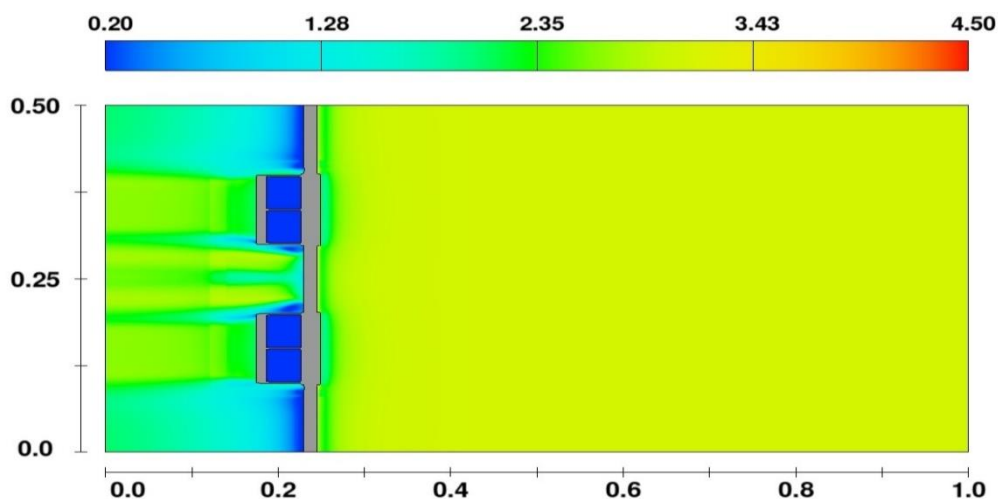
$v_s$  – laivo greitis mazgais, kt.

Moksliniame tyrime orientuojamasi tik į maksimalų plaukimo greitį, kadangi didėjant greičiui, didėja tikimybė susidaryti turbulentiui srautui ir sukuriams, to priežastis atsiradusios lyno vibracijos. Sudarant preliminarų eksperimentą (simuliaciją), nustatysime tokius jos parametrus:

- Priimama sąlyga, kad sparnas yra stacionariai įtvirtintas (nejuda), o jį apteka vandens srautas.
- Priimame sąlyga, kad sparnas dirba pilnai panardintas po vandeniui. Nustatomas greitis -3.086 m/s, x kryptimi.
- Eksperimento matavimo vienetai SI sistemoje. Temperatūra Celsijaus laipsniais.
- Eksperimento trukmė 30 s (*finish time*). Nusako eksperimento trukmę užduotomis sąlygomis.
- Tikimasi, kad per minutę srautas ir skysčio tekėjimas aplink sparną nusistovės ir taps pastovus. Vėlesniuose eksperimento žingsniuose trukmė galės būti sumažinta arba padidinta, priklausomai nuo pradinių (preliminarių) eksperimentų.
- Eksperimento skystis nustatomas vanduo. Skysčio savybes (vandenį) pasirenkame iš programoje pateikiamos skysčių bibliotekos. Joje vanduo pateikiamas 293 Kelvinų temperatūros ( $19,9C^0$ ), o jo tankis  $1000 \text{ kg/m}^3$ .
- Skaičiuojami klampūs skysčiai (*viscosity and turbulence*). Šis nustatymas įgalina programą modeliuoti reiškinius, kurie pasireiškia dėl skysčių klampumo.

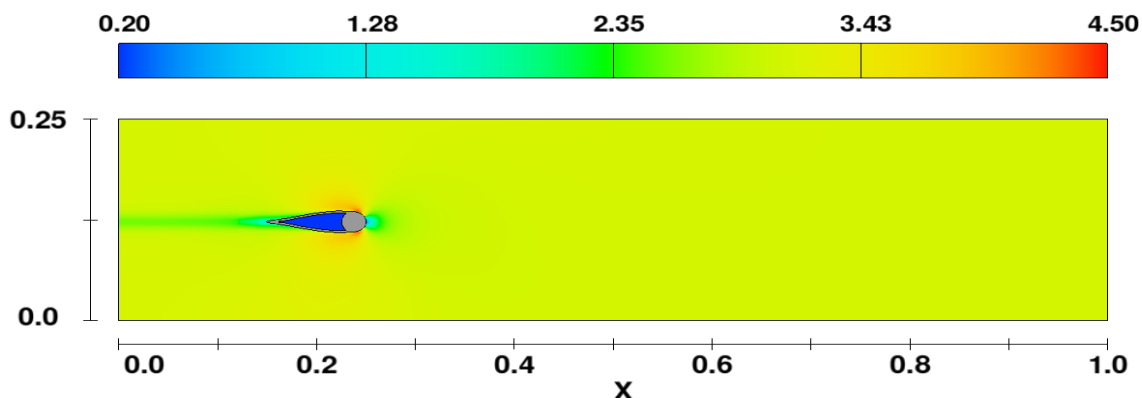
**Eksperimento rezultatai** - pagal simuliacijos/eksperimento duomenis bandysime nustatyti ir numatyti neigiamus srauto reiškinius. Taip pat nustatysime, dėl kokių priežasčių vienokie ar kitokie reiškiniai susidarė ir jų daroma įtaka sparnui. Duomenų analizei naudosime vizualines FLOW-3D rezultatų atvaizdavimo funkcijas, kurios padeda nustatyti vandens srauto greitį, pasipriešinimą, turbulentinį tekėjimą bei slėgį. Visi pateikti ir atvaizduoti tyrimo duomenys gauti pirmą tyrimo sekundę. Išanalizavus bandymo duomenis (1 priedas) paaiškėjo pagrindiniai paskutinės tinkamiausios modifikacijos sparno hidrodinaminiai trūkumai, kuriuos galime suskirstyti į kelias pagrindines grupes:

- Padidėjęs srauto greitis aplink sparno apvaliąją dalį.
- Netolygus srauto greičio pasiskirstymas už plačiausios sparno dalies.
- Išlikęs turbulentinio reiškinio susiformavimas už lyno.



28 pav. Vandens srauto greičių pasiskirstymas vaizdas iš viršaus

Išanalizavus dviejų sparnų pakabinto ant lyno duomenis, matome, kad labiausiai neraminantis reiškinys, tai padidėjęs srauto greitis aplink sparno apvaliąją dalį  $v = 4.39$  m/s, susiformuojantis turbulentinis srautas ir ganėtinai didelis pasipriešinimas  $F_{tr} = 5.83$  N (28,29 pav.), todėl tolimesniems tyrimams buvo nuspręsta atlikti simuliacija sparno su kaverna ir gautus rezultatus palyginti.



29 pav. Vandens srauto greičių pasiskirstymas vaizdas iš šono

**Išvada:** Kylančių laivų tempiamo lyno vibracijų atsiradimo priežastis yra sparno konstrukcija. Tolimesniame etape atliksime simuliaciją sparno su kaverna, tam kad sulėtinti vandens srautą aptenkanti sparną ir analizuosime tokios sparno formos pasipriešinimą bei vandens srauto greitį.

### 3.3. Naujos sparno formos optimizavimo variantų kūrimas

Skyriaus tikslas pagal gautus eksperimento rezultatus atliksime sparno konstrukcijos optimizavimą, siekiant pagerinti sparno hidrodinamines savybes t.y. padaryti sklandesnį srauto aptekėjimą. Alternatyvios (optimizuotos) sparno formos tiriamos esant identiškoms eksperimento sąlygoms, tam, kad būtų galima tiksliai palyginti skirtingas sparno modifikacijas bei jų įtaka hidrodinaminiais reiškiniais.

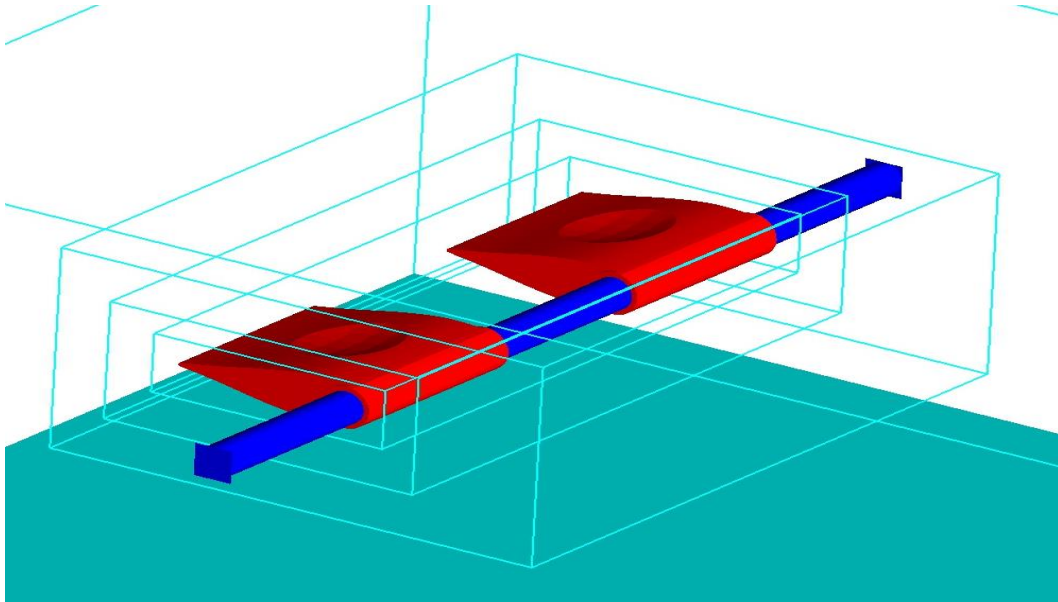
Optimizacija - efektyviausios konstrukcijos sprendimo radimą iš riboto arba neriboto galimų variantų skaičiaus. Kartais esant neribotam galimų variantų skaičiui neįmanoma iširti kiekvieno iš jų, todėl yra naudojami du pagrindiniai optimizavimo metodai [16];

1. **Tiesioginės paieškos metodas** (*angl. direct search approach*). Variantai kuriami/generuojami keičiant parametrus tam tikru žingsniu, laipsniškai arba atsitiktinai. Geriausias sprendimas laikomas optimaliu. Augant kintamųjų skaičiui sistemingas optimalaus sprendimo ieškojimas gali būti reikalaujantis daug laiko. Tokiu atveju tiriami atsitiktiniai variantai, tačiau jie taip pat nepakankamai efektyvūs esant dideliame kiekiui kintamųjų, kadangi apima tik mažą galimų sprendimo variantų dalį.
2. **Pakopų metodas** (*angl. stepness approach*). Optimalus sprendimas (variantas) sugeneruojamas naudojant vietinės funkcijos daugeliu krypčių ir surandant tų funkcijų ekstremumą (mažiausią arba didžiausią reikšmę). Pavyzdžiui x ir y ašyse atvaizduojamas vienas tiriamo objekto parametras, o x ir z ašimis kitas. Taip gaunamas trimatis šių funkcijų laukas (paviršius), kurio žemiausioji vieta (įduba) bus optimalus sprendimas. Daugeliu atveju toks optimizavimo būdas - naudingesnis, tačiau kai optimizavimo kreivės (paviršius) turi keletą ekstremumų, metodo sprendimas "įstringa" ties artimiausiu, todėl nėra randamas viso variantų lauko (globalus) optimizavimo sprendimas.

Norint gauti maksimalią optimizavimo naudą nereikia apsiriboti vien hidrodinaminiais optimizavimo aspektais. Atsižvelgiant į sparno konstrukcijos pakitimus arba technologinį modernizavimo ir optimizavimo įgyvendinimo sudėtingumą.

- **Pirmas optimizuoto sparno sudarymas** – naujam bandymui bus atliekamas K. Budgino „Tempiamo lyno vibracijų mažinimo galimybių tyrimo“ darbe optimaliausius rezultatus pasiekęs sparnas, tik plačiausioje sparno dalyje suformavus kaverną, kuri turėtų sulėtinti vandens srauto atsiskyrimą nuo sparno paviršiaus. Tyrimui atlikti bus naudojami du sparnai

pakabinti ant metalinio lyno 100mm atstumu (30 pav.). Atlikus šį tyrimą, išanalizavus duomenis(2 priedas) bus atliekamas tolesnis sparno optimizavimas naudojant tiesioginės paieškos metodo principą.



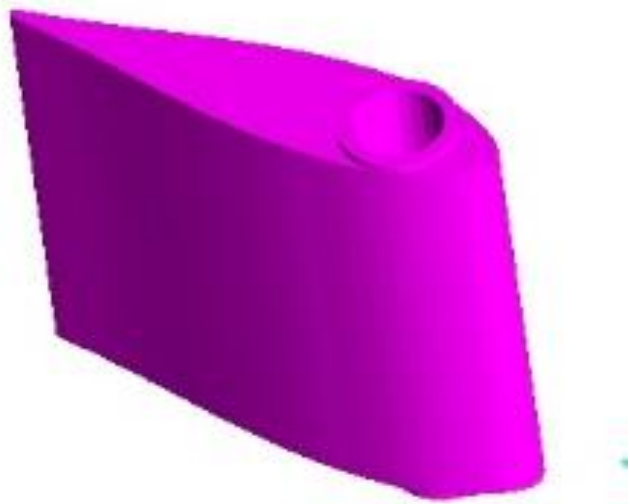
30 pav. Optimaliausias sparnas su kaverna 100 mm atstumu.

- **Antras optimizuoto sparno sudarymas** – atsižvelgus į seno sparno trūkumus (2 priedas), nuspręsta sumažinti kritiniame taške (plačiausioje sparno dalyje) srauto greitį, kuris siekia  $v = 4.39$  m/s, pailginant sparno priekį ir jį užapvalinant sklandesniam vandens srauto aptekėjimui, tikintis kad srauto greitis pasiskirstys tolygiai ar sumažės kritiniame taške. Sparnas (31 pav.) nubraižytas Autodesk AutoCAD kompiuterine programa ir eksportuotas į simuliaciją atliekančią programą FLOW 3D.
- **Trečias optimizuoto sparno sudarymas** – peržiūrėjus abiejų sparnų tyrimų rezultatus (2 ir 3 priedas) ir pastebėjus, kad pirmas optimizuotas sparnas su kaverna sulėtina ir tolygiau paskirto vandens srautą už sparno plačiausios dalies, o antro sparno optimizavimas santykinai sumažina vandens srauto greitį plačiausioje sparno dalyje, nuspręsta abiejų sparnų optimizacijos konstrukcinius elementus sujungti į vieną, ištiriant bendrą šių elementų suteikiamą efektyvumą sparnui (32 pav.).

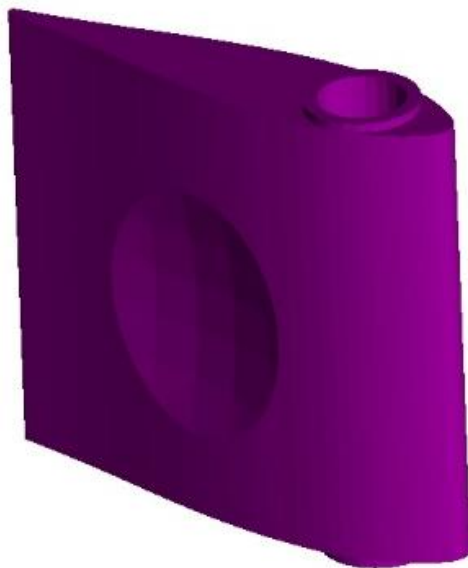
Visų sparnų optimizavimas atliktas vadovaujantis DNV klasifikacinės bendrovės normatyvais. Norint gauti minimalias vibracijas, balansavimą ir dizainą, buvo atsižvelgta į šias taisykles [3]:

- Priekinė plunksnos dalis neturi būti mažesnė, nei 30 % visos plunksnos ilgio.
- Horizontaliai subalansuotos dalies ilgis negali viršyti 35 %.
- Subalansuota dalis turi būti ne didesnė nei 23 % bendro sparno ploto.

**Išvada:** Remiantis pirminiais sparno duomenimis ir atlikus jų analizę, programa FLOW -3D nuspręsta atlikti tolimesnį tyrimą, pakeičiant pirminę sparno konstrukciją. Gauti rezultatai palyginti su esamo sparno rezultatais bei nuspręsta toliau atlikti sparno optimizavimo gerinimą remiantis sparno aptakumo teorija.



31 pav. Optimizuotas sparnas su pailgintu ir užapvalintu priekiu.

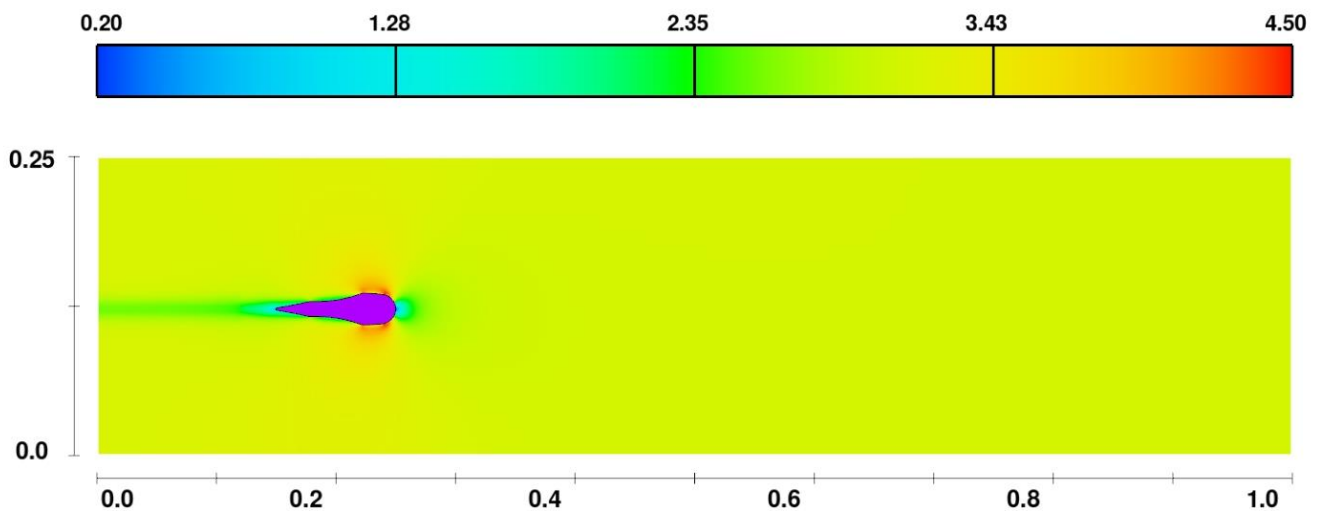


32 pav. Optimizuotas sparnas su kaverna, pailgintu, užapvalintu priekiu.

#### IV. SKAIČIAIVIMO REZULTATŲ DUOMENŲ PALYGINIMAS BEI ANALIZĖ

Vienas informatyviausiu - vizualinio eksperimento duomenų pateikimas, tačiau būtina rezultatus įvertinti matematiškai. Skirtingų sparno modifikacijų sukeliama pasipriešinimą įvertinsime pasirinkę  $x$  fluid force:  $pressure+shear$  parametą. Ši rezultatų išėiga pateikia sparno sukeliama vandens pasipriešinimą x ašimi kiekvienu pasirinktu laiko momentu. Pateiksime visą skysčio sudaromą pasipriešinimą, kadangi trinties pasipriešinimas ( $shear$ ) šiuo atveju (FLOW-3D ataskaitoje) sudaro tik labai mažą pasipriešinimo dalį, todėl nagrinėti ją atskirai - netikslinga. Gauti duomenys pateikiami tekstiniu formatu, kurį importuosime į MS excel programą.

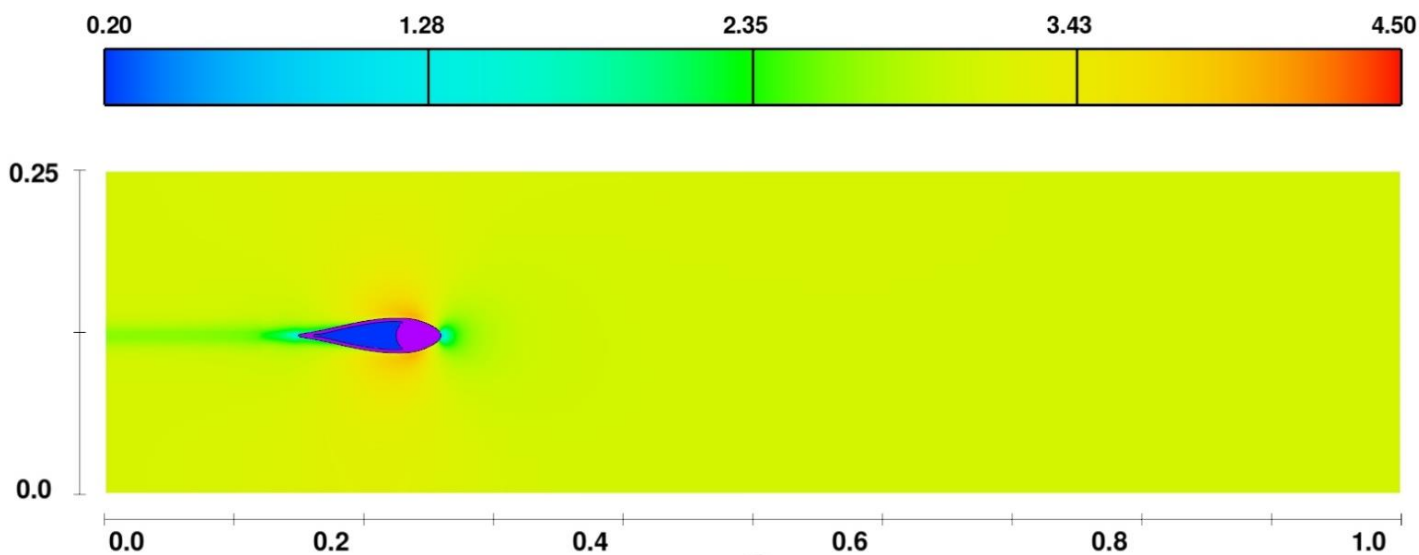
Ekperimentinius tyrimus nagrinėsime pagal greičių pasiskirstymą bei vandens srauto pasipriešinimo duomenis. Remiantis optimaliausia K. Budgino „Tempiamo lyno vibracijų mažinimo galimybių tyrimo“ darbe ištirta sparno konstrukcija, buvo nuspręsta pakeisti sparno konstrukciją. Pirmam modeliui buvo sumodeliuota kaverna esanti sparno centre (33 pav.) Išanalizavus gautus simuliacijos duomenis (2 priedas), matyti, kad šis konstrukcinis ypatumas pritraukia vandens srautą už plačiausios sparno dalies, taip sumažindamas ar padidindamas greičių pasiskirstymą už sparno. Šio sparno didžiausias vandens srauto greitis plačiausioje dalyje  $v = 4.45$  m/s, o vandens srauto pasipriešinimas  $F_{tr} = 6.93$  N.



33 pav. Sparno su kaverna greičių pasiskirstymo vizualizacija

Remiantis gautais duomenimis galima teigti, kad sparnas su kaverna pritraukia vandens srautą už plačiausios savo dalies, taip išlygindamas vandens srautą, bet nežymiai išaugo vandens srauto greitis bei padidėjo pasipriešinimas lyginant su pirmine sparno konstrukcija. Tolimesniam tyrimui nuspręsta optimizuoti sparno priekį, siekiant sumažinti vandens srauto greitį plačiausioje sparno dalyje ir vandens srauto pasipriešinimą.

Išlaikant tyrimo sąlygas vienodas, sparno optimizavimui atliktas priekinės dalies pailginimas ir užapvalinimas (34 pav.)



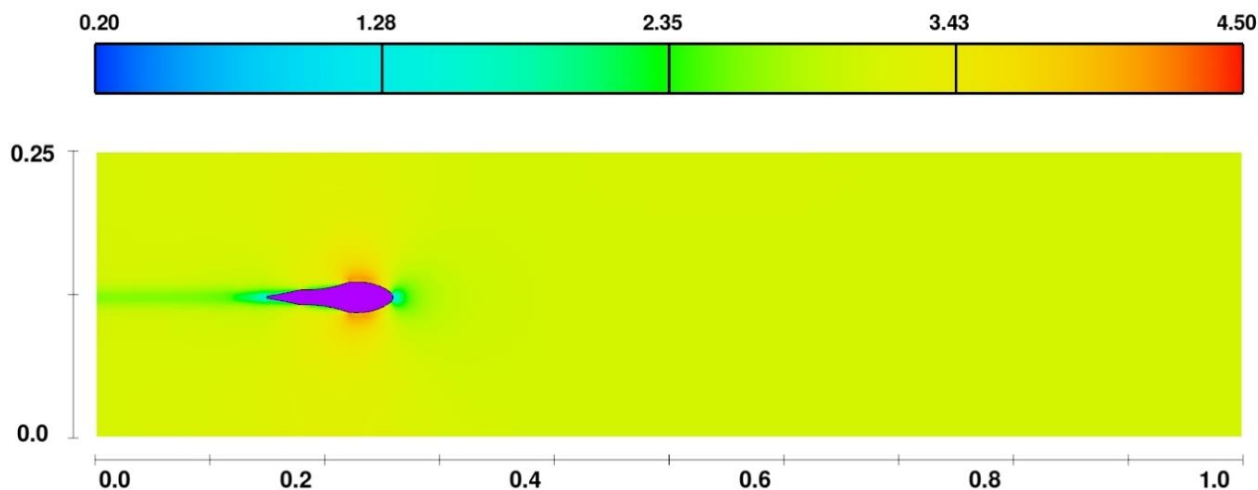
34 pav. Sparno su pailgintu, užapvalintu sparnu greičių pasiskirstymo vizualizacija

Išanalizavus šio tyrimo duomenis(3 priedas), nustatyta, kad sparno konstrukcinis optimizavimas sumažino srauto greitį plačiausioje sparno dalyje ir jis siekia  $v = 3.95$  m/s bei vandens pasipriešinimo sukeliama jėga iki  $F_{tr} = 6.24$  N. nuo pirmo optimizuoto sparno su kaverna. Galime teigti, jog sparno priekio pailginimas ir užapvalinimas suteikia sparnui efektyvesni vandens srauto aptekėjimą ir mažesnę vandens pasipriešinimą. Lyginant su pirminiu optimaliausiu K. Budgino darbe variantu, matyti nežymus srauto pasipriešinimo padidėjimas, kuris galėjo atsirasti dėl padidėjusio sparno priekio dalies ploto, bet plačiausioje sparno dalyje ženklus vandens srauto greičio sulėtėjimas. Šio tyrimo rezultatai leidžia pagrįstai teigti, jog sparno priekio pailginimas ir užapvalinimas tinkamas konstrukcinis sprendimas ieškant optimaliausios sparno konstrukcijos.

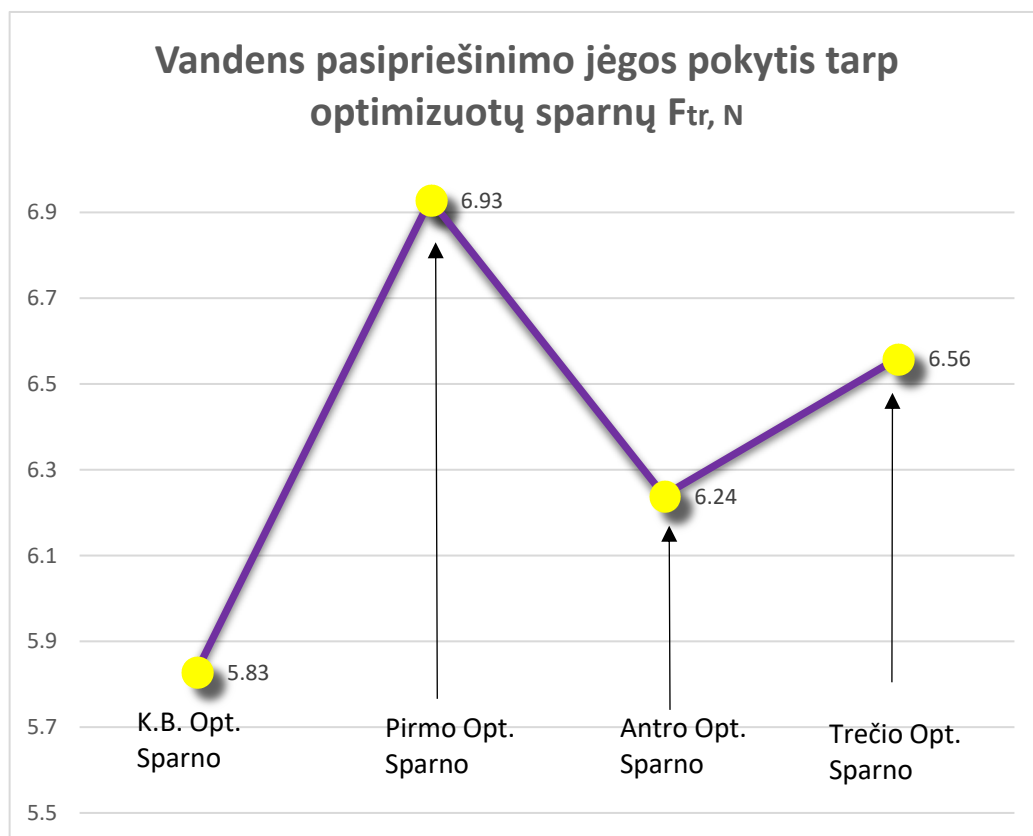
Remiantis pirmo optimizuoto sparno duomenimis ir antro optimizuoto sparno duomenimis, nuspręsta abu konstrukcinius elementus pritaikyti sparnui ir atlikti tyrimą, tikintis, jog antro sparno priekio pailginimas ir užapvalinimas sumažins srauto greitį plačiausioje dalyje bei sumažės srauto pasipriešinimas, o pirmo optimizuoto sparno konstrukcinis ypatumas išlaikys sumažėjus srauto greiti pritrauktą prie sparno taip sumažinant sukeliamas lyno vibracijas. Laikydami tų pačių tyrimo sąlygų, su naujai sumodeliuotu sparnu atliktas tyrimas (35 pav.)

Iš paskutinio optimizuoto sparno modelio atlikto tyrimo duomenų(4 priedas), nustatyta, jog pritaikymas abiejų konstrukcinių ypatumų sparnui suteikė sumažėjusį vandens srauto greitį plačiausioje sparno dalyje  $v = 4.14$  m/s, lyginant su K. Budgino „Tempiamo lyno vibracijų mažinimo galimybių tyrimo“

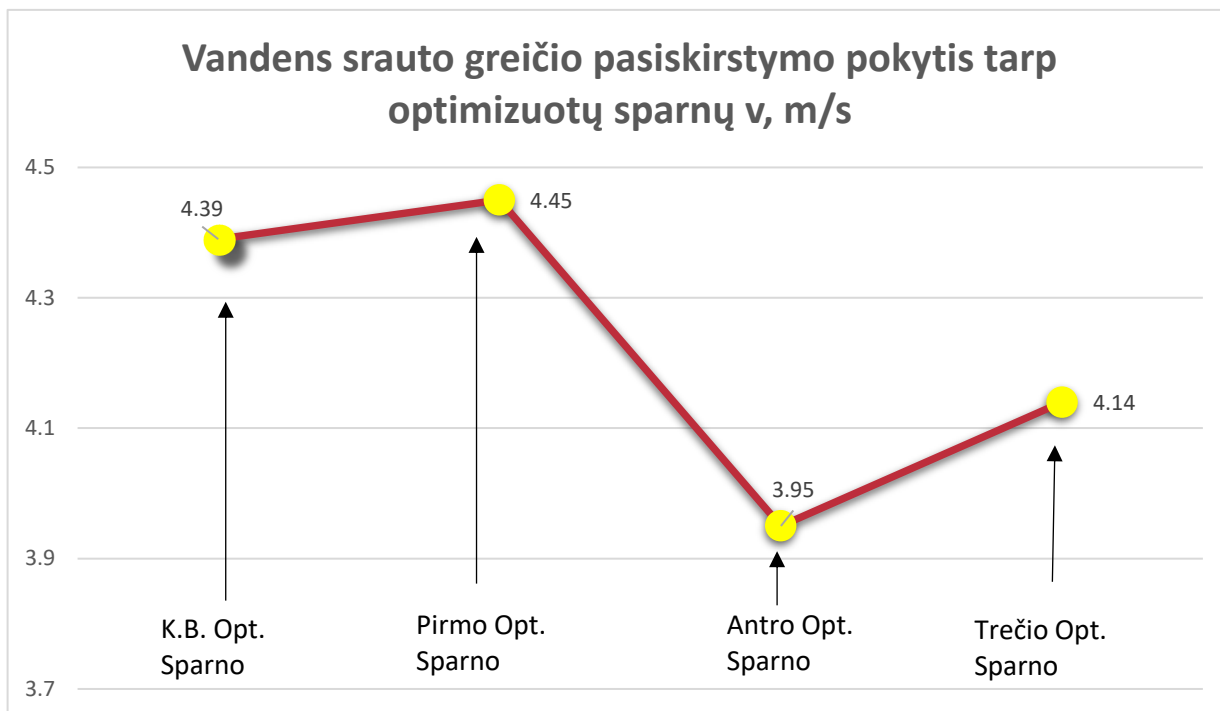
optimaliausiu sparnu, o pasipriešinimo jėga tik neženkiai padidėjusią iki  $F_{tr} = 6.56$  N. Siekdami detaliau atvaizduoti visų sparnų vandens pasipriešinimo kitimą (36 pav.) bei vandens srauto greičio pokytį (37 pav.), sudaryti pokyčių grafikais.



35 pav. Optimizuoto sparno su kaverna, pailgintu, užapvalintu priekiu greičių pasiskirstymo vizualizacija



36 pav. Vandens pasipriešinimo jėgos pokytis tarp optimizuotų sparnų



37 pav. Vandens srauto greičio pokytis tarp optimizuotų sparnų

**IŠVADA:** Galime teigti, jog atlikti sparno konstrukciniai optimizavimo patobulinimai ir tyrimų analizė yra naudingi toliau plėtojant optimaliausią sparno konstrukciją. Remiantis atliktų tyrimų analizė, optimaliausia sparno konstrukcija yra su kaverna, taip išlaikant vandens srautą prigludusį prie sparno bei pailginto, užapvalinto priekio taip sumažinant vandens srauto greitį plačiausioje sparno vietoje ir tik neženkliai padidinus vandens pasipriešinimo jėgą.

## IŠVADOS

Laivų tempiamo lyno vibracijų tyrimo moksliniame darbe surinkta, išanalizuota ir pateikta informatyvi bei aktuali informacija apie mokslinę literatūrą, kuri tiria vandens srauto pasiskirstymą apie sparną, lyną, sparno optimizavimą. Apžvelgta sparno aptakumo, vandens srauto pasiskirstymo teorija, kuri leido suprojektuoti optimizuotas sparno formas.

Suformuoti preliminarūs eksperimentai, kuriais buvo siekiama nustatyti eksperimento sudarymo nustatymai programoje FLOW-3D.

SSD eksperimentu nustatyta, kad esant 6 mazgų greičiui už laivo tempiamo lyno susidaro turbulentinis vandens tekėjimas.

Remiantis sparno aptakumo teorija, skysčių hidrodinamikos teorija ir DNV sparno konstrukcijos normatyvais suprojektuotos optimalesnės sparnų formos, kurios turėtų pagerinti hidrodinaminį aptekėjimą.

Atliktas optimizuotų sparnų palyginimas su optimaliausiu iki šiol suprojektuotu sparnu, pagal vandens pasipriešinimą bei vandens srauto greičių pasiskirstymą.

Tyrime nustatyta, kad sparno su kaverna optimizacija yra aktuali siekiant išlaikyti vandens srautą arčiau pasienio sluoksnyje prie sparno, taip išlyginant, sumažinant vandens srauto greitį už sparno plačiausios dalies.

Ištirta pailginto ir užapvalintu priekio sparno optimizacija leidžia sumažinti vandens srauto greitį kritiniame taške (plačiausia sparno dalis), su neženkliai padidėjusiu vandens pasipriešinimu dėl sparno priekinės dalies padidėjimo.

Ištirtas trečias optimizuotas sparnas leidžia įsitikinti, kad sparno priekio pailginimas ir užapvalinimas sumažina vandens srauto greitį priekyje bei vandens pasipriešinimą lyginant su optimizuotu sparnu su kaverna.

## REKOMENDACIJOS

Siekiant suprojektuoti optimaliausiai veikiančią sparno konstrukciją, būtina toliau atlikti tyrimą, keičiant sparno konstrukciją:

- Siekiant sumažinti lino vibracijas būtina sumažinti sparno pasipriešinimą esant realioms sąlygoms.
- Siekiant tikslesnių tyrimo rezultatų būtina atkreipti dėmesį į sparnų tarpusavio išsidėstymą, tai daro įtaką hidrodinaminių jėgų atsiradimui.
- Detalesniems tiriama sparno konstrukcijos rezultatams, reikia sudaryti daugiau tiriamų variantų. Šis būdas leistų iširti optimaliausią sparno konstrukciją, matmenų bei geometrijos įtaką pasipriešinimui.
- Itin tikslius rezultatus gauti pavyktų derinant SSD tyrimus su natūraliais eksperimentiniais tyrimais. Rekomenduojama SSD tyrimus vykdyti lygiagrečiai su eksperimentiniais ar derinant juos kartu.
- Būtina detaliau iširti trinties pasipriešinimo dedamąją. Net iš mažos šio pasipriešinimo reikšmės SSD rezultatuose gali iškreipti skirtingų sparno formų pasipriešinimo rezultatus.
- Būtina atlikti sparno konstrukcijos optimizavimą remiantis sparno aptakumo teorija, bei jau atliktų tyrimų rezultatais.

## LITERATŪRA

1. Bakker A. 2006. Applied Computational Fluid Dynamics. [žiūrėta 2018 m. Gegužės 22d.] Prieiga per internetą: <http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/07-mesh.pdf>
2. CFD Online. [žiūrėta 2018m. gegužės 10 d.]. Prieiga per internetą: < <http://www.cfd-online.com/Links/soft.html>
3. DNV [interaktyvus]. [žiūrėta 2018 m. Kovo 11d.] Prieiga per internetą:< <https://rules.dnvg1.com/docs/pdf/DNV/ruleship/2001-01/ts303.pdf>>
4. Frits H. Post, Theo van Walsum. 1993. Fluid flow visualization. Focus on Scientific Visualization: Berlin. [žiūrėta 2018 m. Gegužės 23d.] Prieiga per internetą <[http://www.researchgate.net/profile/Frits\\_Post/publication/221025525\\_Fluid\\_Flow\\_Visualization/links/0046351a7c352c6c9e000000.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Frits_Post/publication/221025525_Fluid_Flow_Visualization/links/0046351a7c352c6c9e000000.pdf)>
5. Hirt, C.W., Barkhudarov, M. R., 2013. *Void Regions and Bubble Models in Flow-3D*. Flow Science Report [interaktyvus]. [žiūrėta 2018 m. vasario 21d.]. Prieiga per internetą; < <http://www.flow3d.com>>;
6. Internetinis katalogas [žiūrėta 2018 m Gegužės 17d.] Prieiga per internetą: <<http://pdf.nauticexpo.com/pdf/jsc-hampidjan-baltic/dynex-seismic/36515-77067.html>>
7. Internetinis katalogas. [interaktyvus]. [žiūrėta 2018 m. Sausio 17 d.]. Prieiga per internetą: <[http://www.morenot.com/download.aspx?object\\_id=833A2EE6734B49F4A2B928A329E6CDA9](http://www.morenot.com/download.aspx?object_id=833A2EE6734B49F4A2B928A329E6CDA9)>
8. You-Sheng Wu, Wei-Cheing Cui, Guo-Jun Zhou. 2001. Practical ship design and Other Floating Structures. Shanghai: Tong University
9. Kakaguwa, A., Kawamura, T., Kodama, Y., Nagaya, S., Takahashi, T., 2003. *Drag Reduction of Ships by Microbubbles*. National Maritime Research Institute of Japan
10. Kawabuchi, M., Kawakita, C., Mizokami, S., Higasa, S., Kodan, Y., Takano, S., 2011. *CFD Predictions of Bubbly Flow around an Energy-saving Ship with Mitsubishi Air Lubrication System*. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 48(1), pp. 53–57
11. Mizokami, S., Kawakita, C., Kodan, Y., Takano, S., Higasa, S., Shigenaga, R., 2010. *Experimental Study of Air Lubrication Method and Verification of Effects on Actual Hull by Means of Sea Trial*. Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, 47(3), pp. 41-47
12. Molland A. 2008. The maritime engineering reference book. Hungary: Butterworth- Heinemann
13. Numerical Propulsion Test for a Multi Purpose Research Catamaran. The Hamburg Ship Model Basin.
14. Ohta, S., Shigetomi, A., Tasaka, Y., Murai, Y., Takeda, Y., Hinatsu, M., Kodama, Y., 2005. *Boundary layer measurement of a vessel sailing over the sea*. 6th International Symposium on Ultrasonic

Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering.

15. Paprastųjų diferencialinių lygčių sistemų kraštinio uždavinio skaitiniai sprendimo metodai. Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas: konspektai. [žiūrėta 2018 m. Balandžio 22d.] Prieiga per internetą:<[http://www.techmat.vgtu.lt/konspektai/difskM/Paskaita\\_DLDM\\_5.pdf](http://www.techmat.vgtu.lt/konspektai/difskM/Paskaita_DLDM_5.pdf)>

16. Rudder Design [žiūrėta 2018m. Gegužės 19d.] Prieiga per internetą:

<<http://dl.kashti.ir/ENBOOKS/Marine%20Rudder%20and%20Control%20surface.pdf>>

17. Rawson K.J., Tupper E.C. 2001. Basic ship theory. Oxford: Butterworth-Heinemann.

18. Sheng-Ju Wu., Cheng-Hsing Hsu., Tsung-Te Lin., 2007. *Model test of the surface and submerged vehicles with the micro-bubble drag reduction*. Ocean Engineering, 34, pp. 83–93.

19. Science direct. [Interaktyvus]. [žiūrėtas 2018 m. Sausio 15 d.]. Prieiga per internetą:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889974616301591?via%3Dihub>

20. Science direct. [Interaktyvus]. [žiūrėtas 2018 m. Sausio 15 d.]. Prieiga per internetą:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801816000160?via%3Dihub>

21. Science direct. [Interaktyvus]. [žiūrėtas 2018 m. Sausio 17 d.]. Prieiga per internetą:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0889974615000110?via%3Dihub>

22. Science direct. [Interaktyvus]. [žiūrėtas 2018 m. Sausio 17 d.]. Prieiga per internetą:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0029801817306753?via%3Dihub>

23. Science direct. [Interaktyvus]. [žiūrėtas 2018 m. Sausio 17 d.]. Prieiga per internetą:

<<http://ezproxy.biblioteka.ku.lt:2086/science/article/pii/S0029801814002807?via%3Dihub#f0005>

24. Science direct. [Interaktyvus]. [žiūrėtas 2018 m. Sausio 17 d.]. Prieiga per internetą:

<<http://ezproxy.biblioteka.ku.lt:2086/science/article/pii/S0029801816305285>

25. The Maritime Executive. [interaktyvus]. [žiūrėta 2018 m. balandžio 20 d.]. Prieiga per internetą: <

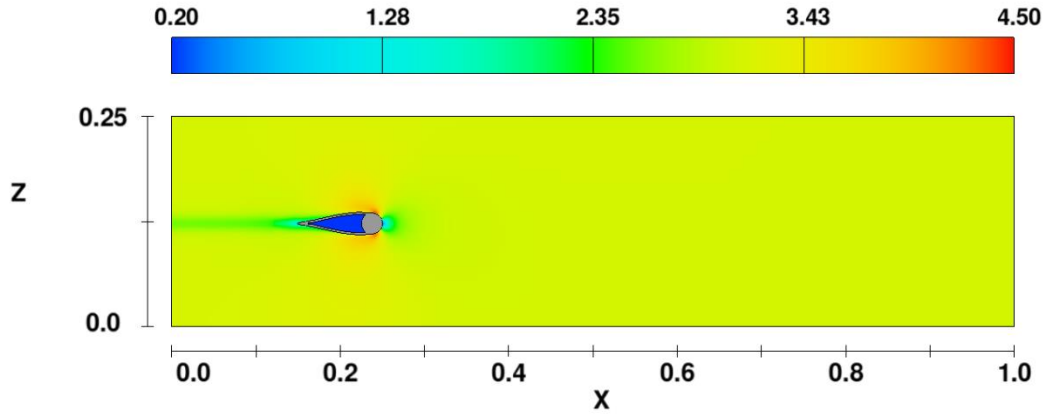
<http://www.maritime-executive.com>>;

## **PRIEDAI**

# 1- as PRIEDAS

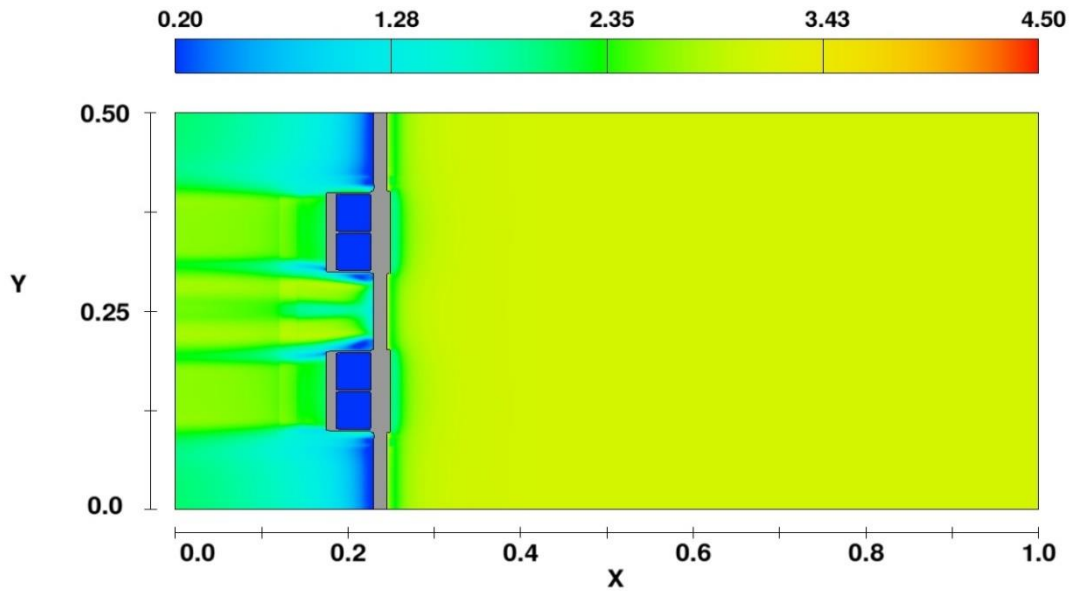
Karloio Budgino „Tempiamo lyno vibracijų mažinimo galimybių tyrimas“ darbe ištirta optimaliausia sparno konstrukcija.

Vandens srauto greičių pasiskirstymas



FLOW-3D t=2.9999938 y=3.269E-01 ix=3 to 194 kz=3 to 30  
m-b linked  
09:06:04 05/22/2017 eifd hydr3d: version 10.1.1.05 win64 2013  
Troso Profilis

4

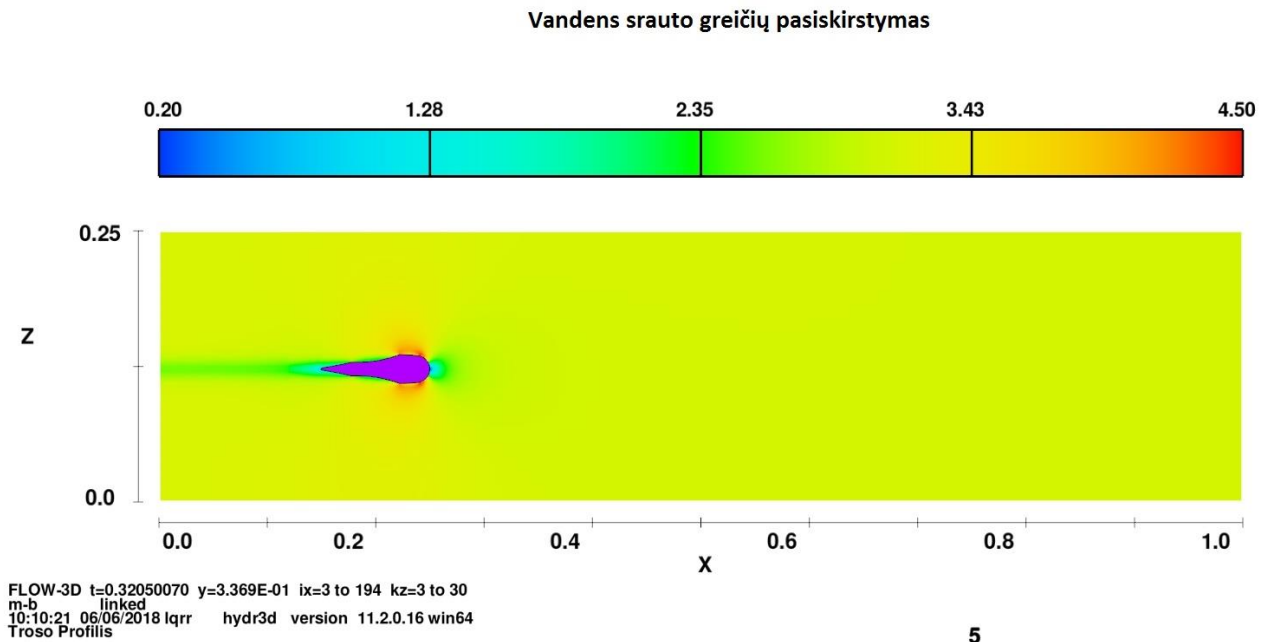
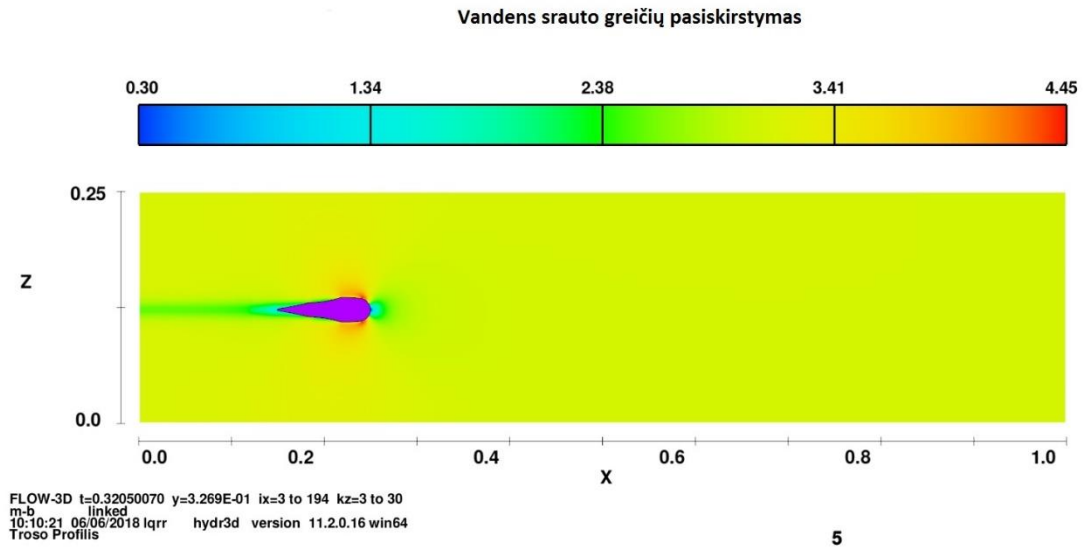


FLOW-3D t=2.9999938 z=1.281E-01 ix=3 to 194 jy=3 to 250  
m-b linked  
09:06:04 05/22/2017 eifd hydr3d: version 10.1.1.05 win64 2013  
Troso Profilis

4

## 2 – as PRIEDAS

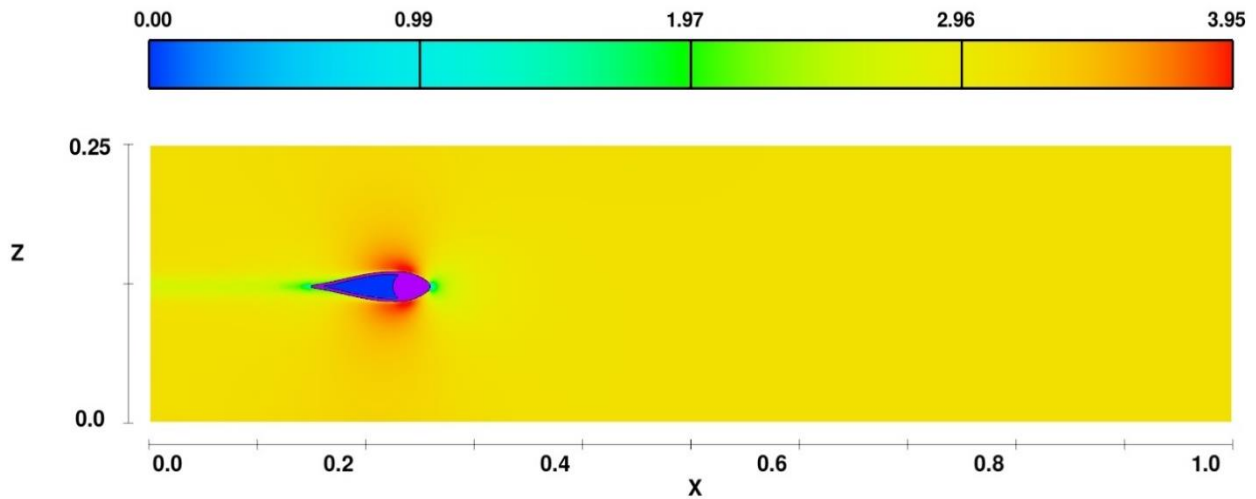
Pirmo optimizuoto sparno su kaverna tyrimo rezultatai.



### 3 – čias PRIEDAS

Antro optimizuoto sparno su pailgintu, užapvalintu priekiu tyrimo rezultatai.

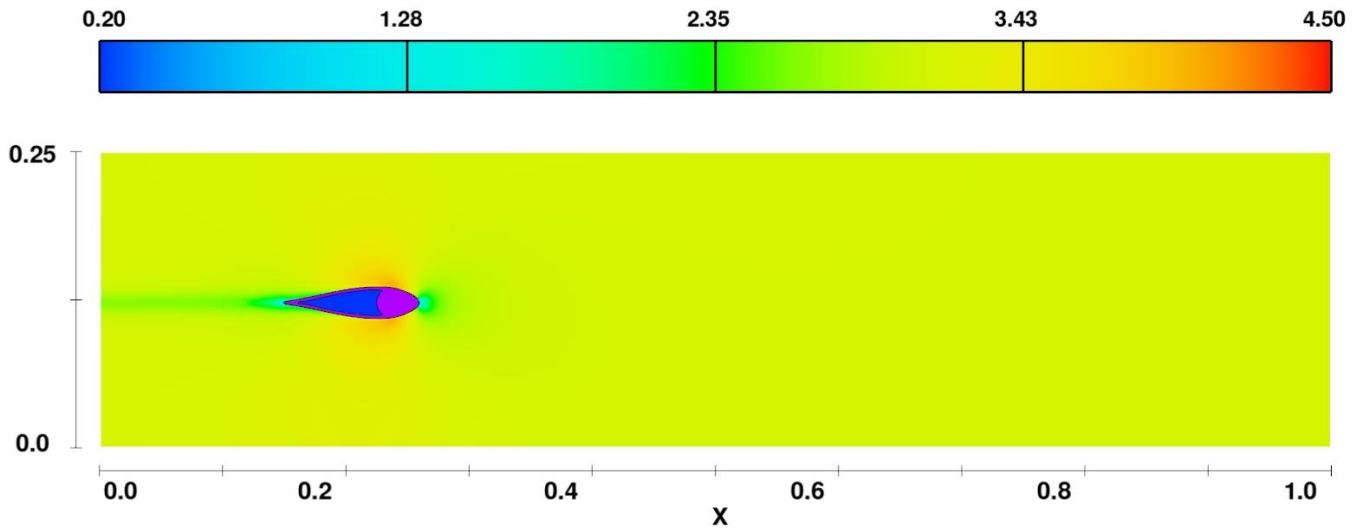
Vandens srauto greičių pasiskirstymas



FLOW-3D t=0.49999666 y=3.369E-01 ix=3 to 194 kz=3 to 30  
m-b linked  
18:56:53 06/06/2018 whyx hydr3d version 11.2.0.16 win64  
Troso Profilis

6

Vandens srauto greičių pasiskirstymas



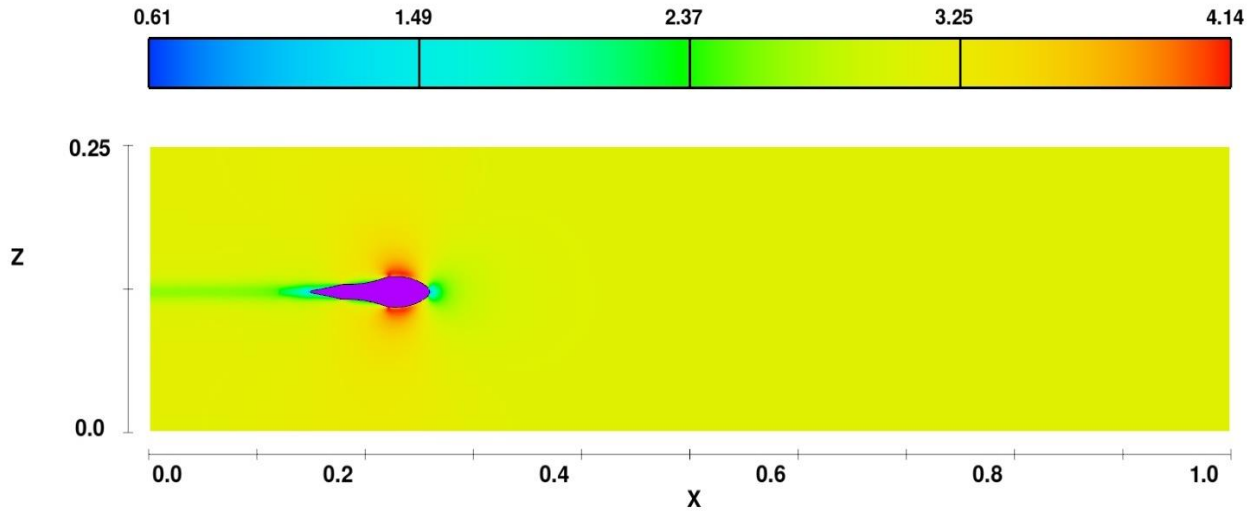
t=0.52148354 y=3.369E-01 ix=3 to 194 kz=3 to 30  
linked  
06/06/2018 whyx hydr3d version 11.2.0.16 win64  
ofilis

4

## 4-as PRIEDAS

Trečio optimizuoto sparno su kaverna, pailgintu, užapvalintu priekiu tyrimo rezultatai.

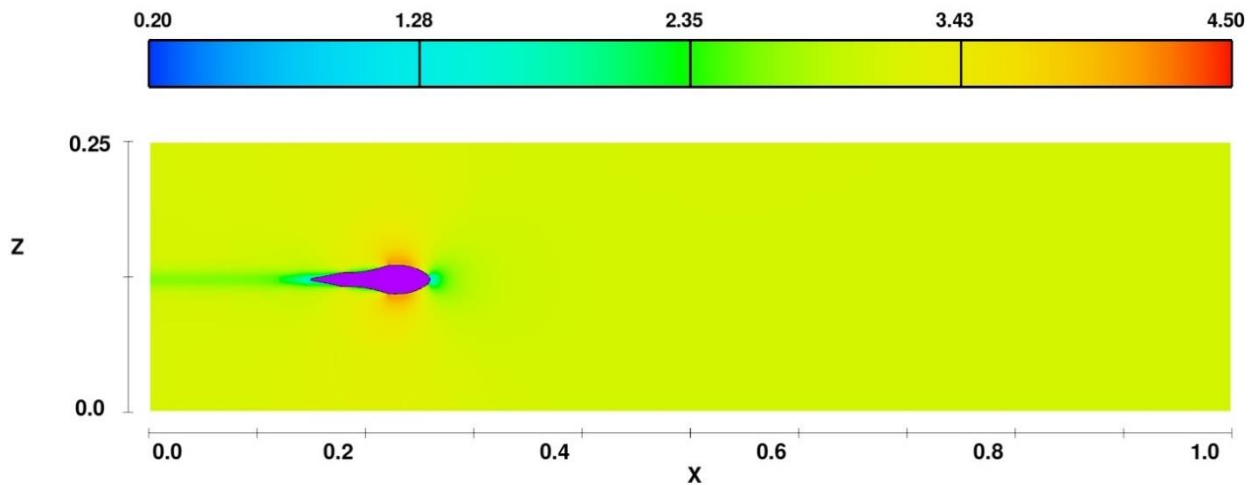
Vandens srauto greičių pasiskirstymas



FLOW-3D t=0.19999856 y=3.569E-01 ix=3 to 194 kz=3 to 30  
m-b linked  
08:55:22 06/07/2018 gyvr hydr3d version 11.2.0.16 win64  
Troso Profilis

3

Vandens srauto greičių pasiskirstymas



FLOW-3D t=0.19999856 y=3.569E-01 ix=3 to 194 kz=3 to 30  
m-b linked  
08:55:22 06/07/2018 gyvr hydr3d version 11.2.0.16 win64  
Troso Profilis

3