

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS

Jūrų technikos fakultetas

Laivo inžinerijos katedra

Žydrūnas Ašmontas

**KU MOKSLINIŲ TYRIMŲ LAIVO SKEGO
MODERNIZAVIMO TYRIMAS**

Laivų projektavimo ir statybos studijų programos (621H52001)
magistro baigamasis darbas

Klaipėda, 2015

SANTRAUKA

Ašmontas Ž. KU mokslinių tyrimų laivo skego modernizavimo tyrimas. Laivų projektavimo ir statybos magistrantūros studijų programos baigiamasis darbas. Darbo vadovas dr. V. Djačkov. Klaipėdos universitetas: Klaipėda, 2015. 85 p.

Raktiniai žodžiai: KU Laivas MINTIS, skegas, optimizacija, SSD, FLOW-3D, srauto tyrimai, laivagalio optimizacija.

Šio baigiamojo darbo tikslas ištirti ir optimizuoti KU mokslinių tyrimų laivo laivagalį. Pateikiama pagrindinė informacija ir teorija apie laivo pasipriešinimą, laivagalio konstrukcijas, Skaičiuojamąją Skysčių Dinamiką. Taip pat pateikta informacija apie laivagalio konstrukcijos ir SSD eksperimento sudarymo reikalavimus bei rekomendacijas.

Sudarytas eksperimentas FLOW-3D SSD programa siekiant nustatyti korpuso hidrodinamines savybes ir jo įtaką laivą aptekančiam vandens srautui. Tyrime oporientuotasi tik į laivagalio rajone vykstančius hidrodinaminius reiškinius. Pagal gautus tyrimo rezultatus sudaryta ir palyginta keletą alternatyvių skego ir laivagalio formų. Pateiktos išvados apie sudarytų laivagalio formų pasipriešinimą

SUMMARY

Ašmontas Ž. Skeg optimization analysis of KU scientific research vessel. Naval Architecture and Marine Engineering studies programme thesis. Klaipėda University: Klaipėda. 85p.

Keywords: KU vessel MINTIS, skeg, optimization, CFD, FLOW-3D, flow research, stern optimization.

Purpose of this thesis is to analyze and optimize stern of KU scientific research vessel. Introduced main information and theory about ship hydrodynamics, resistance, stern construction, Computational Fluid Dynamics. Also presented information and recommendations for making proper stern shape and CFD analysis.

CFD simulation was created with FLOW-3D solver to determine MINTIS vessel's hydrodynamic characteristics and flow around a hull. Main object of interest was hydrodynamical phenomena in stern and skeg area. Depending on simulation data and results, few alternative hull forms has been created and investigated with CFD solver. Conclusions about resistance of those hull shapes was introduced.



Laivų projektavimo magistro studijų (621H52001) baigiamasis darbas

Užduotis studentui(-ei): Žydrūnui Ašmontui

Temos pavadinimas: KU mokslinių tyrimų laivo skego modernizavimo tyrimas.

Darbo sudėtis

1. Titulinis lapas (viršelis)
2. Santrauka
3. Užduotis
4. Lentelių sąrašas
5. Paveikslelių sąrašas
6. Turinys
7. Įvadas (problemos analizė)
8. Darbo tikslas ir uždaviniai.
9. Literatūros šaltinių analizė.
10. Matematinio eksperimento planavimas ir reikalavimai.
11. Matematinis eksperimentas.
 - 11.1. Matematinis eksperimentas skirtingoms skego konfigūracijoms
 - 11.2. Matematinio eksperimento rezultatų palyginimas
12. Išvados
13. Literatūros sąrašas
14. Priedai

Darbo vadovas (-ė): doc. Dr. Vasilij Djačkov

Lentelių sąrašas

1. Lentelė. Greičių lentelė.....	56
2. Lentelė. Gauti tyrimo duomenys, kai $d=2,8\text{m}$, $v_s=6,43$ (12,5 kt.).....	77

Paveikslų sąrašas

1 pav. KU mokslinių tyrimų laivo laivagalis.....	10
2 pav. Laivo pasipriešinimo komponentės	23
3 pav. Skystyje judančio kūno sukeltas slėgis.....	24
4 pav. Judančio slėgio taško ir laivo sukeltos bangų sistemos.....	25
5 pav. Laivapriekio ir laivagalio bangų sistemų sąveika.....	26
6 pav. Laivo bangų sukulto pasipriešinimo priklausomybė nuo greičio.....	26
7 pav. Pasienio sluoksnis.....	27
8 pav. Šiurkštumo poveikis.....	29
9 pav. Trinties pasipriešinimo susidarymas.....	29
10 pav. Pasipriešinimo dedamosios priklausomai nuo Frūdo skaičiaus.....	31
11 pav. Pasipriešinimo nustatymo metodai.....	32
12 pav. Laivagalio formos	35
13 pav. Laivagalio španhautų formos.....	35
14 pav. Lenktas ir laužtas trancinis paviršius.....	36
15 pav. Laivagalis su kreipiančiuoju pleištu.....	37
16 pav. Laivagalio sparnas ir srauto atkirtimo įtaisas.....	37
17 pav. Asimetrinis laivagalis.....	38
18 pav. Srautas aptekantis panirusį trancinį laivagalį.....	39
19 pav. Srautas laivagalyje priklausomai nuo laivagalio formos.....	39
20 pav. Srauto atsiskyrimas be movos ir srautas su mova.....	40
21 pav. Srauto ir movos sąveika.....	40
22 pav. Srautą kreipiantys sparnai.....	41
23 pav. Didžiausias vaterlinijos kampas ir srauto atsiskyrimo zona laivagalio vaterlinijose virš sraigto.....	43
24 pav. Abiejų apkalos pusių susijungimas laivagalyje.....	43
25 pav. Tūrio elementas iš tęstinumo lygties dvimatėje sistemoje.....	46
26 pav. Sutrigdymai juda skirtinga linkme priklausomai nuo lauko lygčių.....	48
27 pav. Teisingas kintančio tinklelio sudarymas srauto tekės kryptimi.....	50
28 pav. Pagrindiniai tekės atvaizdavimo metodai.....	52
29 pav. Laivo korpuso atvaizdavimas FLOW-3D programoje.....	55
30 pav. Interferencija, esant simetrijos krašto ribos nustatymui prilausomai nuo eksperimento ribų dydžio.....	58
31 pav. Kintančio tinklelio sudarymo galimybės FLOW-3D komp. programoje.....	59

32 pav. Tinklelis sudarytas iš trijų skirtingo detalumo blokų.....	60
33 pav. Srauto aptekėjimas aplink skegą.....	61
34 pav. Srauto greičių pasiskirstymas ant korpuso.....	62
35 pav. Srauto greičių pjūvis ties skego viduriu.....	62
36 pav. Srauto sūkuriai x plokštumos atžvilgiu, srauto greičiai ties skegu ir srauto tekės kryptis esant detaliam tinkleliui ties skegu.....	63
37 pav. Srautas laivagalyje.....	64
38 pav. Srauto greičių ir bangų pasiskirstymas ties diametraline plokštuma.....	64
39 pav. HSVA tyrimo duomenų ir esamo tyrimo palyginimas.....	65
40 pav. Skirtingos tiriamos skego formos (tyrimo atvejai).....	68
41 pav. Pakeistos laivagalio formos.....	69
42 pav. Srauto greičiai ties skego vidurio plokštuma.....	70
43 pav. Srauto greičių pasiskirstymas ant skirtingų skego konstrukcijų.....	70
44 pav. Srauto tekės kryptys aplink skegus.....	71
45 pav. Srauto tekės kreivių šoninis vaizdas.....	71
46 pav. Trancinio laivagalio (5 atvejo) bangų sąveikos schema.....	72
47 pav. Diametralinės plokštumos srauto greičių pjūvis.....	72
48 pav. Esamo laivagalio formos pakeitimo schema, norint pasiekti srauto atsiskyrimą.....	73
49 pav. Laivagalio srauto greičių (bangų) palyginimas.....	74
50 pav. FLOW-3D pasipriešinimo rezultatai.....	76
51 pav. Alternatyvių korpuso variantų charakteristikų palyginimas.....	78

TURINYS

IVADAS	9
I. DAUGIAKORPUSIAI LAIVAI	12
II. LITERATŪROS ANALIZĖ	13
2.1 Užsienio literatūros analizė.....	14
2.2 Užsienio metodinės literatūros ir vadovėlių analizė	19
2.3 Mokslinės lietuviškos literatūros analizė	21
III. LAIVO PASIPRIEŠINIMO TEORIJA	23
3.1 Vandens pasipriešinimo laivo judėjimui susidarymas.....	23
3.1.1 Bangų pasipriešinimas.....	24
3.1.2 Trinties pasipriešinimas.....	27
3.1.3 Klampumo slėgio pasipriešinimas	30
3.2 Pasipriešinimo nustatymo būdai	31
IV. LAIVAGALIS	35
4.1 Laivagalio konstrukcijos ir formos	35
4.2 Srautas laivagalyje	38
4.3 Laivagalio konstrukcijos rekomendacijos	41
V. SKAIČIUOJAMOJI SKYSČIŲ DINAMIKA	44
5.1 Pagrindinės SSD lygtys	45
5.2 Tinklelio sudarymas.....	49
5.3 Srauto vizualizavimas	50
VI. EKSPERIMENTO SUDARYMAS LAIVUI MINTIS	54
6.1 Preliminarus eksperimento sąlygų nustatymas	55
6.2 Eksperimentas laivui MINTIS	59
6.3 Gauti eksperimento rezultatai	60
VII. LAIVAGALIO MINTIS OPTIMIZAVIMAS	66
7.1 Alternatyvių korpuso formų sudarymas	67
7.2 Skego formų palyginimas	69
7.3 Laivagalio formų palyginimas	71
7.4 Korpuso sukkelto pasipriešinimo palyginimas	75
VIII. IŠVADOS	80
REKOMENDACIJOS	81
LITERATŪRA	82
PRIEDAI	85

IVADAS

Ilgainiui didėjančios kuro kainos ir griežtesni aplinkosauginiai reikalavimai priverčia laivų savininkus ir projektuotojus galvoti apie naujus sprendimus ir konstrukcijas, padėsiančias sumažinti eksploatacines sąnaudas. Taip atsiranda sudėtingesnės laivo korpuso konstrukcijos, daugiakorpūsiai laivai. Ankstesnė patirtis ir sukauptos žinios nevisada gali būti tiksliai pritaikoma tokiems laivams, todėl atliekami nauji tyrimai, korpuso forma ir elementai yra optimizuojami. Veinas iš optimizavimo tyrimo objektų yra laivagalis. Laivagalio darbo aplinka yra itin sudėtinga kadangi į jį patenka laivapriekį aptekėjęs srautas kuris turi sklandžiai aptekėti laivagalį ir atsiskirti nuo jo. Tai itin svarbu, kadangi prasta laivagalio konstrukcija gali sukelti sūkurius ir bangas, kuriuos laivas plaukdamas palieka po savęs. Sūkuriams ir turbulentiniam tekėjimui sukurti naudojama papildoma energija, kuri padidina laivo korpuso pasipriešinimą. Prastai suprojektuotas laivagalis, nuo kurio srautas atitrūksta itin grupiai ir greitai gali sudaryti ne tik srauto sūkurius, tačiau juos (vandens masę) vilkti paskui save t.y. palikti hidrodinaminį pėdsaką. Visų neigiamų reiškinių dažniausiai išvengti nepavyksta, todėl priklausomai nuo laivo tipo ir poreikių projektuojamas laivagalis, kuris bus optimaliausias dirbant tam tikromis sąlygomis.

Laivagalis taip pat svarbus tuo, jog jame dažniausiai įrengti varytuvai, todėl neteisinga laivagalio konstrukcija gali sukelti neigiamą korpuso ir varytuvo sąveiką, vibraciją, virpesius, kavitaciją ir kitus nepageidaujamus reiškinius. Vandens srauto pasiskirstymas taip pat svarbus, kadangi nesklendus srautas įtekantis į varytuvo darbo lauką gali sumažinti jo naudingo veikimo koeficientą, todėl mažėja laivo greitis. Optimizavus laivo korpuso formą galima sumažinti korpuso pasipriešinimą (bangų pasipriešinimą, pagerinti sklandų srautą aplink korpusą) bei tam tikrais atvejais padidinti varytuvo sukuriamą trauką. Beabejo korpuso optimizavimas, jo tyrimai ir bandymai reikalauja papildomų išlaidų ir laiko, tačiau gerai suprojektuotas laivas pasižymės didesniu greičiu ir/arba mažesnėmis kuro sąnaudomis, kurios laivo eksploatacijos eigoje gali duoti teigiamą finansinę naudą. Patikimas ir gerai suprojektuotas bei optimizuotas laivas taip pat bus ekologiškesnis, kadangi jo kuro sąnaudos ir išmetamų teršalų kiekis sumažės.

Šiame darbe tiriamas Klaipėdos Universiteto mokslinių tyrimų laivas. Mokslinių tyrimų laivas yra sudėtinė Jūrinio slėnio branduolio kūrimo dalis. Numatoma, kad laivas bus naudojamas tiek moksliniams tikslams, tiek įvairių jūrinio sektoriaus veiklų poreikiams tenkinti: vykdyti jūrinės aplinkos monitoringą, žuvų išteklių tyrimus, reaguoti į taršos incidentus, vykdyti palaidoto cheminio ginklo rajonų taršos monitoringą ir kita. Šis laivas prisidės prie jūrų ūkyje planuojamų stambių infrastruktūros projektų bei, valstybės mastu, padės įgyvendinti ES jūrų politikos siekius [3].

Laivo korpuso tipas – katamaranas, ilgis 38,7 metro, jo laivagalyje įtaisyti du dvisraigčiai azimutiniai varytuvai. Laivagalyje taip pat išryškėja kiek neįprastas, platus skegas (1 pav.). Detalesnė informacija apie laivo charakteristikas pateikta 1 priede.



1 pav. KU mokslinių tyrimų laivo laivagalis (be varytuvų) [3]

Mokslinio tyrimo objektas yra srauto pasiskirstymas ir susidarymas mokslinio tyrimų laivo korpuso laivagalyje. Nors laivas yra vidutinio greičio, o jo maksimalus pasiekiamas greitis yra 12,5 mazgo, laivagalio konstrukcija ir jos hidrodinaminės savybės gali ženkliai įtakoti pasipriešinimą.

Tiriamąo darbo tikslas yra ištirti ir nustatyti KU mokslinių tyrimų laivo srauto aptekėjimą laivagalyje ir pagal gautus duomenis sudaryti naujas laivagalio (skego) formas, bei surasti optimaliausią laivagalio variantą.

Šiuo tyrimu siekiama ne tik optimizuoti laivagalio formą, tačiau ir nustatyti atitinkamos laivagalio formos ir skego įtaką laivo korpuso pasipriešinimui ir srauto aptekėjimui.

Tiriamąo darbo uždaviniai yra:

1. Nustatyti šiuo metu sukauptą informaciją apie laivagalio konstrukcijas ir jų projektavimą.
2. Sukaupti ir pateikti darbe svarbiausią (naudingiausią) informaciją, kurios dėka galima apytiksliai numatyti arba nustatyti laivagalio ir vandens srauto susidarymo, bei jo pasiskirstymo sąveiką.
3. Panaudojant FLOW 3D kompiuterinę SSD programą ištirti srauto aptekėjimą laivagalyje.
4. Pagal gautus esamo korpuso tyrimo duomenis nustatyti kokią įtaką laivagalio skegas turi srautui ir hidrodinaminėms laivo savybėms.

5. Atsižvelgiant į gautus tyrimo rezultatus ir pateiktas išvadas suprojektuoti skirtingas laivagalio formas (variantus) arba papildomus srautą gerinančius įtaisus.
6. FLOW 3D programa ištirti hidrodinamines alternatyvių laivagalio formų savybes.
7. Pagal gautus duomenis apibūdinti optimaliausią laivagalio konstrukciją ir variantus.
8. Pateikti išvadas ir rekomendacijas.

I. DAUGIAKORPUSIAI LAIVAI

Daugiakorpusiai laivai, tai buriniai katamaranai, trimaranai, ofšorinės platformos, specialios paskirties aptarnavimo ir pagalbiniai laivai, keltai. Katamaranų konstrukcija nėra nauja, dar 1870 metais apie 90 metrų ilgio dviejų korpusų garlaiviai buvo pastatyti ir plaukiojo kanaluose. Juos ypač pamėgo keleiviai dėl jų gerų jūrinių savybių, tačiau katamaranus greitai aplenkė kitos konstrukcijos laivai. Viršutinis katamaranų denis pasižymi dideliu plotu, kuris patogus keleiviams gabenti arba įrengti sraigtasparnio aikštelę. Katamaranai turi didesnę korpuso suvilgyto paviršiaus plotą lyginant su vienkorpusiais laivais, todėl jų trinties pasipriešinimas yra didesnis, tačiau siauri katamarano korpusai gali užtikrinti mažesnę pasipriešinimą. Kartais padedama interferencijos efekto susidariusio tarp laivo korpusų. Korpusų atstumas priimtinas maždaug 1,25 karto didesnis už kiekvieno korpuso plotį. Manevravimo savybės geros.

Aukštas skersinis stabilumas (stovumas) ir palyginti trumpas laivo ilgis reiškia, kad supimasis ne visada yra geras. Tai buvo patobulinta bangas skruodžiančiuose katamaranuose, suprojektuotiems siekiant sumažinti supimąsi, taip pat *SWATH* (*angl. Small waterplane are twin hull*) konstrukcijos laivuose, kuriuose vaterlinijos plotas yra sumažintas, o didžioji išstumto vandens dalis sukuriama plūdrumo jėgą yra giliau po vaterlinija. Išilginis supimasis gali būti sumažintas naudojant pelekus ir stabilizatorius.

Tobulinant katamaranų konstrukcijas pasiūlyta trimarano konstrukcija. Daugelis tyrimų rodė daug šios korpuso konstrukcijos privalumų, be esminių trūkumų (lyginant su katamaranais).

Palyginti vienkorpusius ir daugiakorpusius laivus yra sunku. Kiekvieno tipo laivai turėtų būti optimaliai ir efektyviai suprojektuoti, tik tada būtų įmanoma objektyviai palyginti charakteristikas tarp skirtingų korpuso tipų. Taip pat lyginant skirtingo tipo laivus svarbu nustatyti pagrindines ir vienas iš svarbiausių charakteristikų, pvz ilgis vandentalpa ar krovinio gabenimo galimybės.

Daugiakorpusiai laivai turi palyginti didelį konstrukcijos svorį, todėl dažniausiai naudojamos aliuminio konstrukcijos, kad šį skirtumą sumažinti. Bangų mušimasis į korpuso vidinę dalį turi būti išvengiamas, todėl reikalingas aukštas viršvandeninis bortas ir atitinkamas korpusų dizainas. *SWATH* laivai dėl savo mažo vaterlinijos ploto yra jautrūs apkrovos (svorio) pasikeitimams ir pasiskirstymui, todėl būtina krovinių ir svorio kontrolė [19].

II. LITERATŪROS ANALIZĖ

Analizuojant užsienio literatūrą orientuotasi į literatūrą Anglų kalba. Kadangi laivagalio ir skego tyrimai, o tiksliau srauto aptekėjimo laivagalyje tyrimai apima daugybę aspektų ir reiškinių, šaltinių analizėje orientuotasi į laivagalio optimizavimą ir srauto tyrimus. Įtrauki ir tie šaltiniai kurie tiesiogiai nėra susiję su nagrinėjama tema, tačiau vienokiu ar kitokiu būdu prisideda prie temos nagrinėjimo ir supratimo. Tai gali būti korpuso optimizavimas, laivagalio, varytuvų tyrimai, pačio srauto savybės. Taip pat atsižvelgta ir į tyrimo būdus, šiuo atveju orientuotasi į SSD (*angl. CFD*) tyrimo metodiką ir būdus, tad naudingi informacijos šaltiniai šiuo atžvilgiu taip pat aptariami, kadangi norint sėkmingai tam tikram tyrimui ir sąlygoms pritaikyti SSD skaičiavimo programas ir būdą, reikia žinoti kokiais atvejais ir kokį būdą yra tikslinga taikyti. Be to SSD tyrimams reikalinga žinoti ne tik reikalingą taikymo būdą (programą), bet ir tinklelio sudarymą bei jo tikslumą (elementų kiekį) norint gauti tikslius tyrimo rezultatus.

Dalis užsienio šaltinių pateiktų iš *NuTTS* ataskaitos (*Numerical Towing Tanks Symposium*). Šis renginys vyksta skirtingose šalyse nuo 1998 metų. *NuTTS* orientuojasi į skaitmeninius (daugiausiai SSD) tyrimus šiomis temomis:

- Netiesiniai srautai aplink jūrinius statinius ir konstrukcijas (*LES, RANS* metodai ir pan.).
- Laisvojo paviršiaus srautai aplink jūrinius statinius ir konstrukcijas (3D laivo supimasis, laisvojo paviršiaus klampus srautas).
- Skysčių ir konstrukcijų (kūnų) sąveika.
- Panašios, susijusios temos (eksperimentai ir bandymai, skaitmeniniai skaičiavimai, tyrimai ir metodikos, tinklelio sudarymas ir pan.).

Šiame renginyje specialistams ir mokslinio laipsnio siekiantiems studentams suteikiama neformali “terpė“, kurioje jie gali pristatyti naujausius savo tyrimus, bei diskutuoti ir plėsti savo žinias. Keikvienais metais išleidžiama ataskaita su pateiktais straipsniais ir tyrimų rezultatais, todėl orientuosimės į paskutinių trijų metų leidinio straipsnius (15, 16, 17 leidimai).

Labai panaši konferencija vykstanti kiekvienais metais yra *COMPIT* (*angl. Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries*). Joje dalyvauja jūrų transporto ir inžinerijos industrijos atstovai ir akademikai, pateikdami savo tyrimus ir darbus, susijusius su skaitmeniniais inžineriniais tyrimais jūrinėje inžinerijos srityje. Analizei sudaryti peržvelgtos 2012, 2013 ir 2014 metų konferencijų ataskaitos.

Taip pat naudotasi *Science direct* platforma, kurioje talpinama daugybė knygų, žurnalų ir publikacijų, bei kitais internetiniais informacijos ištekliais.

2.1 Užsienio literatūros analizė

Tanasescu H., Tanasescu O. (2008) tyrimas orientuotas į laivagalyje susidarantį srautą. Pateikiamos dvi naujos idėjos, skirtos sumažinti laivagalyje susidariusi pasipriešinimą. Pirma apima naują, dantytą ir gofruotą, laivagalio sekciją (formą), antra sumažina korpuso pasipriešinimą naudojant atvirkštinį pjezoelektrinį efektą. Šis efektas sukelia aukšto dažnio vibraciją (virš 20 kHz) elastingoje, 15mm storio, lakšto paviršiaus plėvelėje, kuri sklinda srauto tekėjimo kryptimi. Gofruota-dantyta laivagalio paviršiaus forma davė teigiamus rezultatus, kadangi sumažėjo pasipriešinimas ir bangų susidarymas, pagerėjo varytuvo darbas [33].

Strake B., Raven H., Auke van der Ploeg. (2007) nagrinėja srautą tranciniame laivagalyje 2D erdvėje. Naudojamas *RANS* metodas. Tyrimo tikslas išsiaiškinti kokios apimties srauto režimus *RANS* metodas sugebės nustatyti. Taip pat siekiama ištirti jau turimų tyrimo duomenų teisingumą ir tikslumą, bei suprasti reiškinius vykstančius trancu užsibaigiančiame laivagalyje. Pateikiama tranco sukeliama pasipriešinimo skaičiavimo teorija [31].

Sakamoto N., Kawanami Y. Ir Uto S. (2012) nustatė pasipriešinimo ir eigumo charakteristikas MS791 korpuso formos konteinernežio modeliui, priklausomai nuo skirtingos skego geometrijos, bei siekė gauti naudingos informacijos tolesniems tyrimams su azimutiniais varytuvais. Tirti trys parametrai: 1) skego nuolydis yz-plokštumoje (vertikalus nuolydis) svyruojant nuo $-20,0^\circ$ iki $+20,0^\circ$ laipsnių, 2) skego nuolydis xy-plokštumoje (horizontalus nuolydis) svyruojant nuo $-1,8^\circ$ iki $2,8^\circ$ ir 3) laivagalio "UV" forma. Taip pat priimama sąlyga, kad modifikuoto korpuso vandentalpa turi nesiskirti nuo originalaus korpuso vandentalpos. Tai pasiekama pasitelkiant *Lackenbery* kriterijų. Naudojamas SSD *RANS* metodas, SURF komp. programa. Skego geometrijos keitimas atliktas CAD programa *HullDes*, naudojant *NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline)*. Parengtos modifikacijų funkcijos leidžiančios iš anksto nustatyti laivo korpuso paviršių. Tai leido modifikuoti laivo korpuso formą išlaikant švelnų jos glotnumą. Vertikalaus kampo atveju, k (formos faktorius) ir η_D (propulsinis naudingumas) parodė kompromisinius šių parametru rezultatus, tačiau sumažinti P_D (tiekiama galia) yra sudėtinga esant ne 0° skego kampo reikšmėms. Horizontalaus kampo atveju, skegas veikia kaip mentės profilis su atakos kampu nuo kurio priklauso k , tačiau šio kampo įtaka η_D maža, o atstojamoji P_D tampa minimali, kai horizontalus skego kampas tampa maksimalus teigiama kryptimi. Ateityje siekiama išplėsti šį tyrimą siekiant nustatyti klampaus ir neklampaus skysčio įtaką skaičiavimų rezultatams, padidinti geometrijos keitimo intervalą, pasiūlyti inovatyvų bet realų projektavimo parametru skego modifikacijai, patikrinti ar šio tyrimo duomenys galioja kitokioms skego konstrukcijoms bei konfigūracijoms ir galiausiai atlikti modelio bandymus baseine [26].

Marion C. J., Turnok S.R. ir Hudson D.A. siekė parodyti kaip galima padidinti egzistuojančio tanklaivio efektyvumą 10% modifikuojant laivą (*angl. retro-fit solutions*). Naudota SSD programa *OpenFOAM* (tirta *RANS* metodu), gauti rezultatai palyginami su aerodinamiame vamzdyje atliktais tyrimais. Eksperimentas atliekamas *Mitchell* aerodinamiame vamzdyje, *Southampton* universitete. Pabrėžiama, kad gauti eksperimento duomenys gali neatitikti realybės arba SSD duomenis, kadangi atliekant bandymą vamzdyje, nėra įvertinamas laisvojo paviršiaus poveikis (t.y. bangų susidarymas). Tyrime orientuotasi tik į korpuso laivagalį, todėl modelis sutrumpintas, paliekant maždaug pusę galinės laivo korpuso dalies. Tokiu atveju testuotas didesnio mastelio (1:23) 4 metrų ilgio modelis, todėl mastelinis efektas buvo mažesnis nei tiriant visą laivo korpusą. Atlikus tyrimą nustatyta, kad reikiamą galią sumažinus 1% paprastas trikampio formos sparnas atsipirktų per 25 dienas. Preliminarūs rezultatai parodė, kad naudingumą galima padidinti iki 9 % naudojant srautą gerinančias movas [18].

Haase M., Binns J., Giles T. (2012) ir kiti panaudojo *OpenFOAM* komp. programą, tam ,kad ištirtų bangų pasipriešinimą ramiaame vandenyje, tačiau pagrindinis darbo tikslas buvo nustatyti pasipriešinimą išreikštą viso pasipriešinimo koeficientu. Tinklelis sudarytas iš 1 300 000 dalelių *STAR-CCM+* programa. Tyrimo ribos pasirinktos, atsižvelgiant į bandymo baseinų matmenis. Taip pat tirtas srauto atsiskyrimas laivagalio trance. Nustatyta, kad srautas atsiskiria nuo tranco pasiekus tam tikrą greitį. Atsižvelgiant į simuliacijos bandymus, manoma, kad „sausasis“ (tai nereiškia, kad trancas sausas, tačiau skystis atsiskiria tranco kraštuose, už tranco palikdamos chaotiškus skysčio sūkūrius) trancas susidaro kai $F_r \geq 0,30$. Kai Frūdo skaičius didesnis, o laivagalio trancas paniręs, laivagalyje susidaro žemo slėgio zona, kuri gali turėti didelę įtaką laivo diferentui ir nugrimzdimui. Tokiu atveju susidaro stiprios laivagalinės bangos, kurios tarpusavyje sąveikauja. Didėjant Frūdo skaičiui ir jam pasiekus 0,40 reikšmę, tyrimo rezultatų skirtumas, nuo ankstesnių modelių bandymų buvo aukštesnis (pasipriešinimo reikšmės mažesnės), manoma dėl laivo nugrimzdimo (*angl. squat*) [13].

Tredge V. (2003) savo disertacijoje išsamiai nagrinėjo optimizavimo metodus projektuojant laivagalį. Nagrinėtas optimizavimo procesas yra atvirkštinės geometrijos metodas (*angl. Inverse geometry methods*), norint suprojektuoti laivagalį su norimais srauto greičiais. Šis metodas yra sėkmingai taikomas plokščiadugnių laivų laivagalio projektavime. Suprogramuoti ir patikrinti skirtingi optimizavimo metodai. Kaip pagrindas naudotas *Stratford* nustatytas analitinis metodas, naudojant optimizavimo parametrą srautui β . Taip pat atlikti tyrimai aerodinamiame vamzdyje ir bandymų baseine, siekiant nustatyti korpuso hidrodinamines savybes. Šie eksperimentai parodė, kad optimizuota korpuso forma sudarė mažesnę pasipriešinimą, palyginus su įprastu tokių pačių pagrindinių matmenų korpusu. Trinties ir bangų pasipriešinimas žymiai sumažėjo. Taip pat atsirando galimybė padidinti gabenamo krovinio kiekį, esant tai pačiai galiai.

Buvo nustatyta, kad laivagalio dugno nuožulnumas neturėtų būti didesnis nei 15° laipsnių, kadangi didėja srauto atsiskyrimo tikimybė ir gali susidaryti išilginiai sūkūriai [34].

Sileo L. Ir Steen S. (2009) *RANS* metodu atvaizdavo ir tyrė srauto pasiskirstymą ir sukeliamas hidrodinamines jėgas modifikuotoje ofšorinio laivo konstrukcijoje su skege įmontuotu laivagalio pavairavimo mechanizmu. Tirta minėto pavairavimo mechanizmo ir dviejų laivagalyje esančių varytuvų su movomis sąveika. Iki šio tyrimo modelis buvo tirtas *Marine Technology Centre* Trondheimo mieste. Šiame darbe įvertinamos skirtingos darbo sąlygos (apkrovos) atsižvelgiant į ankstesnius modelinius bandymus. Tiriami keli skirtingi atvejai, kai dirba tik varytuvas, pavairavimo mechanizmas arba abu kartu. Srautui aplink laivo korpusą tirti naudotas komercinė Fluent komp. programa. Gauti rezultatai palyginti su modelio bandymų rezultatais. Jų reikšmės skiriasi nedaug, todėl SSD (*angl. CFD*) atlikti srauto tyrimai laikomi tiksliais. Šiuo darbu buvo siekiama ne tik nustatyti varytuvų ir pavairavimo mechanizmų sąveiką, bet ir pateikti fizikinius reiškinius vizualiai, taip padedant lengviau suprasti srauto ir varytuvų sąveiką, bei padėti ateityje projektuojant Dinaminio Pozicionavimo sistemas ir optimaliai išdėstant varytuvus. Nustatytas žymus pavairavimo mechanizmo traukos sumažėjimas dirbant kartu su varytuvais [28].

Strake B. ir Windt J. (2003) pirmojoje savo tiriamojo darbo dalyje siekia parodyti viensraigčio laivo laivagalio modifikavimą konteineriniam laivui, kuris gali turėti įtakos korpuso efektyvumui, naudojant tiek modelio tiek natūralaus laivo skaičiavimus. Aptariamas mastelinis efektas, palyginama numatytas ir modelio eksperimentiniu būdu gautas bangų sužadavimo laukas (*angl. wake field*). Antroje dalyje orientuojamasi į klampaus srauto susidarymą aplink žemsiurbes. Išvadose pateikiama SSD klampaus srauto tyrimų nauda, optimizuojant viensraigčių laivagalį kroviniuose laivuose. Tiriant žemsiurbes tyrimo metodai yra kur kas sudėtingesni, dėl sudėtingos laivo korpuso formos ir srautų, todėl tikslus srauto nustatymas naudojant SSD yra žymiai sudėtingesnis. [32].

Valkhof H.H. Minguito E., Kooiker K. (2006) Tirtas dvigubos gondolos SGD laivo prototipo hidrodinaminis optimizavimas. Laivas gali talpinti $212\ 000\ m^3$ krovinio ir yra varomas dviejų mažasūkių dyzelinių variklių. Orientuojamasi į sudėtingus srautus susidarančius aplink laivo korpusą, bei bandoma optimizuoti korpuso formą taip, kad išgauti mažiausio pasipriešinimo ir didžiausio įmanomo naudingumo kombinaciją. Tyrimai buvo atliekami SSD programomis ir modelio bandymais baseine. Darbe apžvelgiama laivo forma, trumpai aprašomos alternatyvios laivagalio konstrukcijos (vienkorpusis laivagalis, laivagalis su gondolomis). Nustatyta, kad įmanoma pasiekti 10-15% reikalingos galios skirtumą. Modelio bandymai parodė, kad gautas 8% geresnis propulsinio komplekso naudingumas, nei tikėtasi pagal statistinius duomenis. Apibendrinant pabrėžiama, kad modelio bandymų, SSD bandymų, literatūros apžvalgos ir

papildomų tyrimų dėka, pasiektas geras optimizavimo rezultatas ir būdas, ateityje padėsiantis SGD laivų optimizavimui ir projektavimui [37].

Ruggeri F., Challela M., Sampaio C.M.P. ir kt. (2012) darbe pristatoma srautą gerinančios movos (*angl. Wake Equalizing Duct*) tyrimas, siekiant nustatyti movos formą ir jos įtaką srauto aptekėjimui. Kavitacijos ir vibracijos reiškiniai įvertinti netiesiogiai. Nustatyta, kad esant Frūdo skaičiui mažesniau už 0,15 galima nevertinti laisvojo paviršiaus poveikio. Didelę reikšmę turi mastelinis efektas, todėl Reynoldso skaičius turėtų būti kuo artimesnis realiai reikšmei. Movos optimizavimui naudotos dvi funkcijos. Viena iš jų siekiama sumažinti kuro sąnaudas, kita pagerinti srauto tekėjimą, taip sumažinant vibraciją ir kavitaciją, bei suteikti didesnę komfortą įgulai, bei užtikrinti sraigto ilgaamžiškumą. Pabrėžiama, kad kavitacijai ir vibracijai tirti reikalingi tolesni tyrimai ir bandymai, kadangi šiuos reiškinius sunku išmatuoti ir nustatyti [25].

Auke van der Ploeg (2014) tyrė tanklaivį, kurio greitis 14 mazgų, ilgis tarp statmenų 94 metrai, plotis 15,4 metro, grimzlė 6 metrai o pilnumo koeficientas 0,786. Frūdo skaičius 0,237. Darbe orientuojamasi į automatinį korpuso formos optimizavimą. Priimama tokia, sąlyga, kad laivo vandentalpa negali būti mažesnė, o sraigto vieta bei pagrindiniai laivo matmenys išlieka fiksuoti. Kadangi laivagalyje dažniausiai dominuoja turbulentinis tekėjimas, tyrimui naudotas SSD *RANS* metodas. Pirmiausia sukurta keletą korpuso formų, kurios išplėstų tyrimo ribas, tada vykdomos jų keitimas ir koregavimas. Eksperimento ribos $0,5L_{pp}$ į priekį nuo laivapriekio, $1,5L_{pp}$ į galą nuo tranco. Kadangi korpusas simetriškas tiriama tik viena korpuso pusė. Optimizuota korpuso forma 1% sumažina reikiamą galią, o kai įtraukiamas ir bangų pasipriešinimo sumažinimas reikalinga galia sumažėja 2,2%. Bendras nominalus pasipriešinimas R_T pakito tiek, kad reikalinga galia sumažėjo 5,6% [1].

Nishikawa T., Yamade Y. Sakuma M. Ir kt. (2012) sudarė 32 milijardų elementų *LES* (*Large eddy simulation*) eksperimento modelį, kuriuo tirta bandymo baseinuose testuoto modelio dydžio laivas esant Reynoldso skaičiui $(4,6 \cdot 10^6)$. Tyrime orientuotasi į turbulentinio srauto sudarytus sūkurius pasienio sluoksnyje. Skaičiavimams naudotas vienas iš galingiausių Japonijos superkompiuterių. Naudota komp. programa pavadinimu *FrontFlow/blue (FFB)*. Ši programa modeliuoja turbulentinį srautą *LES* metodu. Kadangi didensio nei 100 milijonų elementų tinklelio sukurti rankiniu būdu neįmanoma, buvo naudotas metodas, kuris tinklelio elementą skaičiavimo metu automatiškai suskaido į dvi dalis kiekviena kryptimi. Naudotas KVLCC2 korpuso modelis, be išsikišančių dalių. Papildomai tirta su grubesniu 62 milijonų dalelių tinkleliu. Laivo midelyje nustatyta apie 50 srauto sūkurių esant grubiam tinkleliui ir apie 150-200 sūkurių, esant detaliu tinkleliui. Palyginus apskaičiuotus pasipriešinimo duomenis su bandymų baseine gautais duomenimis, nustatyta jog detalus tinklelio atveju paklaida buvo tik 0,87%, todėl teigiama, kad

toks tinklelio detalumas yra pakankamas skaičiuojant *LES* metodu. Taip pat galima teigti, jog tinklelio detalumas turi didelę įtaką skaičiavimų tikslumui [20].

Hochkirch K., Bertram V., Mallo B. (2013) analizėje pateikiami ir aprašomi skirtingi korpuso hidrodinaminių savybių įvertinimo metodai. Aprašomi *Rankine panel* metodas, *RANSE* ir modelinių bandymų tyrimai, bei kiekvieno šio metodo privalumai ir trūkumai. Kaip pavyzdžiai pateikiami skirtingų tyrimų duomenys ir jų aprašymai. Išskiriamos tokios temos kaip diferento optimizavimas, korpuso optimizavimas, išsikišusių dalių optimizavimas. Išvadose pabrėžiama, jog optimizuojant korpusą pagal modelio bandymo rezultatus, gauti apie trys ketvirtadaliai pagerėjimo, lyginant su realiu laivu. Pateikiama SSD privalumai ir potencialas, kuris kaip mano autorius tik didės. SSD patogi, dėl didėjančio kompiuterinės technikos galimumo, skaitmeninių programų nuolatinio tobulinimo. Be to yra galimybė tirti ir nagrinėti ankstesnių skaitmeninių tyrimų duomenis, bei koreguoti pačius tyrimus ir atlikti juos iš naujo [14].

Turbulentinio tekėjimo srautas jūrinėse konstrukcijose įprastai apima platų laiko ir ilgio intervalą, ypačingai tais atvejais kai Reinoldso skaičius yra aukštas. Tokiu atveju skaičiuoti ir tirti tokį tekėjimą su tiesioginiu skaitmeniniu modeliavimu (*angl. direct numerical simulation*) yra neįmanoma arba sudėtinga, todėl Bandringa H., Verstappen R., Wubs F., ir kt. (2012) pasiūlė naują skaitmeninį srauto skaičiavimo modelį. Tirtas srautas 2D ir 3D atvejais. 3D atveju naudotas paprastas kvadrato formos cilindras, matuota pasipriešinimo ir keliamosios jėgos koeficientai, *Strauhal* skaičius. 2D atvejo rezultatai pasirodė patikimesni nei 3D, kadangi pastaruoju atveju išmatuoti ne visi reikalingi parametrai [4].

Boutanios Z. ir R. Van't Veer (2012) tyrė vandens srauto tekėjimą aplink plokštę bei ją veikiančias normalines jėgas. Šis tiriamasis darbas remiasi ankstesniais tyrimais. Tai 2D SSD simulacija (2012) ir modeliniai bandymai (1992). Tyrimas vyksta keičiant KC skaičių nuo 1,4 iki 105,0. KC aprašytas Keulegan ir Carpenter (1958). Jis apskaičiuojamas $KC = U_m T / h$, kur U_m yra maksimalus vibruojančio srauto greitis, T – ciklo periodas, o h nurodo plokštės aukštį. Tyrimui atlikti sudarytos penkios 3D SSD simuliacijos. 102 mm ilgio ir 6 mm pločio plokštė pritvirtinta prie tunelio sienelės ir atsikišusi į tunelio vidurį. Gauti duomenys palyginami su ankstesniais tyrimo duomenimis pateikiant grafiškus srauto ir susidariusių sūkurių eskizų palyginimus. Tyrimo duomenys buvo artimi ankstesnių bandymų duomenims, be to 3D simuliacija pasirodė tikslesnė už ankščiau atliktą 2D simuliaciją, lyginant jas su modelio bandymais baseine. Tačiau autorius pabrėžia, jog tikslesniems duomenims gauti reikėtų atlikti detalesnius bandymus. Žemesnės KC reikšmės turėtų būti tiriamos ilgesniame laiko periode, tam kad gauti didesnės apimties duomenis tekėjimo laikui didėjant. Taip pat būtina nustatyti tinklelio detalumo įtaką gautų duomenų tikslumui [7].

Visonneau M. (2005) įgyvendino tyrimą finansuotą *European Framework 5* programos. Pagrindiniai trys tyrimo tikslai: 1) sukurti tinkamą fizinį modelį realaus mastelio srautams 2) Atlikti skaitmeninius realaus mastelio srauto aptekėjimo aplink laivo korpusą tyrimus, patikrinti metodikos patikimumą ir tikslumą 3) Išskelti rekomendacijas tiriant realaus mastelio ir modelio srautus su SSD. Sukurti ir realizuoti tinkamą fizinį modeliavimą realaus mastelio srautams. Tyrimo metu nustatyta, kad relaus mastelio srautai nėra žymiai sunkiau apskaičiuojami, lyginant su modelio sukeltais srautais ir aptekėjimu. Tiriant turbulentinį srautą, pabrėžiama, kad išvadas reikėtų daryti atsargiai, kadangi skirtingi metodai, gali parodyti skirtingus srauto ir sūkurių rezultatus. Taip pat palyginta daug skirtingų laisvojo paviršiaus modeliavimo būdų. Palyginimas parodė gerus, panašius rezultatus, tačiau norint sužinoti rezultatų patikimumą reikėtų juos palyginti su modelių bandymų rezultatais [39].

Išanalizavus užsienio literatūrą (tyrimus), matome, kad daugiausiai jų vykdyta pasitelkiant SSD. Dažniausiai naudojamas *RANS* (arba kartais įvardijamas *RANSE*) SSD metodas, galintis tirti su skysčio klampumu ir sūkūriais susijusius reiškinius. Kalbant apie optimizavimo tyrimus, dažnai tiriamas visas laivo korpusas, o laivagalio tūris nedidelė tyrimo dalis. Taip pat trūksta tyrimų, kurie orientuoti į skego formą bei jo sąveiką su korpusu.

Daugelis tyrimo autorių derina ir tikrina gautus duomenis su eksperimentiniais baseinuose atliekamais bandymais. Taip pat dažnai pažymima, jog reikėtų atlikti detalesnius tyrimus, siekiant nustatyti skaitmeninių skaičiavimo metodų tikslumą tam tikrais atvejais. Šiuo atveju svarbu kaip pasireiškia mastelinis efektas, koks tinkamo tikslumas ir tipas turėtų būti modeliuojant konkretų reiškinį.

2.2 Užsienio metodinės literatūros ir vadovėlių analizė

Schneekluth H. Ir Bertram V. (1998) parašė knygą paremtą Schneekluth paskaitomis Aachen Technologijų Universitete. Knygos tikslas pasitarnauti kaip vadovas laivų projektuotojams ir inžinieriams. Knyga apima braižybos pagrindus, tradicinį projektavimą, hidrostatiką ir hidrodinamiką. Aprašoma optimizavimo sąvoka ir teorija, ekonominis optimizavimo įvertinimas. Joje galima rasti naudingos informacijos sudarant teorinį brėžinį ir korpuso formą (eskizinį projektą), pateikiamos skirtingos laivagalio formos, jų modifikacijos. Nurodoma į ką reiktų atkreipti dėmesį norint suprojektuoti gerą laivagalį, kokia turėtų būti laivagalio forma, norint išvengti sūkurių ir užtikrinti efektyvų varytuvo darbą. Kaip ir daugelyje kitų knygų ir vadovėlių supažindinama su SSD, bei minima kaip ji gali padėti suprojektuoti kokybišką ir optimalų laivo korpusą. Taip pat pateikiama informacija apie srautą gerinančius įtaisus, bei vaizduojama kaip tam tikri įtaisai gali įtakoti srautą ir sūkurių susidarymą [27].

Molland A. (2008) parašė knygą, kurios tikslas suteikti pagrindinę ir papildomą informaciją jūrų inžinerijos srityje, bei pateikti nuorodas tiems, kurie nori daugiau sužinoti apie konkrečią temą detaliau. Knyga skirta laivų statytojams ir projektuotojams, jūrų inžinieriams, mokslininkams ir tyrėjams, taip pat visiems kurie dirba jūrų inžinerijos srityje. Knygos turinį sudaro bendra jūrų inžinerijos apžvalga, apimanti fizikines jūrų inžinerijos savybes ir reiškinius, jūrines transporto priemones, šių priemonių ir laivų dizainą, konstrukciją, eksploatavimą ir saugumą. Aprašoma eigumo teorija, skirtingi pasipriešinimo nustatymo būdai. Kaip vienas iš eigumo nustatymo būdų pateikiamas SSD (*angl. CFD*), aprašoma skirtingi SSD tyrimo būdai, bei veikimo aspektai. Minimama kokios sąlygos ir metodai turio būti taikomos tiriant skirtingas sritis ir siekiant pasiekti atitinkamą rezultatų tikslumą [19].

Bertram V. (2012) Aprašė valdomumo, eigumo, supimosi teoriją. Skyrių gale pateikiami matematinio uždavinių sprendimo pavyzdžiai. Knyga padeda suprasti ir susipažinti su SSD veikimo ir taikymo principais. Trumpai aprašyti *BEM, FEM, FDM ir FVM* SSD (*angl. CFD*) metodai. Taip pat SSD naudojimo atvejai tiriant eigumą, valdomumą, supimasi, slemingą, nejudamus objektus vandenyje (pvz. ofšorines platformas), sraigto srautus. Nurodomas SSD tinkamumas tiriant kiekvieną iš minėtų sričių. Taip pat apžvelgiama laiko, kokybės ir kainos aspektai naudojant SSD [6].

Rawson K.J. ir Tupper E.C. (2001) knygos *Basic ship theory* antrame leidime orientuojasi į dinamines laivų ir kitų jūrinių transporto priemonių savybes ir elgseną sudėtingoje jūrinėje aplinkoje, kurioje laivai yra eksploatuojami. Siekiama išsiaiškinti kaip aplinka veikia efektyvų laivo eksploatavimą ir kaip galima maksimaliai sumažinti aplinkos poveikį. Supažindinama su skysčių dinamika, laivo pasipriešinimo ir eigumo teorija, varytuvais, supimusi, valdomumu. Aprašoma ir SSD, skirtingi tyrimo būdai. Knygoje taip pat galima sužinoti apie projektavimo procesą, laivų sistemas bei skirtingas jūrines transporto priemones [24].

Tupper E. (2002) pateikia esmines jūrų inžinerijos žinias ir teoriją. Knygoje galima rasti teoriją apie praktiškai visas laivo jūrines savybes, laivų konstrukciją, stiprumą, bei aplinką kurioje laivai yra eksploatuojami. Eigumo skyriuje aprašoma skysčių srauto teorija, laivo pasipriešinimas ir jo skaičiavimas. Taip pat supažindinama su projektavimo aspektais ir procesu [35].

D.J. Eyres (2001) parašė knygą, kuri orientuojasi į studentus, ir siekiančius karjeros jūrinėje srityje. Knygos tikslas pakankamai detaliai pateikti bendrą informaciją apie laivus bei jų konstrukciją. Aprašoma laivo konstrukcija, įskaitant ir laivagalio konstrukciją ir elementus. 2012 metais išleistas septintas knygos leidimas [9].

You-Sheng Wu, Wei-Cheing Cui ir Guo-Jun Zhou (2001) pateikia saugumo, bei laivų ir jūrinių statinių projektavimo standartus. Knyga parašyta remiantis išaugusia laivų statybos ir

projektavimo paklausa, ofšorinės inžinerijos ir technologijų vystymusi. Siekiama pristatyti naują, saugų, aplinką saugantį ir ekonomišką projektavimo sampratą. Taip pat trumpai apžvelgiama Kinijos klasifikacinės bendrovės pasiekimai šioje srityje [15]. Knygoje pateikiama daug skirtingų Azijos specialistų tiriamųjų darbų surūšiuotu pagal atitinkamas temas.

Išanalizavus užsienio knygas ir vadovėlius matome, jog beveik visi šaltiniai pateikia teoriją apie laivo jūrines savybes. Dažniausiai apžvelgiama laivo jūrinių savybių, konstrukcijos ir jos stiprumo teorija, skaičiavimo metodikos ir matematinis bei fizinis reiškinių paaiškinimas. Knygose gausu matematinių formulių, pasipriešinimo nustatymo aprašymų ir metodikos. Deja trūksta praktinių, konkrečių, susistemintų ir aiškiai suprantamų pavyzdžių, bei rekomendacijų, kuriuose būtų aiškiai apibrėžti tam tikri laivo korpuso parametrai, norint suprojektuoti laivo korpusą, kuris optimaliai veiktų tam tikromis sąlygomis. Taip pat mažai informacijos susijusios su laivagalio forma ir jame vykstančius vandens srauto ir tekėjimo reiškinius. Trūksta srauto pasiskirstymo pavyzdžių esant tam tikrai laivo korpuso, konstrukcijos arba geometrinių kūnų formai. Šiuose šaltiniuose galima rasti naudingos informacijos, tačiau daugeliu atveju galima tik labai abstragčiai ir preliminariai įsivaizduoti, koks srautas susidarys esant tam tikrai laivagalio formai.

2.3 Mokslinės lietuviškos literatūros analizė

Čerka J. (2005) aprašė laivo eigumą, t.y. laivo savybes išvystyti reikiamą greitį tam eikvojant kuo mažiau galios, sampratą. Laivo eigumas priklauso nuo dviejų tarpusavyje susijusių dalykų: vandens pasipriešinimo laivo judėjimui ir laivų varytuvų. Aiškinamos vandens pasipriešinimo laivo judėjimui susidarymo priežastys ir mažinimo būdai, pasipriešinimo įvertinimo metodai. Pateikta informacija apie įvairius laivų varytuvus, išsamiai išnagrinėta laivo sraigto konstrukcija, veikimo principas, projektavimo ir optimizavimo klausimai. Knyga skirta laivinių, jūrinių, uosto specialybių bakalaurų, magistrantūros bei doktorantūros studijų klausytojams. Joje naudingos informacijos gali rasti laivų projektuotojai, taip pat laivų eksploatavimo specialistai [8].

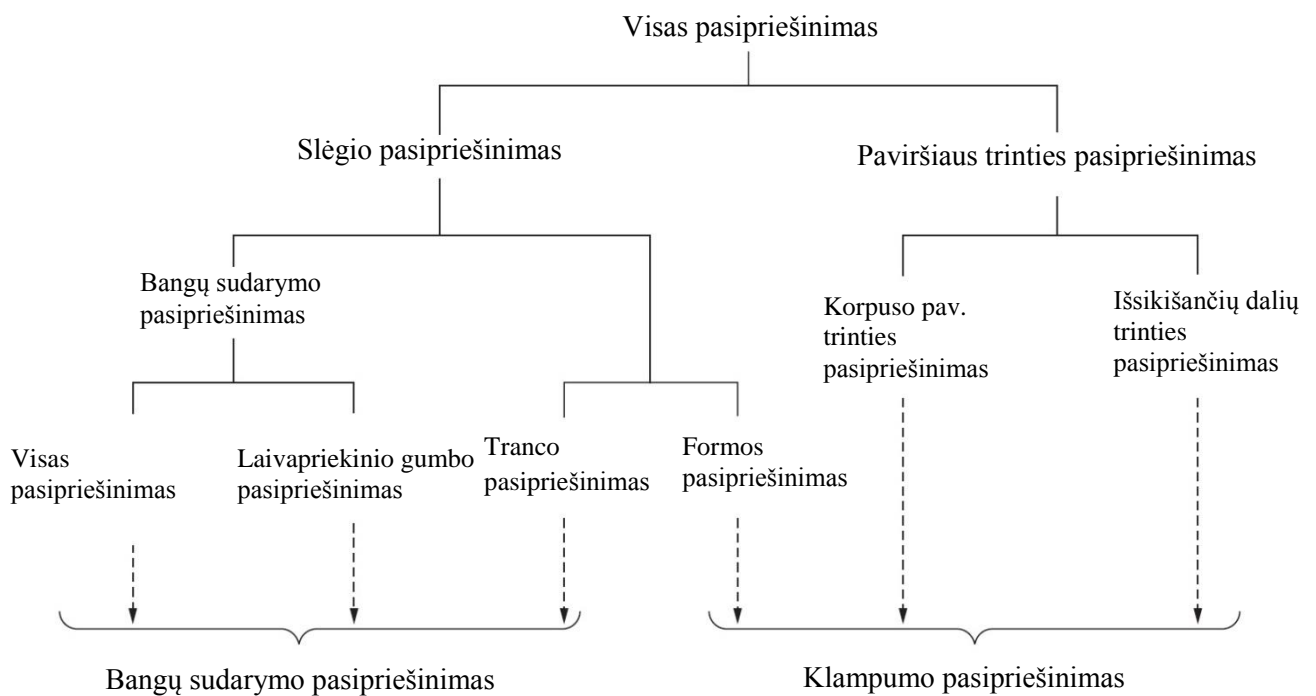
Stonkauskas V. (2006) knygoje *Laivo teorija* nagrinėjamos laivo jūrinės savybės. Aptariami laivo plūdrumo ir stovumo klausimai, pateikiama jų skaičiavimo pavyzdžių, informacijos apie plūdrumo, stovumo priklausomumą nuo krovinio tipo ir jo išdėstymo laive [30]. Nors knyga orientuojasi į plūdrumo ir stovumo klausimus, joje pateikiami ir eigumo pagrindai. Aprašomas trinties, formos, bangavimo pasipriešinimas, taip pat vandens pasipriešinimas plaukiant seklumose ir oro pasipriešinimas. Pateikiama keletą konstrukcinių sprendimų, mažinančių pasipriešinimą. Taip pat supažindinama apie varytuvus ir sraigto teoriją. Knyga skirta jūrinių specialybių studentams, siekiantiems įgyti aukštąjį neuniversitetinį išsilavinimą, taip pat bakalaurų studijų klausytojams [30].

S. Barkevičius (2011) savo magistrantūros baigiamajame darbe išanalizavo užsienio mokslininkų atliktus tyrimus, pagal egzistuojančias metodikas apskaičiavo vienkorpusio laivo ir katamarano vandens pasipriešinimą. Nors tiriamasis darbas orientuojasi į daugiakorpusių laivų korpusų interferencijos (sąveikos tarpusavyje) tyrimą, jame taip pat aprašoma laivo eigumo pagrindai, ir SSD (*angl. CFD*) veikimo principas, privalumai ir trūkumai [5].

Išanalizavus lietuviškus šaltinius matome, jog šaltiniai yra labai riboti. Vadovėliuose pateikiama glausta informacija ir pagrindinė laivo ir jo jūrinių savybių teorija. Klaipėdos Universitetas yra pagrindinė institucija Lietuvoje besispecializuojanti jūrų technikoje ir inžinerijoje, todėl pagrindiniai šalies šaltiniai šia tema leidžiami Universiteto specialistų ir studentų. Deja informacijos susijusios su laivagalio (skego) optimizavimu ir srauto aptekėjimu šiuo atveju rasti nepavyko, tačiau pateiktuose šaltiniuose galima rasti informacijos, kuri netiesiogiai pasitarnautų tyrimui.

III. LAIVO PASIPRIEŠINIMO TEORIJA

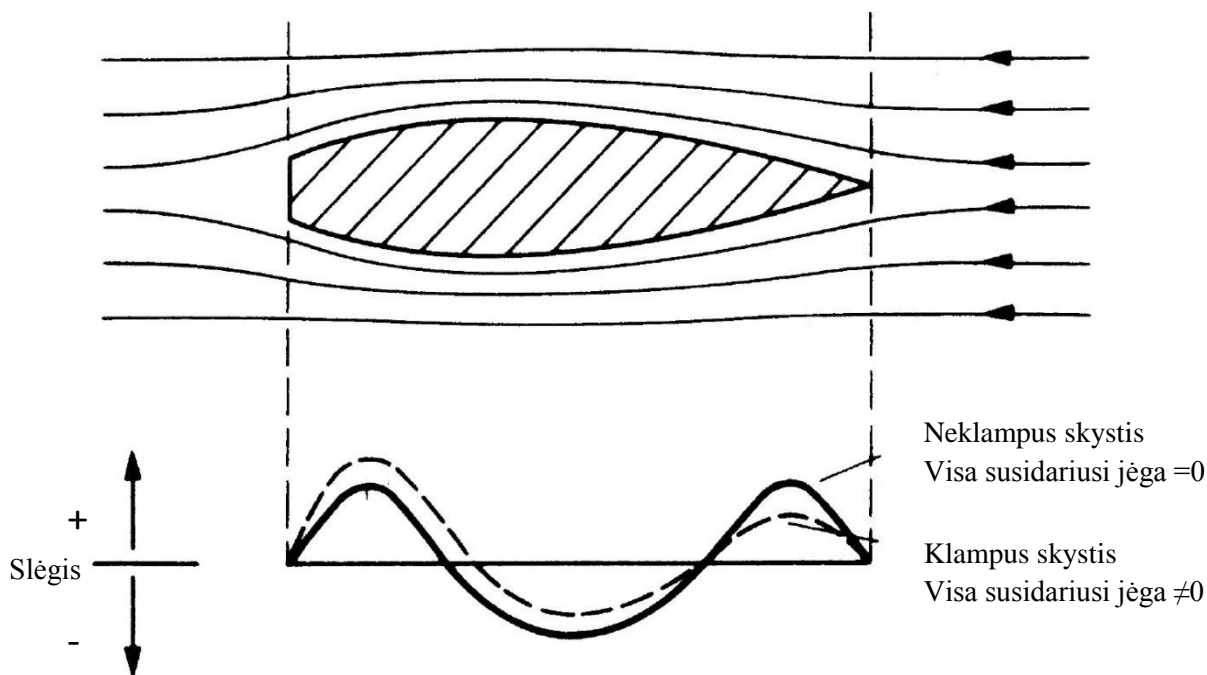
Eigumas – laivo savybė išvystyti reikiamą greitį tam eikvojant kuo mažiau galios. Laivo eigumas priklauso nuo dviejų tarpusavyje susijusių dalykų: vandens pasipriešinimo laivo judėjimui ir laivo vartytuvų [8]. Visas pasipriešinimas laivo judančio ramiame vandenyje susideda iš kelių komponenčių. Tai bangų susidarymo pasipriešinimas R_W , paviršiaus trinties pasipriešinimas R_F , klampumo sudaryto slėgio pasipriešinimas (arba formos pasipriešinimas) R_{VP} , oro pasipriešinimas R_{AA} , išsikišančių dalių pasipriešinimas R_{AP} . Kiekviena komponentė gali būti nagrinėjama atskirai, tačiau reikia nepamiršti kad kiekviena iš jų sąveikauja tarpusavyje. Detaliau panagrinėsime pagrindines pasipriešinimo komponentes.



2 pav. Laivo pasipriešinimo komponentės [atkurta iš 19]

3.1 Vandens pasipriešinimo laivo judėjimui susidarymas

Klasikinė hidrodinamikos teorija parodė, kad neklampiamame skystyje giliai paniręs kūnas nepatirs pasipriešinimo. Nesvarbu kaip skystis aptekės kūną, jis ilgai neišsilaikys savo pradinę padėtį. Skystyje susidaro skirtingo slėgio zonos, kai srautas iškreipiamas ir dalėlių greičiai skiriasi. Šiuo atveju pasireiškia Bernulio teorema, kai padidėję greičiai siejami su slėgio sumažėjimu. Kūnas veikiamas jėgomis, tačiau jos viena kitą panaikina (jėgų suma lygi nuliui).



3 pav. Skystyje judančio kūno sukeltas slėgis [atkurta iš 24]

Realiuose, klampiuose skysčiuose giliai paniręs kūnas patirs trinties pasipriešinimą. Kai judantis kūnas pasiekia laisvąjį paviršių, slėgio skirtumai pasireiškia skysčio paviršiaus įdubimais ir iškilimais, taip susidaro bangos. Šis reiškinys sudaro slėgio jėgas veikiančias kūną, dėl kurių susidaro vilkimo (pasipriešinimo) jėga. Šios jėgos dydis priklauso nuo sukeliama bangų sistemos energijos.

3.1.1 Bangų pasipriešinimas

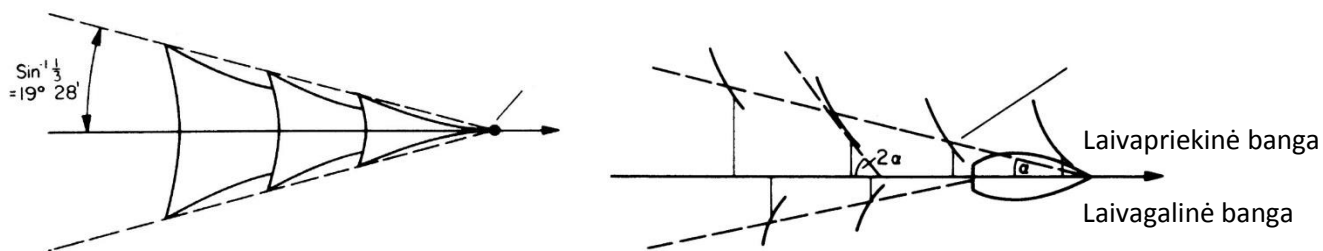
Įprasta, kad kūnas judantis ramiaame vandens paviršiuje sukelia bangas. Bangos (bangų sistema) atsiranda dėl susidariusio slėgio lauko aplink laivo korpusą, kurį sukelia judantis kūnas. Kadangi jis laikomas energijos transportuotojas (sukelėjas) jį veiks jėga priešinga judėjimui pirmyn. Ši susidariusi jėga vadinama **bangų sukeliama pasipriešinimu**.

Paniręs kūnas taip pat patiria pasipriešinimą dėl bangų susiformavimo laisvajame vandens paviršiuje. Šios jėgos dydis mažėja didėjant panirimo gyliui, o giliau panirusiame kūne ši jėga pasidaro nereikšminga. Tai pasireiškia gylyje lygiam maždaug pusė kūno ilgio. Išimtis gali būti kai paniręs kūnas juda tarp dviejų skirtingų skysčių sluoksnių. Tokiu atveju bangos susidaro tarp šių sluoksnių, sukeldamos pasipriešinimą. Traukos banga, kurios ilgis λ , giliame vandenyje juda greičiu C apibrėžtu [24]:

$$C^2 = \frac{g\lambda}{2\pi}, \quad (1)$$

Kadangi bangų laukas (*angl. wave pattern*) juda kartu su laivu, C turi būti lygus laivo greičiui v , o λ gali būti priimamas kaip proporcingas laivo ilgiui L esant duotam greičiui.

Hidrodinaminiu požiūriu laivas gali būti laikomas judančiu slėgio lauku. *Kelvin* pateikė matematinį supaprastintą judančio slėgio taško atvejį, ir parodė, kad susidaręs bangų laukas susideda iš dviejų sistemų, kurios juda slėgio taško greičiu.



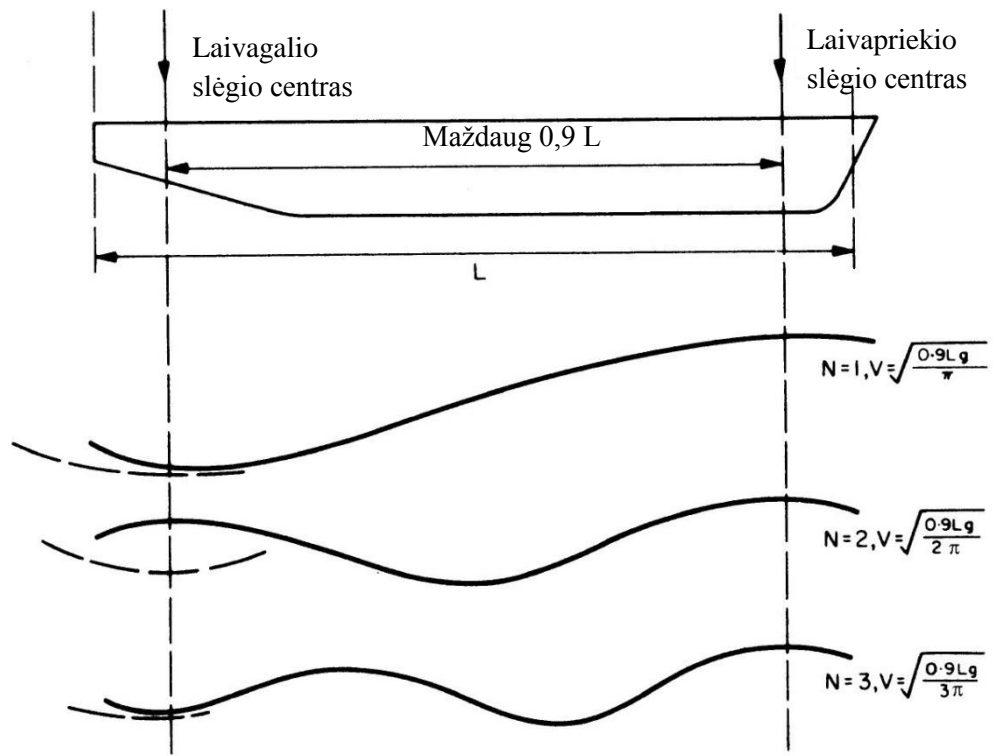
4 pav. Judančio slėgio taško ir laivo sukeltos bangų sistemos [atkurta iš 24]

Bangų sistema veikianti kartu su laivu yra kur kas sudėtingesnė. Supaprastinimui gali būti laikoma, kad laivas yra judantis slėgio laukas šalia laivapriekio ir neigiamas slėgio laukas šalia laivagalio. Laivapriekio sukeltas slėgio laukas yra panašus į Kelvin'o judančio slėgio taško, o laivagalio sukeltą įdubą. Kaikuriuose laivuose sukelta bangų sistema gali būti daug sudėtingesnė, kadangi bangos sukeltos dėl vietinių laivo formos netolygumų.

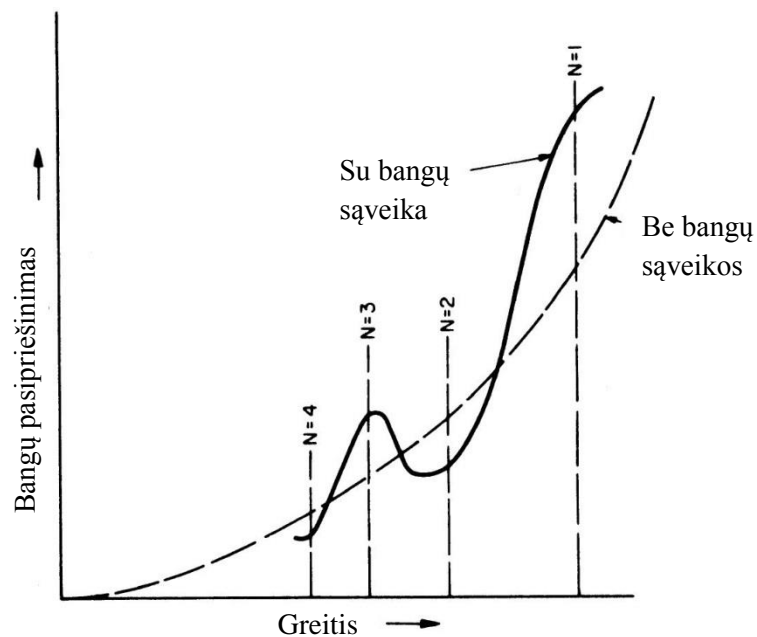
Kadangi daugeliu greičių laivapriekinė ir laivagalinė bangos veikia laivagalyje, pasireiškia sąveika tarp dviejų skersinių bangų sistemų. Jeigu šių sistemų fazės sutampa, galutinė bangų sistema turės padidėjusį aukštį ir atitinkamai didesnę energiją. Jei skirtingų sistemų bangų keteros yra viena tarp kitos, bendra bangų sistema bus mažesnė, kartu ir mažesnis bendras bangų aukštis bei energija. Bangų sudaromas pasipriešinimas priklauso nuo bendro bangų sistemos energijos kiekio, kinta nuo greičio ir efektyvaus atstumo tarp laivapriekinio ir laivagalinio slėgių sistemos. Šiuo atveju svarbūs laivo greičio v ir ilgio L paramterai.

Atstumas tarp laivapriekio ir laivagalio slėgių sistemų paprastai yra $0,9 L$. Sąlyga, kad laivapriekio bangos keteros arba įdubos sutaps su pirma laivagalio įduba yra [24]:

$$\frac{v^2}{0,9L} = \frac{g}{N\pi}, \quad (2)$$



5 pav. Laivapriekio ir laivagalio bangų sistemų sąveika [atkurta iš 24]



6 pav. Laivo bangų sukkelto pasipriešinimo priklausomybė nuo greičio
 $N=1,3,5,7$ ir t.t. [atkurta iš 24]

Jei nebūtų sąveikos tarp laivapriekio ir laivagalio bangų sistemų, pasipriešinimas kiltų tolygiai priklausomai nuo greičio, kaip pavaizduota 6 paveiksliuke.

Kauburys susidarys esant nelyginiam skaičiui, o įduba kai skaičius lyginis. Ryškiausias kauburys bus $N=1$, kadangi tuo metu yra didžiausias greitis. Šis kauburys dažnai vadinamas pagrindiniu kauburiu. $N=3$ dažnai vadinamas išilginių pilnumo koeficiento kauburiu, kadangi jis gan ženkliai priklauso nuo laivo korpuso išilginių pilnumo koeficiento [Basic ship theory 5E].

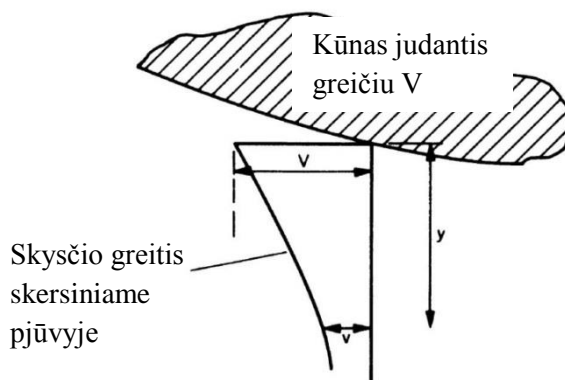
Kadangi Frūdo skaičius $F_r = V/\sqrt{gL}$, F_r reikšmės atitinkančios kauburiui ir įduboms yra tokios [24]:

N	F_n
1	$\sqrt{\left(\frac{0.9}{\pi}\right)} = 0.54$
2	$\sqrt{\left(\frac{0.9}{2\pi}\right)} = 0.38$
3	$\sqrt{\left(\frac{0.9}{3\pi}\right)} = 0.31$
4	$\sqrt{\left(\frac{0.9}{4\pi}\right)} = 0.27$

Projektuotojai stengiasi projektuoti laivą taip, kad jo eksploatacinis greitis būtų bangų pasipriešinimo įduboje.

3.1.2 Trinties pasipriešinimas

Vanduo, kuriame laivas juda pasižymi klampumu, kuri yra visų realių skysčių savybė. Kai kūnas juda ramiam skystyje, plonas skysčio sluoksnis prilimpa prie kūno, ir jo greitis lygus nuliui kūno atžvilgiu. Tam tikru atstumu nuo kūno skystis išlieka pastovios, ramios savo būsenos (išlaiko rimtį). Skysčio greičio kitimas yra spartesnis arčiau kūno, tačiau mažėja tolstant nuo jo. Sluoksnis, kuriame skysčio greitis smarkiai kinta vadinamas **pasienio sluoksniu**. Pasisienio sluoksnio apibrėžimas yra sutartinis, kadangi teoriškai jis tęsiasi iki begalybės. Įprastai laikoma, kad sluoksnio storis yra, nuo kūno paviršiaus iki atstumo, kuriame greitis yra lygus 1 procentui kūno greičio [24].



7 pav. Pasisienio sluoksnis [atkurta iš 24]

Dėl greičio gradiento skersai pasienio sluoksnyje skystis yra veikiamas šlyties ir kūnas patiria pasipriešinimą, kuris vadinamas **trinties pasipriešinimu**. Jei skysčio greitis yra v atstumu y nuo kūno, tada šlyties jėgos/įtempimai yra [24]:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}, \quad (3)$$

čia μ – dinaminio klampumo koeficientas.

Tai taikoma laminariniam tekėjimui, kuriame kiekviena skysčio dalelė seka savo tėkme be masės perdavimo gretimoms skysčio sluoksniams. Šlytis šiuo atveju yra tikrai dėl molekulinės sąveikos. Laminarinio tekėjimo sąlygos pasireiškia tik esant pakankamai žemiems Reinoldso skaičiams. Esant didesniems Reinoldso skaičiams, pastovi srauto struktūra skyla ir yra pakeičiama labiau painaus ir chaotiško srauto struktūros, kuris vadinamas **turbulentiniu srautu**. Reikšmė, kuriai esant vyksta „lūžis“ vadinamas **kritiniu Reinoldso skaičiumi**, ir jo reikšmė priklauso nuo paviršiaus šiurkštumo/švelnumo, ir pradinės turbulencijos skystyje. Lygioje plokštėje lūžis įvyksta esant Reinoldso skaičiui maždaug tarp $3 \cdot 10^5$ ir 10^6 [24]. Esant turbulentiniam srautui pasienio sluoksnio modelis vis dar yra taikomas, tačiau be molekulinės trinties jėgos, yra sąveika dėl inercijos (*angl. momentum*) perėjimo tarp gretimų sluoksnių. Tikslus turbulentinio pasienio sluoksnio modelis vis dar nėra visiškai suprastas, tačiau žinoma, kad jis seka greičio pasiskirstymo kreive (7 pav.), tačiau ji žymi tik vidutinę greičio kreivę.

Perėjimas iš laminarinio į turbulentinį tekėjimą yra srauto pastovumo reiškinys. Esant mažiems Reinoldso skaičiams skysčio susidrumstimas išnyksta ir srautas pasidaro stabilus. Esant kritinei Reinoldso reikšmei laminarinis tekėjimas pasidaro nestabilus ir menkiausias sutrikdymas sukelia turbulenciją. Kritinis Re plokščiam paviršiui yra l funkcija (l - atstumas nuo priekinės briaunos/krašto). Priekyje, už l , apibrėžiama taip [24]:

$$(Re)_{kritinis} = \frac{vl}{\nu}, \quad (4)$$

Tekėjimas yra laminarinis. Esant atstumui l prasideda perėjimas ir po tam tikros perėjimo zonos turbulencija pasireiškia pilnai.

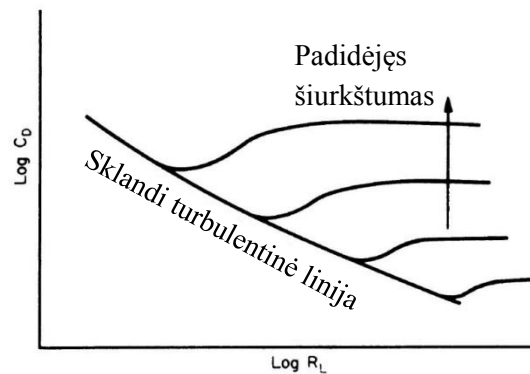
Plokščiam paviršiui kritinis Reinoldso skaičius yra maždaug 10^6 [24]. Kreivam paviršiui, slėgio gradientas išilgai paviršiaus turi įtakos tekėjimo režimo perėjimui. Perėjimas yra atitolinamas vietose, kur slėgis mažesnis, pavyzdžiui ten, kur padidėjęs greitis. Šis reiškinys panaudotas kuriant kai kurias aerodinamines, mažo pasipriešinimo formas, tokias kaip laminarinio srauto sparnas (*angl. „laminar flow“ wing*). Plokščia plokštė patiria 7 kartus didesnę pasipriešinimą turbulentiniu režimu palyginus su laminariniu [24].

Turbulentinio tekėjimo pasienio sluoksnio storis yra apytiksliai [24]:

$$\frac{\delta x}{L} = 0,37(R_L)^{-\frac{1}{5}}, \quad (5)$$

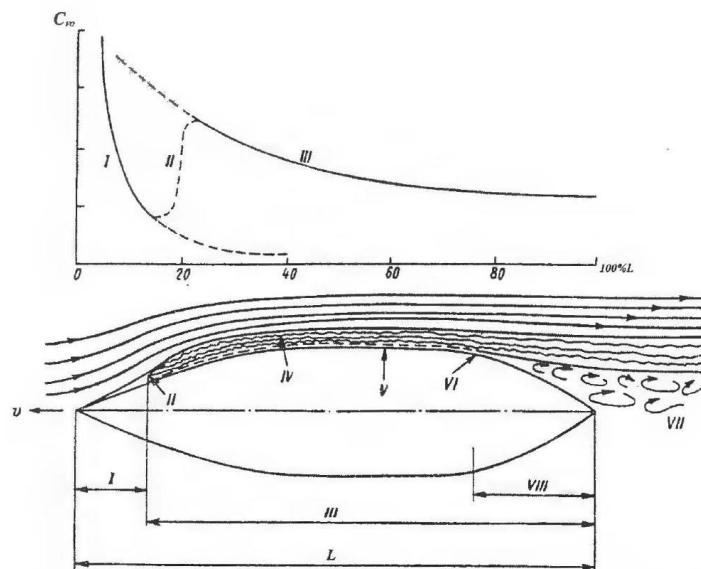
kur L atstumas nuo priekinio krašto, o R_L yra atitinkamas Reinoldso skaičius. Pavyzdžiui esant 15 m/s ir ilgiui $L=150\text{m}$, $\delta\tau$ bus apie 0,75 m.

Net turbulentinio tekėjimo režimu, skysčio dalelės esančios greta kūno paviršiaus yra ramybės būsenoje kūno atžvilgiu. Tai parodo, jog yra laminarinis pasluoksnis, kuris yra ypač plonas. Svarbu, kad kūnas būtų pakankamai lygus ir jo nelygumai neišsikištų iš šio pasluoksnio. Toks kūnas bus hidrauliškai lygus, o jo pasipriešinimas priklausomai nuo Reinoldso skaičiaus pavaizduotas 8 pav.



8 pav. Šiurkštumo poveikis (čia C_D pasipriešinimo coef.) [atkurta iš 24]

Esant šiurkščiam paviršiui, pasipriešinimo kreivė kinta švelniai, kol pasiekama tam tikra riba. Kreivė atitrūksta ir galiausiai tampa horizontali, pasipriešinimo koeficientas kinta nebe priklausomai nuo Re , o priklauso nuo greičio kvadrato. Kuo paviršius šiurkštesnis, tuo Re prasidedant atotrūkiui mažesnė.



9 pav. Trinties pasipriešinimo susidarymas: I - laminarinis, II - pereinamasis ir III - turbulentinis tekėjimo režimas pasienio sluoksnyje; IV - pasienio sluoksnio riba; V - laminarinis posluoksnis; VI - pasieninio sluoksnio atitrūkimas; VII - hidrodinaminis pėdsakas; VIII - sukūrių zona [8]

Praktiniais tikslais, visas pasienio sluoksnis laivo esančio jūroje gali būti laikomas kaip turbulentinis. Dėl pasipriešinimo skirtumo tarp skirtingų pasienio sluoksnių (tekėjimo režimų),

susidarė nemažai nepastovių bandymų baseinų eksperimentų duomenų praeityje, todėl dauguma bandymų baseinų laboratorijų pradėjo dirbtinai sudaryti turbulentinio tekėjimo sąlygas, tam kad užtikrinti tikslesnį realių sąlygų ir reiškinių sukūrimą. Naudojami keli skirtingi būdai sudaryti turbulentiniam tekėjimui, tačiau dažniausiai naudojamos smeigių eilės modelio korpuse nedideliu atstumu nuo laivapriekio.

Dėl patogumo trinties pasipriešinimas yra suskaidomas į dvi komponentes. Pirmoji yra atitinkamo ploto plokščios plokštės sukeliamas pasipriešinimas. Antroji yra padidėjęs trinties pasipriešinimas susidarantis dėl laivo korpuso formos ir yra žinomas kaip trinties formos pasipriešinimas.

Korpuso šiurkštumas yra sudėtingas dalykas, kadangi jis priklauso nuo daugybės veiksnių, tokių kaip korpuso apkalos nelygumai, suvirinimo siūlės bei gofrai susidarę gamybos ar eksploatavimo metu. Šiurkštumas ir nelygumai didės eksploatacijos metu, dėl vandens ir apkrovų poveikio. Dažų plėvelės nusidėvi ir galiausiai prasideda korozija. Taip pat daugelyje plaukiojimo rajonų korpusas apauga vandens organizmais.

3.1.3 Klampumo slėgio pasipriešinimas

Visas korpuso pasipriešinimas apima laivapriekio ir laivagalio viso slėgio komponentes. Slėgio pasipriešinimas yra dėl klampumo efekto, kuris slopina slėgio susidaryma laivagalyje, kuris būtų esant idealiems skysčiams. Dalis šio pasipriešinimo yra dėl sūkurių, susidariusių dėl korpuso formos nepastovumo, tokios kaip laivo korpuso žiaunos kitimas. Kita dalis susidaro dėl pasienio sluoksnio susidarymo, ir gali būti padidinta srauto atsiskyrimu. Kadangi dvi pastarosios pasipriešinimo dalys susidaro dėl laivo korpuso formos, jos vadinamos **formos pasipriešinimu**. Formos pasipriešinimas yra didžiausias pilnų apvadų (aukšto pilnumo koeficiento) laivuose. Prarasta slėgio energija pasireiškia bangomis ir sūkuriais.

Praktiniais tikslais laivo pasipriešinimas įprastoms laivo formoms sugrupuojams į bangų pasipriešinimą, formos pasipriešinimą, sūkurių ir trinties formos pasipriešinimą, kurios sujungiamos į vieną bendrą pasipriešinimo dalį t.y. **likusį pasipriešinimą**. Šis modelis teoriškai nėra teisingas, tačiau praktikoje pateikia pakankamai tikslius atsakymus. Taigi visas pasipriešinimas [8]:

$$R_T = R_R + R_F, \quad (6)$$

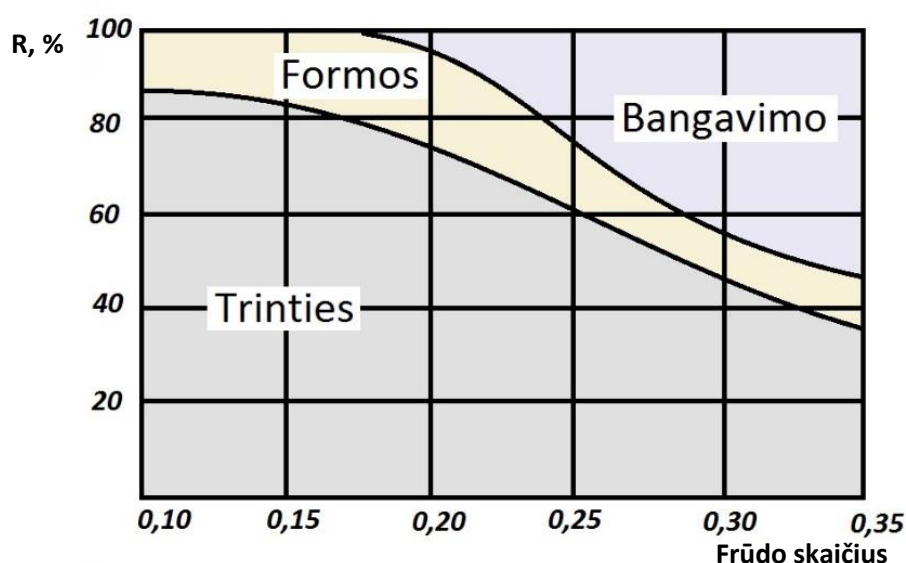
čia R_R – Likęs pasipriešinimas;

R_F – Lygios ekvivalentinės plokštės trinties pasipriešinimas;

R_T – Visas pasipriešinimas.

Nagrinėjant laivo pasipriešinimo susidarymą, reikia nagrinėti ir varytuvo įtaką, kadangi korpusas ir varytuvas praktiškai yra viena sistema, todėl jų sąveika neišvengiama.

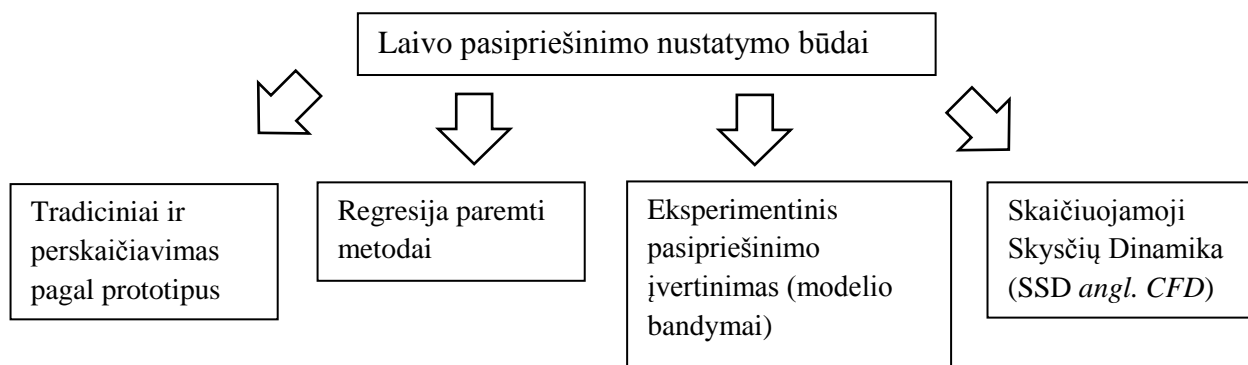
Skirtingos viso pasipriešinimo dalys pasireiškia skirtingai kintant Frūdo skaičiui. Kai laivo greitis mažiausias didžiausią įtaką turi trinties pasipriešinimas, o formos pasipriešinimas lieka antras pagal sukeliamą pasipriešinimą. Greičiui didėjant trinties ir formos pasipriešinimas ženkliai sumažėja, kadangi pradeda susidaryti laivinės bangos, kurios pasiekus 0,35 Frūdo skaičių sudaro didžiąją dalį viso pasipriešinimo. Todėl projektuojant laivą, priklausomai nuo jo greičio ir dominuojančios pasipriešinimo dedamosios, laivo korpuso forma turėtų būti atitinkama.



10 pav. Pasipriešinimo dedamosios priklausomai nuo Frūdo skaičiaus [atkurta iš 8]

3.2 Pasipriešinimo nustatymo būdai

Laivo pasipriešinimo nustatymui projektuotojas turi keletą skirtingų būdų. Šie būdai pavaizduoti paveiksluke ir svyruoja nuo tradicinių skaičiavimo metodų iki sudėtingesnių Skaičiuojamosios Skysčių Dinamikos skaičiavimų. Skaičiavimo būdo pasirinkimas priklauso ne tik nuo turimų galimybių, bet ir nuo norimo gauti rezultato tikslumo, finansinių galimybių ir kokiam lygmenyje pasipriešinimas bus nagrinėjamas. Paveikslukas pavaizduoja keturis pagrindinius skaičiavimo būdus, tai tradiciniai ir standartiniai, Regresija paremti metodai, modelių bandymai ir SSD. Kiekvienas skaičiavimo būdas turi savo metodiką, o jų tarpusiuo rezultatai gali skirtis, todėl kiekvienu atveju reikėtų žinoti, kokį būdą tikslingiausia taikyti [19].



11 pav. Pasipriešinimo nustatymo metodai [atkurta iš 19]

Skirtingai nei SSD ir natūrinių bandymų pasipriešinimo nustatymo būdais, kiti būdai paremti standartiniais laivų inžinerijoje naudojamais laivo korpuso formą apibūdinančiais parametrais. Tai pilnumo ir formos koeficientai, svorio ir plūdrumo centrų koordinatėmis ir pan. Šie formos parametrai naudojami senai ir pasitarnavo kaip patikimi duomenys projektuojant laivus ir nustatant jų pasipriešinimą, tačiau augant poreikiui nustatyti tikslesnį pasipriešinimą tokių metodų nebeužtenka. Be to atsiranda vis daugiau laivų, kurių korpuso forma skiriasi nuo įprastų įgaudama naujus kontūrus ir konstrukciją, todėl tradiciniai formos koeficientai ir parametrai sudėtingesnių formų nebeaprašo taip tiksliai kaip įprastų korpuso formų. Tokiu atveju reikalingi parametrai ir koeficientai kurie tiksliau aprašytų korpuso formą, todėl yra atliekami moksliniai tyrimai, kuriais siekiama išplėsti formos parametrus [19].

Modelio bandymai yra labai svarbi sudedamoji projektavimo dalis. Jie naudojami nevisada, kadangi yra palyginti brangūs, tačiau dėl neoptimalaus korpuso išaugusiomis eksploatacijos išlaidomis, šie bandymai gali duoti teigiamą finansinę naudą ilgalaikiame laivo eksploatacijos periode. Yra keletas eksperimento būdų, tačiau čia orientuosimės tik į tuos, kurie padeda nustatyti srautą aplink laivo korpuso paviršių, ir susidariusį korpuso pasipriešinimą.

Bandymuose laivo modelis yra velkamas vežimu, matuojama pasipriešinimo jėga veikiamas velkant modelį skirtingais greičiais. Svarbu, jog bandymų baseino matmenys nebūtų pernelyg maži tiriamojo modelio atžvilgiu, kadangi tarp modelio ir bandymo baseinų sienų gali pasireikšti interferencija, todėl gauti duomenys nebus objektyvūs. Tai gali būti išimtis tiriant laivo eigumą ribotuose plaukiojimo erdvėse, pavyzdžiui sekliuose vandenyse, upėse, kanaluose ir pan. Bandymai rodo, jog laivo povendėninės dalies skerspjuvio ir bandymų baseino skerspjuvio ploto santykis turėtų būti ne didesnis nei 1%, rekomenduojama 0,4% [19]. Kuo modelio mastelis didesnis, tuo tikslesnius duomenis gausime, kadangi mastelinis efektas pasireiškia ne taip stipriai. Norint tinkamai išbandyti ir įvertinti tokių modelių pasipriešinimą reikia atitinkamo bandymo baseino, kuris pagal minėtą modelio ir baseino santykį turėtų būti atitinkamo dydžio.

Modeliai gaminami iš parafino, vaško, medžio arba stiklo pluoštu sustiprinto plastiko. Jie turi būti itin tikslūs. Modelio priekyje tvirtinami turbulenciją sukeltantys elementai, tam kad

sukeltų srauto perėjimą iš laminarinio tekėjimo į turbulentinį. Modelis su balastu (norint išgauti reikiamą grimzlę ir diferentą) tvirtinamas prie vežimėlio ir gali judėti vertikaliai bei įgauti diferentą [19].

Egzistuoja daugybė būdų, kuriais galima tirti srauto aptekėjimą aplink laivo korpusą. Vienas iš tokių metodų yra laivo korpusą sužymėti vertikaliomis (statmenos pagrindinei linijai) dažų juostelėmis. Vėliau bandant modelį norimu greičiu šie dažai ištysta dryželiais, kurie pasiskirsto srauto tekėjimo kryptimi. Kai bandymus su dažais atlikti sudėtinga arba netikslinga, galima naudoti medžiagines juosteles. Tai vilnoniai siūlai mažomis adatėlėmis pritvirtinti prie korpuso paviršiaus. Stebėjimui po vandeniū naudojama kamera, kuri fiksuoją siūlelių padėtį. Tokiu būdu taip pat galima tirti korpuso ir sraigto sąveika, bandant ir vėliau palyginant srauto aptekėjimą su veikiančiu sraigtu ir jam nejudant [19].

Kitas pasipriešinimo ir srauto nustatymo būdas yra Skaičiuojamoji Skysčių Dinamika (SSD). SSD skirtas pasipriešinimo ir eigumo tyrimams dažnai apibūdinamas kaip “skaitmeninis bandymų baseinas“. Naudojant šiuolaikinius SSD programinius paketus tapo įmanoma itin detalai nustatyti ir vizualiai pateikti vandens tėkmę aplink laivą ir jo elementus, bei jų sąveika su bangomis. Taip pat tapo įmanoma apskaičiuoti jėgas, veikiančias laivo korpusą, tokias kaip trintis, šoninė jėga ir kt. Šiuo metu SSD svarba tapo lygiavertė tiek grynai teoriniui, tiek ir eksperimentiniui hidrodinamikos problemų nagrinėjimui ir puikiai juos papildo. SSD svarba pasidaro akivaizdi atsižvelgus į vis augančią eksperimentinių tyrimų kainą palyginus su vis pingančia kompiuterine technika [5].

SSD tapo itin svarbi tiriant vandens sąveiką su laivo korpusu ir dėl to atsirandantį pasipriešinimą. Paprastai, neklampios tėkmės laisvo paviršiaus modeliai, kurie remiasi paviršiaus elementų metodais, naudojami laivapriekio analizei, o ypač laivapriekinio gumbo ir forštevenio sąveikos tyrimams. Klampų skystį modeliuojantys skaičiavimo kodai dažnai neįskaito bangavimo reiškinių, o didžiausias dėmesys yra skiriamas laivo išsikišančioms dalims [5].

Galios taikymams SSD metodas kartais vis dar laikomas šiek tiek nepatikimas, bet detalai nagrinėjant vietines tėkmės ypatybes, optimizuojant laivo projektą, arba atrenkant geriausius projektus testams su modeliais, ši metodika tapo nebepakeičiama.

Apibendrinus galima teigti, kad pagrindiniai būdai hidrodinaminiam korpuso ir jo dalių įvertinimui yra [14]:

Rankine panel metodai (*nelinijiniai bangų pasipriešinimo kodai angl. fully non-linear wave resistance codes*). Šio metodo privalumai ir trūkumai [14]:

+ Metodas apima bendrą bangų modelį ir daugeliu atveju nustato dinaminį diferentą ir nugrimzdimą (*angl. Sinkage*) gana tiksliai.

+ Skaičiavimo modelis veikia labai greitai. Tinklelio sudarymas ir skaičiavimai yra visiškai automatizuoti, o skaičiavimo laikas gali būti trumpesnis nei minutė nagrinėjant vieną greičio ir geometrijos atvejį įprastu kompiuteriu.

- Skaičiavimo modelis negali tirti lūžtančių bangų, bei gliseruojančius laivus. Tai atvejai su laivapriekiniu gumbu, panirusio trancinio laivagalio sukelti sudėtingi sūkuriai.

- Klampumo sukelti reiškiniai ir poveikis negali būti modeliuojami teisingai.

Laisvojo paviršiaus *RANSE* (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations*) metodai. Privalumai ir trūkumai yra tokie [14]:

+ Skaičiavimo metodas apima bendrą ir vietinį bangų modelį, įskaitant sudėtingas lūžtančias bangas.

+ Galima tirti klampumo reiškinius realiu masteliu.

- Labai ilgas skaičiavimo laikas.

- Skaičiavimų kokybė ir tikslumas smarkiai skiriasi priklausomai nuo SSD programų. Plačiąjai visuomenei sudėtinga įvertinti kurios SSD programos yra tikslesnės, bei kokybiškesnės.

Laisvojo paviršiaus *RANSE* metodai yra plačiai naudojami projektuojant ir optimizuojant eigumą gerinančius įtaisus, laivagalius ir kitas konstrukcijas bei reiškinius, kuriuose pasireiškia klampumo reiškiniai. Šis metodas reikalauja daug kompiuterinių išteklių ir protingos optimizavimo strategijos.

Modeliniai bandymai baseinuose. Privalumai ir trūkumai [14]:

+ Plačiai žinomas ir naudojamas industrijoje, tapo standartu nustatant laivo eigumą.

+ Egzistuoja industriniai standartai daugumai procedūrų, kuriuos nustato *ITTC* (*International Towing Tank Conference*), kaip tarptautinė ekspertų įstaiga. Be to didesni bandymų baseinai siūlo kokybiškas paslaugas.

- Pasireiškia mastelinis efektas.

- Bandymai yra brangūs ir užimantys daug laiko.

- Lygiagretūs procesai neįmanomi.

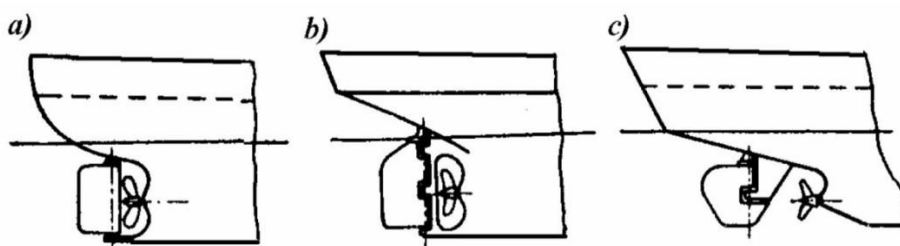
Matome, jog mūsų atveju labiausiai tinkamas ir prieinamas metodas yra *RANSE* (SSD), kadangi reikalinga nustatyti laivagalyje susidariusius srauto sūkurius ir turbulentinį tekėjimą.

IV. LAIVAGALIS

Laivagalis yra laivo korpuso vieta, ties kuria užsibaigia laivo korpusas. Dažniausiai ši sąvoka apima ne tik vietą (plokštumą) kuri užbaigia korpusą, bet visą laivo korpuso konstrukciją tame rajone. Laivagalis yra viena iš sudėtingiausių laivo korpuso konstrukcijos vietų, kadangi įprastai jame įtaisyti laivo varytuvai ir vairo plunksna, todėl laivagalio forma pasidaro geometriškai sudėtingesnė. Laivagalis turi pasižymėti geromis hidrodinaminėmis savybėmis ir užtikrinti efektyvų varytuvų ir vairavimo įrangos (vairo plunksnos) darbą, tačiau kartu turi būti pakankamai tvirtos konstrukcijos dėl sudėtingos ir agresyvios darbo aplinkos.

4.1 Laivagalio konstrukcijos ir formos

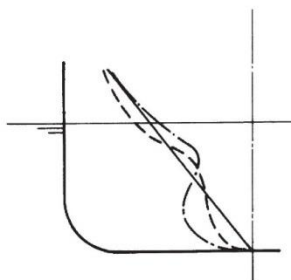
Yra keletas pagrindinių laivagalio formų, tai kreiserinis, tradicinis su nuosvyra ir trancinis.



12 pav. Laivagalio formos: a) kreiserinis, b) tradicinis su nuosvyra, c) trancinis

Kiekviena iš jų pasižymi skirtingomis hidrodinaminėmis savybėmis, todėl tinkama vienokiu ar kitokiu atveju. Kartais pasitaiko hibridinių laivagalių, kurie turi dviejų ar daugiau laivagalio tipo požymių. Tokio laivagalio konstrukcija gali būti sudėtingesnė, tačiau galima į vieną laivagalio konstrukciją apjungti dviejų ar daugiau laivagalio formų privalumus. Kreiseriniai ir prekybiniai laivagaliai pasižymi tokiais laivagalio apvadų profiliais:

1. V formos.
2. U formos.
3. Su laivagaliniu gumbu (*angl. bulbous stern*).

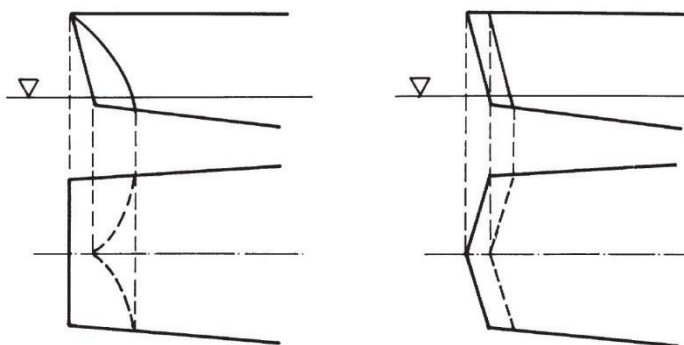


13 pav. Laivagalio španhautų (korpuso apvadų) formos [27]

Viensraigčiuose laivuose kiekviena laivagalio korpuso forma skirtingai įtakoja pasipriešinimą ir varytuvo naudingumą. V formos laivagalis turi mažiausią pasipriešinimą nepriklausomai nuo Frūdo skaičiaus. U formos laivagalis turi didesnę pasipriešinimą, o laivagalis su laivagaliniu gumbu sukulia didžiausią pasipriešinimą. Gerai suprojektuoti laivagaliniai gumbai sukulia tokį patį pasipriešinimą kaip U formos laivagalis. Kitavertus V formos laivagalis turi labiausiai netolygų srauto pasiskirstymą (*angl. wake distribution*), o laivagalis su gumbu, labiausiai tolygų, o taip pat didžiausią propulsinį naudingumą ir mažiausią sukeliama sraigto vibracijos kiekį. Tai gali sumažinti reikalingą galią keliais procentais, bet tokio korpuso konstrukcija yra sudėtingesnė [27].

Mažesnis laivo korpuso pasipriešinimas nereiškia didesnio laivo greičio, kadangi varytuvo propulsinis naudingumas gali būti sumažėjęs. Laivagalis su „bulba“ pasižymi geresniu srautu ir mažesnėmis varytuvo sukeliama vibracijomis. Padidėjęs varytuvo naudingumas gali būti kompensuojamas padidėjusiu laivo korpuso pasipriešinimu, todėl priklausomai nuo gumbinio laivagalio konstrukcijos, jis gali reikalauti daugiau arba mažiau galios palyginus su U formos laivagaliais.

Trancinis laivagalis, galima sakyti, išsivystė iš kreiserinio laivagalio „nukirtus“ didžiąją jo dalį. Trancas prasideda maždaug vaterlinijos lygyje. Ši laivagalio forma atsirado norint supaprastinti laivagalio konstrukciją. Greiteigiuose laivuose toks laivagalis turi sumažinti pasipriešinimą. Egzistuoja ir modifikuotos (iškreiptos) trancinio laivagalio formos (14 Pav.). Tokia konstrukcija geriau nukreipia vandens srautą esant atbulinei eigai, todėl išvengiama denio užpylimas.

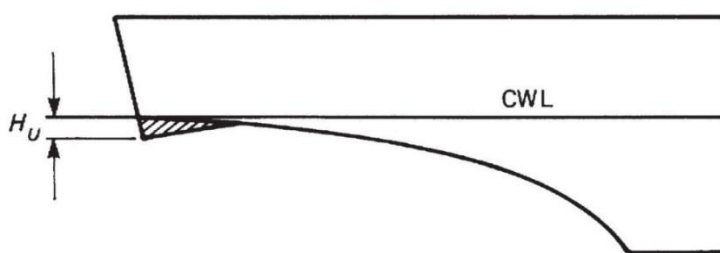


14 pav. Lenktas ir laužtas trancinis paviršius [27]

Reikalinga galia sumažėja, palyginus su kreiseriniu laivagaliu, didėjant Frūdo skaičiui. Apytiksliai 10% esant $F_r=0,5$. Šis reikalingos galios sumažėjimas yra labiau dėl sumažėjusio korpuso pasipriešinimo nei padidėjusio propulsinio naudingumo.

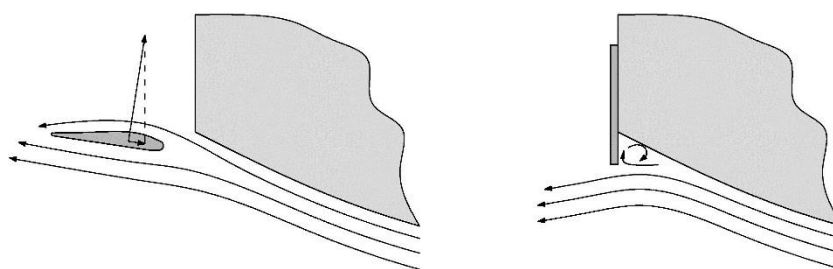
Diferentas gali būti gan efektyviai kontroliuojamas/įtakojeamas naudojant laivagalinius pleištus (*angl. Stern wedges*). Šie konstrukciniai elementai nukreipia srautą į apačią tam tikru kampu, bei sumažina laivagalinę bangą. Laivagaliniai pleištai gali būti vientisa laivagalio

konstrukcijos dalis. Tokiu atveju pailgėja ir labiau panyra trancinis paviršius, o tai gali turėti neigiamos įtakos laivo supimuisi (jūrinėms savybėms).



15 pav. Laivagalis su kreipiančiuoju pleištu [27]

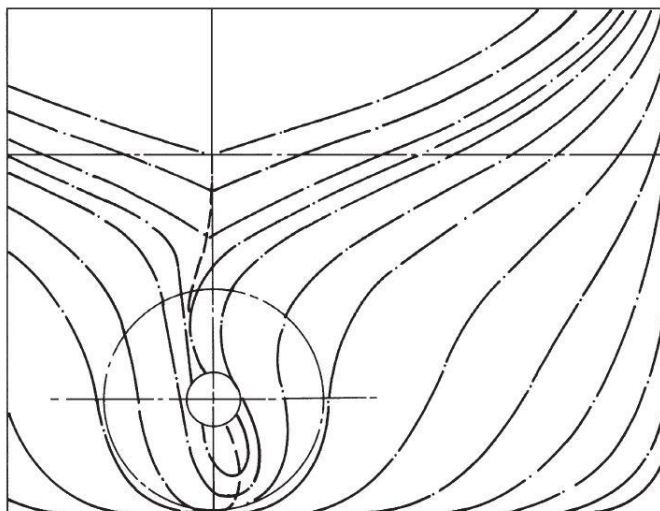
Laivagalio korpuso sparnas (*Angl. Hull vane*) atlieka keletą funkcijų. Visų pirma tam tikromis sąlygomis jis atgauna dalį išekvotos energijos, kadangi keliamoji jėga turi į priekį nukreiptą komponentę. Norint, kad ši susidariusi jėga duotų teigiamą efektą, ji turėtų būti didesnė nei sparno sukiamas pasipriešinimas. Taip pat tokia konstrukcija turi įtakos supimuisi ir diferento susidarymui, o tranciniame laivagalyje pagerina srauto atsiskyrimą. Glisuojuantiems laivams sparnai nėra tinkami, kadangi sukelia pernelyg didelę keliamąją jėgą. Esant greičiui lygiui nuo 0,2 iki 0,7 Frūdo skaičiui, galima pasiekti nuo 5 iki 15% mažesnes kuro sąnaudas [36]. Kitas įtaisas galintis pakoreguoti diferentą ir pagerinti srauto atsiskyrimą yra paprasčiausia plokštė vertikaliai išsikišusi po laivagaliu (16 pav.). Toks įtaisas sudaro virtualaus kreipiančiojo pleišto efektą. Atsikišusi plokštės dalis sukuria pasyvaus vandens zona priekyje. Tokiu atveju šalia esantis srautas, tekantis į šią zoną yra nukreipiamas žemyn. Plokštės padėtis gali būti keičiama priklausomai nuo plaukiojimo greičio ir sąlygų, tokiu būdu kontroliuojant diferentą, srauto atsiskyrimą ir laivagalinę bangą. Taip pat toks įtaisas yra gana paprastas ir nebrangus, be to sukelia mažesnę pasipriešinimą esant tai pačiai keliamajai jėgai nei kreipiantieji pleištai [23].



16 pav. Laivagalio sparnas ir srauto atkirtimo įtaisas [atkurta iš 23,36]

Laivo konstrukcija (laivagalis) gali būti asimetrinė. Tokia konstrukcija sumažina laivo žiaunos sukurius laivo korpuso šone V formos apvadų laivuose. Vietinis srauto atsiskyrimas korpuso šone yra sumažinamas, kartu sumažėja ir pasipriešinimas. Be to priešingas srauto “užsukimas“ sraigto sukimosi krypties atžvilgiu, padidina varytuvo naudingumą. Modelio bandymai

parodė, kad reikalingą galią galima sumažinti apie 5-10% pilnų apvadų (aukšto pilnumo koeficiento) laivuose [27].



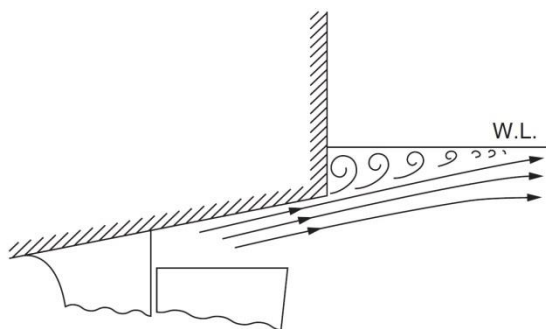
17 pav. Asimetrinis laivagalis [27]

Svarbus laivo korpuso elementas yra laivo skegas. Dažniausiai skegas yra su sraigto veleno linija. Tokio skego paskirtis „laikyti veleną“ bei apsaugoti jį nuo pažeidimų. Taip pat skegas padeda užtikrinti sklandų vandens srautą aptekėjusį aplink korpusą ir pasiekiantį sraigą. Deja praktikoje tai vyksta nevisada, kadangi besisukančio sraigto ir skego sąveika gali sukelti dideles vibracijas [29].

Kurso išlaikymas laivuose su azimutiniais varytuvais yra prastesnis nei įprastuose laivuose. To priežastis dažniausiai yra kitokia laivo korpuso forma laivagalyje, kadangi ji yra plokščia tam, kad galėtų būti įmontuoti azimutiniai varytuvai. Laivuose su azimutiniais varytuvais kurso pastovumo išlaikymas gan stipriai priklauso nuo tinkamai suprojektuotų sparnų (skego) laivagalyje. Be jų kurso išlaikymas taptų nepakankamas [16].

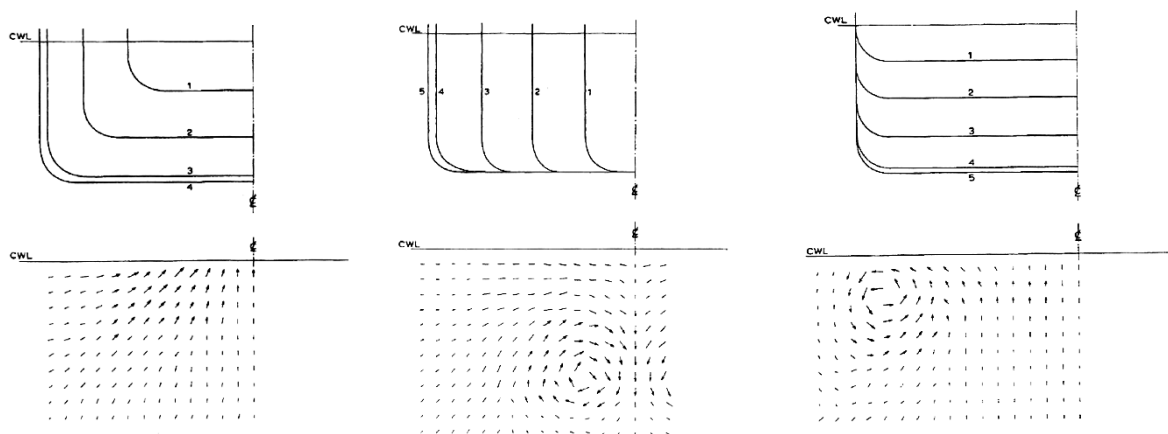
4.2 Srautas laivagalyje

Reikėtų atskirti „sauso“ ir „šlapio“ srauto tranciniame laivagalyje sąvokas. Esant sausam srauto režimui vandens paviršius daugiau ar mažiau palieka tranco paviršių švelniai. Tokiai sąlygai reikalinga, jog slėgis laivagalyje būtų lygus aplinkos (oro) slėgiui. Jei srautas neatsiskirtų nuo laivagalio, tada slėgis daugeliu atveju būtų didesnis nei aplinkos. Tranco srautas turi būti toks, kad panaikintų slėgių skirtumus. Tai reiškia, jog srautas kils į viršų, panaikindamas slėgių skirtumą, tačiau susidarys laivagalinė banga. Didėjant tranco panirimui, didėja ir reikalingas slėgis srauto atsiskyrimui, atitinkamai didėja ir laivagalinė banga [31].



18 pav. Srautas aptekantis panirusį trancinį laivagalį [19]

Esant mažam greičiui neįmanoma pasiekti “sausajo” tranco būsenos. Kai trancas paniręs daugiau, o greitis nedidelis, susidaro recirkuliacijos sritis už tranco. Momentu, kai režimas pereina iš “šlapiojo” į “sausąjį”, susidaro labai nestabilus srautas [20 iš analizės].

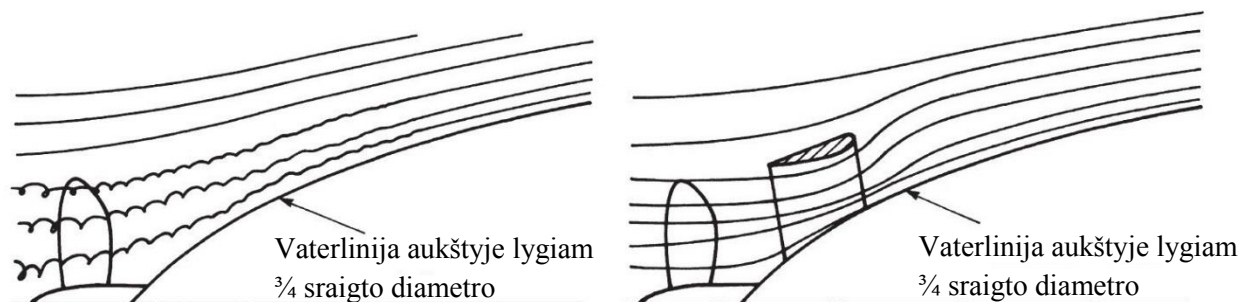


19 pav. Srautas laivagalyje priklausomai nuo laivagalio formos [38]

Kiekviena apvadų forma veikia srautą kitaip. 19 pav. Pavaizduota apvadų įtaka srauto pasiskirstymui laivagalyje. Kai U formos apvadai siaurėja link DP (vidurinisys paveiksliukas) pasienio sluoksnyje srautas teka iš laivo apačios į laivo šoną. Šis srauto susikirtimas sukelia laivo korpuso žiaunos sūkurius, kurie sukasi pagal laikrodžio rodyklę. Kai U formos laivagalys (paveiksliukas dešinėje) siaurėja link vaterlinijos, srauto greitis už pasienio sluoksniu ribų yra didesnis laivo apačioje nei šoninėje dalyje. Atitinkamai slėgis apačioje yra mažesnis nei šonuose. Pasienio sluoksnyje skystis teka iš laivo šonų į laivo apačią. Susikertantys rautai sudaro sūkurius tekančius priešinga laikrodžio rodyklės judėjimo kryptimi. Kai U formos apvadai siaurėja įstrižai, link vaterlinijos ir DP susikirtimo vietos, sūkoriai ir neigiamas srauto atsiskyrimas nepasireiškia. Tokia korpuso laivagalio forma pasižymi mažesniu klampumo pasipreišinimo nei dvi ankstesnės.

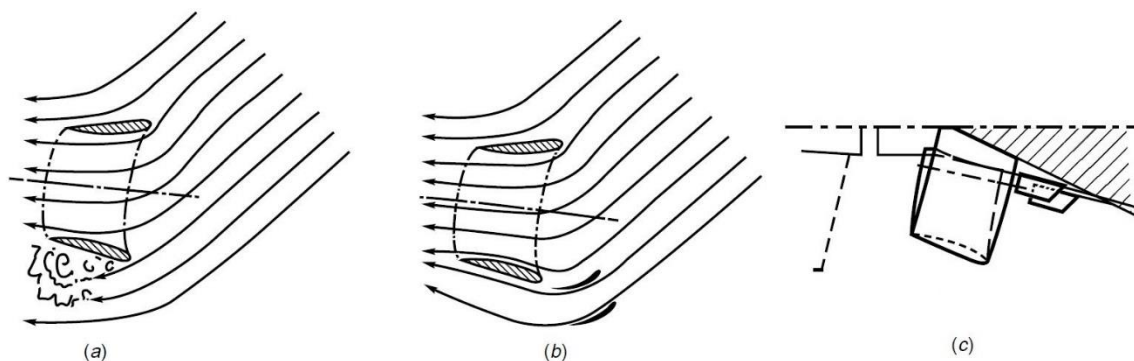
Išsiskaidymas (atsiskyrimas) laivagalyje yra laivo formos ir sraigto įtakos funkcija. Siurbimo efektas esant vienam sraigtui priverčia srautą susilieti (*angl. converge*). Tai sumažina arba net sustabdo srauto atsiskyrimą. Esant dviem sraigtais atsiskyrimas labiau tikėtinas. Srauto atsiskyrimą įtakoja išorinis korpuso kreivių spindulys srauto tekėjimo kryptimi ir srauto nuolydis

laivo judėjimo krypties atžvilgiu [27]. Toks srauto atsiskyrimas pavaizduotas 20 pav. Tam, kad sumažinti šį srauto atsiskyrimą gali būti naudojamos srautą lyginančios movos (20 pav.). Jos sudaro fizinį barjerą, ir išlaiko srauto tekės kryptį šalia laivo korpuso, neleidamos srautui atitrūkti.



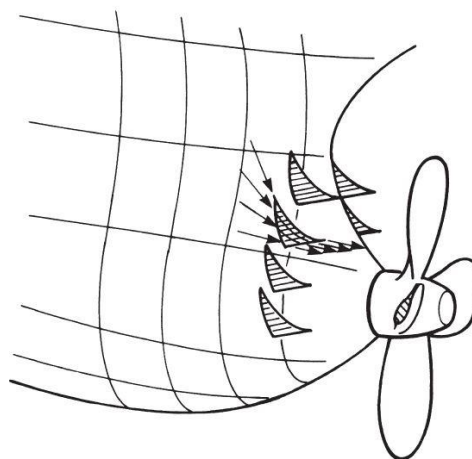
20 pav. Srauto atsiskyrimas be movos ir srautas su mova [27]

Dažnai srautas gali atitrūkti nuo pačių movų, ypač tada, kai movos padėtis yra tam tikru kampu srauto atžvilgiu. Tokiu atveju mova gali turėti neigiamą efektą laivo eigumui. Tam, kad nesusidarytų srauto sūkuriai už movos, gali būti naudojami srauto kreipiantys sparnai. Šie sparnai užlenkia srautą taip, kad srautas pamažu pakeistų savo tekėjimo kryptį, todėl išvengiama staigus srauto krypties pakeitimas ir sūkurių susidarymas. Šis srauto išlyginimo metodas gali būti taikomas ir kitais atvejais.



21 pav. Srauto ir movos sąveika [27]

Skersiniai, susipinatys srautai (*angl. cross flows*) dažnai atsiranda laivagalio zonoje netoli sraigto veikimo zonos. Šie srautai stipresni arčiau laivo korpuso, tačiau tolstant nuo jo juntami mažiau ir yra maždaug tokio pat storio kaip pasienio sluoksnis. Dažniausiai jie pasireiškia laivuose su laivagaliniu gumbu, aukštu B/T (pločio ir grimzlės) santykiu, aukštu pilnumo koeficientu ir žemu greičiu. Toks srautas patekęs į sraigto veikimo zoną sumažina varytuvo naudingumą. Tam, kad išlyginti srautą naudojami jį nukreipiantys sparnai (22 Pav.) abiejose korpuso pusėse, kurie ištiesina srautą. Projektuojant sparnus reikia žinoti srauto kryptį, kadangi nuo to priklauso sparnų padėtis. Sparnai yra cilindro profilio, todėl pamažu lenkiasi ir tiesina srautą. Šia konstrukcija galima pasiekti reikalingos galios sumažėjimą iki 9% [27].



22 pav. Srautą kreipiantys sparnai [27]

Apibendrinus, galime teigti, kad svarbiausia sklandus ir švelnus srautas. Korpusas turi būti suprojektuotas taip, kad srautas aptekėtų korpusą su kuo mažiau „sudirginimu“ ir srauto susikirtimų. Srautas turėtų sekti korpuso kreivėmis ir sklandžiai atsiskirti aptekėjęs korpusą. Staigus korpuso formos kitimas srauto tekės atžvilgiu ir tarpusavyje besikertantys srautai yra nepageidaujami reiškiniai.

4.3 Laivagalio konstrukcijos rekomendacijos

Siekiant suprojektuoti optimalų laivagalį turėtų būti atkreipiamas dėmesys į šiuos aspektus [27]:

1. Minimalus srauto atsiskyrimas.
2. Minimalus sraigto siurbimo (*angl. suction effect*) efektas.
3. Pakankamas sraigto klirensas (tarpas).

Tinkamai atsižvelgiant į šiuos aspektus gaunamas mažesnis pasipriešinimas, aukštesnis propulsinis naudingumas dėl tolygesnio srauto patenkančio į sraigą ir mažesnės vibracijos. Rekomendacijos trancinio laivagalio konstrukcijai atsižvelgiant į Frūdo skaičių [27]:

$F_r < 0,3$ Laivagalis virš vaterlinijos. Eigis metu dalis laivagalio panyra.

$F_r \approx 0,3$ Mažas laivagalis, šiek tiek žemiau vaterlinijos.

$F_r \approx 0,5$ Daugiau paniręs laivagalis su vidutiniu pleištu. Panirimo gylis $t=10-15\%T$ (čia T – bendra grimzlė).

$F_r > 0,5$ Giliau paniręs laivagalis su pleištu maždaug per visą laivo plotį. Panirimas $t=15-20\%T$.

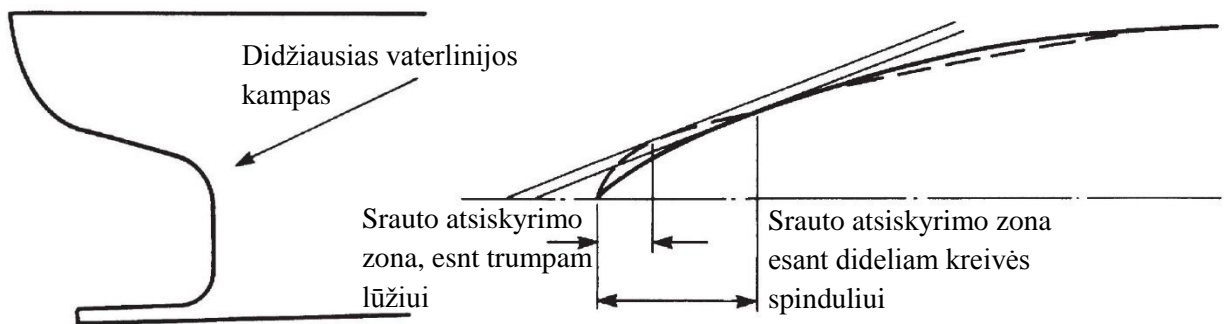
Giliai panirusio kvadratinio (kampuoto) laivagalio atveju turėtų būti atsižvelgta į šiuos aspektus [27]:

1. Briaunos ir kraštai turi būti aštrūs. Srautas turi atsiskirti „švariai“.

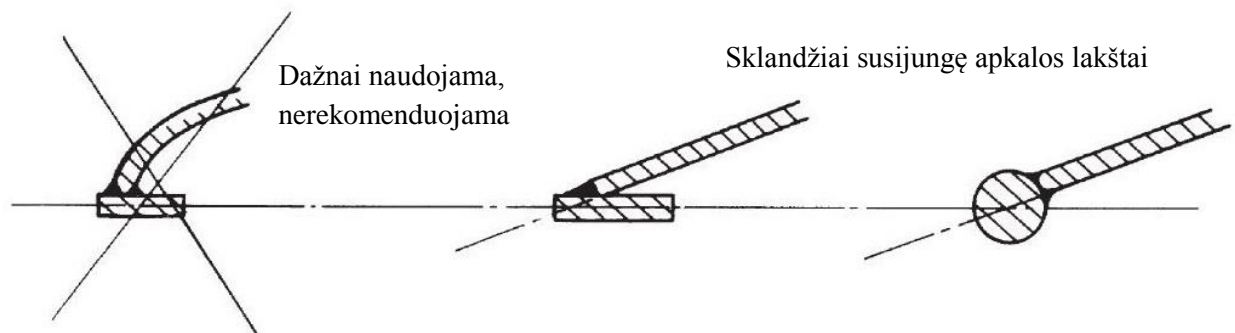
2. Stabilumas (*stability*) o ne plotis turėtų būti išlaikytas pastovus optimizuojant laivagalį. Deja praktikoje taip nėra. Laivas gali būti daromas siauresnis su tranciniu laivagaliu, nei be jo.
3. Laivagalis, o tiksliau panirusi jo dalis turi įtakos laivo propulsiniam naudingumui. Tarp sraigto ir korpuso (esančio virš sraigto) yra mažiau turbulencijos.
4. Slemingas susidaro retai. Eigoje srautas seka laivo korpuso forma.
5. Esant lėtai eigai, susidaro stiprūs sūkuriai už trancinio paviršiaus, jis tampa „šlapias“. Pasipriešinimas tokiu atveju yra žymiai didesnis už tokio pačio laivo su kreiseriniu laivagaliu.
6. Laivo kilinio supimosi centras yra apytiksliai $\frac{1}{4}$ laivo ilgio nuo laivagalio, skirtingai nei $\frac{1}{3}$ normaliuose laivuose. Laivapreikinė dalis labiau užpilama esant audringai ir banguotai jūrai.
7. Denis laivagalyje (su trancu) gali nesunkiai sušlapti ir būti užpilamas esant atbulinei eigai arba audringai jūrai. Vanduo „užtvenkiamas į viršų“. Tokiu atveju geriau naudoti lenktas arba laužtas trancines konstrukcijas (14 pav.).

Siekiant išvengti srauto atsiskyrimo ir sūkurių laivagalyje bei pagerinti sraigto darbą reikia atsižvelgti į tokias rekomendacijas [27]:

- Norint išvengti srauto atsisiskyrimo reikėtų vengti aštrių laivo korpuso formų laivagalyje ir kritinių srauto kampų laivo judėjimo krypties atžvilgiu. Jei srautas teka vaterlinijos kryptimi, o ne batoksu, priiimtinesnis yra įstrižas kampas o ne srauto tekėjimo kryptis.
- Kritiniai kampai tarp vaterlinijos ir išilginės ašies kreiseriniams ir panašioms laivams yra $iR=20^\circ$ pasak Baker – viršijus šią reikšmę srauto atsiskyrimas yra praktiškai neišvengiamas. $iR=15^\circ$ pasak Kempf – atsiskyrimo pradžia.
- Laivagalio vaterlinijos virš sraigto turėtų būti tiesios, reikia vengti įdubimų, siekiant išlaikyti vaterlinijos kampa kuo mažesnę. Ten kur to pasiekti neįmanoma, labiau priimtinas variantas yra “laužti” vaterliniją dideliu kampu trumpoje atkarpoje, nei nežymiai viršytį leistiną kampa ilgoje atkarpoje. Tai sumažina neišvengiamą srauto atsiskyrimo zoną (23 pav.)
- Vaterlinijos pabaiga turi būti kuo aštresnė (24 pav.). Išorinė apkala turėtų eiti tiesiai, arba bent jau nežymiai lenkta į laivagalį. Tai pasižymi mažesne reikalinga galia dėl sumažėjusio pasipriešinimo ir tylesniu sraigto darbu.



23 pav. Didžiausias vaterlinijos kampas (kairėje) ir srauto atsiskyrimo zona laivagalio vaterlinijose virš sraigto [27]



24 pav. Abiejų apkalos pusių susijungimas laivagalyje [27]

Svarbu žinoti, kokią laivagalio formą pasirinkti vienu ar kitu atveju. Keičiantis ir sudetingėjant korpuso formoms reikalavimai ir rekomendacijos gali kisti, tačiau principai išlieka tie patys, tačiau nevisada verta akiai pasikliauti rekomendacijomis, ypač kai laivagalio forma ir srauto sąlygos jame yra abejotinos. Tokiu atveju verta iširti laivagalio formos tinkamumą SSD arba eksperimentiniais (modelio bandymų) tyrimais.

V. SKAIČIUOJAMOJI SKYSČIŲ DINAMIKA

Įprastai neklampaus skysčio su laisvuju paviršiu metodai naudojami tirti laivapriekį, ypač korpuso su laivapriekiniu gumbu. Klampų skystį modeliuojantys metodai dažniau taikomi laivagalio ir išsikišusių dalių ar elementų tyrimui. SSD tinka vietinėms srauto savybėms tirti ir nustatyti tam tikrus konstrukcijos elementų trūkumus. SSD taip pat gali padėti sumažinti dėl mastelinio efekto gautus netikslumus [6]. SSD tyrimų darbo eiliškumą galima suskirstyti taip [6]:

- **Sąlygų sudarymas** (tinklelio ir tyrimo modelio sudarymas). SSD eksperimentą (sąlygas) turi sudaryti kvalifikuotas SSD specialistas. Dažniausiai didžiausią laiko dalį užima tinklelio sudarymas. Automatinis tinklelio generavimas laivų tyrimams nėra labai plačiai paplitęs.
- **Skaičiavimas**. Skaičiavimui praktiškai nereikia žmogaus darbo valandų (laiko). Neklampūs skysčiai gali būti nesunkiai skaičiuojami Asmeniniuose Kompiuteriuose, tačiau klampiems skysčiams skaičiuoti, rekomenduojama naudoti galingus kompiuterius arba kompiuterius sujungtus į skaičiavimo tinklą. SSD skaičiavimo kaina dažniausiai sudaro tik apie 1% visos kainos. Taip pat dažnai nėra atsižvelgiama į SSD komp. Programos licenzijos kainą.
- **Duomenų apdorojimas** (grafinis duomenų atvaizdavimas, dokumentacija ir ataskaitos). Grafinis duomenų atvaizdavimas reikalauja galingo kompiuterio. Duomenų apdorojimas užima tam tikrą laiko dalį (įprastai apie 10-20% viso laiko), tačiau gali būti atliekamas mažiau kvalifikuotų specialistų. Dažnai duomenų apdorojimo sudėtingumas priklauso nuo SSD programos naudojimo paprastumo. Teisingas duomenų interpretavimas reikalauja aukštos kvalifikacijos ir yra ilgas procesas.

Krašto 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 [19]. *Laplace* lygtys ir sąlyga, kad toli esantis laivas nesudrums srauto užpildomos automatiškai [19]. *BEM* yra vienas iš pagrindinių naudojamų SSD metodų laivų statybos ir projektavimo industrijoje [19] nepaisant esančių klambaus skysčio modeliavimo metodų. *BEM* dažniausiai naudojamas bangoms ir laisvajam paviršiui tirti. Bangų pasipreišinimo atveju priimamoms tokios sąlygos [19]:

- Vanduo (skystis) nespūdus, nesisukantis ir neklampus.
- Paviršiaus įtempimai yra nereikšmingi.
- Nėra lūžtančių bangų.
- Korpusas yra be lūžių (*angl. knuckles*), kertančių tekniškos kryptį.
- Išsikišančios dalys ir sraigtas nėra modeliuojami (tiriami).

Problemos (eksperimento) sprendimui reikalingi ir tam tikri skysčio lauko krašto ribų nustatymai. Šie nustatymai ir sąlygos detaliau apžvelgti [19].

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

Baigtinių skirtumų metodai (*FDM angl. Finite difference methods*). *FDM* kaip ir *FEM* metodas apima visą skysčio lauką. Baigtinių skirtumų metodas pagrįstas aproksimacija, t.y. dalinių išvestinių lygčių pakeitimu dalinių skirtumų lygtimis. Ši baigtinių skirtumų aproksimacija yra algebrinės formos ir ieškomo kintamojo vertė sprendimo nustatoma iš greta esančių mazgų verčių [17].

Baigtinių tūrių metodai (*FVM angl. Finite volume methods*). Baigtinių tūrių metodas yra universalus baigtinių skirtumų schemų sudarymo metodas. Jis taikomas ir tada, kai diferencialinio uždavinio koeficientai turi trūkio taškų, taip pat kai tinklo žingsnis nėra pastovus arba uždavinys suformuluotas sferinių ir cilindrinų koordinatų sistemose [22]. Dauguma komercinių *RANSE* lygtimis paremtų programų yra paremtos *FVM*.

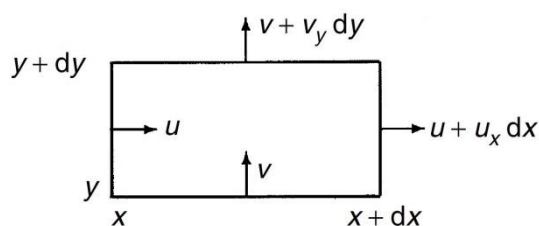
FEM, *FDM* ir *FVM* yra vadinai “lauko metodais“ (*angl. Field methods*), nes jie apima visą skysčio lauką (tūrį), skirtingai nei *BEM* kuris apima tik krašto ribas (pvz tik laisvąjį paviršių). *RANSE* plačiai naudojamas tiriant srautą laivagalyje, bei aplink išsikišančias dalis.

5.1 Pagrindinės SSD lygtys

Greičiuose, pasireiškiančiuose laivo sraute, vanduo gali būti priimamas kaip nespūdas, t.y. jo tankis ρ yra pastovus. Šiuo atveju apsiribosime nespūdžiais skysčiais. Visos lygtys pateikiamos stačiakampėje koordinatų sistemoje, kurioje z ašis nukreipta žemyn. Lygtys nenumeruojamos, kadangi jos baigiamajame darbe tiesiogiai nebus naudojamos.

Tęstinumo lygtis (*angl. continuity equation*) teigia, kad bet koks kiekis įtekėjęs į tūrio elementą (*angl. control volume*) taip pat išteka iš jo tuo pačiu metu. Tarkim dvimatėje erdvėje be galo mažas tūrinis elementas (kaip parodyta žemiau esančiame 25 paveiksliuke) turi u ir v greičio komponentes atitinkamai x ir y kryptimis. Indeksai žymi dalines išvestines pvz. $u_x = \partial u / \partial x$. Teigiamas masės kiekis išteka iš elemento, neigiamas įteka. Bendras masės srautas turi atitikti [6]:

$$\begin{aligned} -\rho dyu + \rho dy(u + u_x dx) - \rho dxv + \rho dx(v + v_y dy) &= 0 \\ u_x + v_y &= 0 \end{aligned}$$



25 pav. Tūrio elementas iš tęstinumo lygties dvimatėje sistemoje [6]

Tęstinumo lygtis trimatėje erdvėje gaunama atitinkamai [6]:

$$u_x + v_y + w_z = 0$$

čia w - greičio komponentė z kryptimi.

Navier Stokes (Navjė-Stokso) lygtys, kartu su tęstinumo lygtimis pakankamos apibūdinti visus realaus srauto aplink laivą fizikinius reiškinius. *Navier-Stokes* lygtys aprašo inercijos tvermę sraute [6]:

$$\rho(u_t + uu_x + vu_y + wu_z) = \rho f_1 - p_x + \mu(u_{xx} + u_{yy} + u_{zz})$$

$$\rho(v_t + uv_x + vv_y + wv_z) = \rho f_2 - p_y + \mu(v_{xx} + v_{yy} + v_{zz})$$

$$\rho(w_t + uw_x + vw_y + ww_z) = \rho f_3 - p_z + \mu(w_{xx} + w_{yy} + w_{zz})$$

čia f_i – pagreitis dėl tūrinės jėgos;

p – slėgis;

μ - klampumas;

t – laikas.

Dažnai tūrinės jėgos yra nepaisomos, tačiau trauka gali būti įtraukiama nustatant $f_3 = g$ ($g=9,81$ m/s²) arba sraigto veikimas gali būti modeliuojamas tūriniu jėgų pasiskirstymu f_1 .

$$\rho(u_t + uu_x + vu_y + wu_z) = \rho f_1 - p_x + \mu(u_{xx} + u_{yy} + u_{zz}) - \rho((\overline{u'u'})_x + (\overline{u'v'})_y + (\overline{u'w'})_z)$$

$$\rho(v_t + uv_x + vv_y + wv_z) = \rho f_2 - p_y + \mu(v_{xx} + v_{yy} + v_{zz}) - \rho((\overline{v'u'})_x + (\overline{v'v'})_y + (\overline{v'w'})_z)$$

$$\rho(w_t + uw_x + vw_y + ww_z) = \rho f_3 - p_z + \mu(w_{xx} + w_{yy} + w_{zz}) - \rho((\overline{w'u'})_x + (\overline{w'v'})_y + (\overline{w'w'})_z)$$

$$-\rho\overline{u'u'} - \rho\overline{u'v'} - \rho\overline{u'w'}$$

$$-\rho\overline{v'u'} - \rho\overline{v'v'} - \rho\overline{v'w'}$$

$$-\rho\overline{w'u'} - \rho\overline{w'v'} - \rho\overline{w'w'}$$

Laiko suapvalinimas vidurkiu eliminuoja visus turbulencinius svyravimus išskyrus Reinoldso įtempimus. *RANSE* (*Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations*) metodas reikalauja turbulencinio modelio, kuris sujungia Reinoldso įtempimus/jėgas į vidutinius greičius [6].

Didelio masto sūkurių simuliacijos *LES* (*LES angl. Large eddy simulations*) yra tarp *Navier Stroke* lygčių ir tarp *RANSE*. *LES* leidžia tinkleliui išspręsti didelius sūkurius turbulencijoje tiesiogiai ir modeliuoja tik mažesnes turbulencines struktūras. Priklausomai nuo to kokio detalumo

(smulkumo) minėtieji turbulentiniai sūkuriai, šis metodas krypsta arčiau *RANSE* arba *Navier-Stokes* metodo. Kol kas tik keletas tyrimų atlikta siekiant ištirti laivo sukeltus srautus *LES* metodu, tačiau tinklesis dažniausiai būna pernelyg grubus palyginus su *RANSE* sprendimais.

Neatsižvelgus į klampumą ir kartu į turbulencinius reiškinius, *Navier-Stokes* lygtys (taip pat *RANSE*) tampa Eulerio lygtimis, kurios vis dar turi būti išspręstos drauge su tęstinumo lygtimis [6]:

$$\begin{aligned}\rho(u_t + uu_x + vu_y + wu_z) &= \rho f_1 - p_x \\ \rho(v_t + uv_x + vv_y + wv_z) &= \rho f_2 - p_y \\ \rho(w_t + uw_x + vw_y + ww_z) &= \rho f_3 - p_z\end{aligned}$$

Eulerio metodas leidžia naudoti grubesnius tinklelius ir yra patvaresnis nei *RANSE* metodas. Šie metodai tinkami spręsti srautus aplink keliamąją jėga sukeltus paviršius (sparnus), todėl yra populiarūs aviacijos srityje. Deja šis metodas netinkamas srautams aplink laivą tirti, kadangi jis pasižymi *RANSE* ir *Laplace* metodų trūkumais.

Tolesnis supaprastinimas yra prielaida, kad srautai nesisuka (*angl. irrotational*) [6]:

$$\nabla \times \vec{v} = \begin{Bmatrix} \partial/\partial x \\ \partial/\partial y \\ \partial/\partial z \end{Bmatrix} \times \vec{v} = 0$$

Srautas (skystis), kuris nesisuka, yra neklampus ir nespūdas yra vadinamas potencialiu (*angl. potential flow*). Potencialiuose srautuose greičio vektorius yra nepriklausomas vienas nuo kito. Jie sujungti į potencialą ϕ . Tada greičio komponentė [6]:

$$\vec{v} = \begin{Bmatrix} u \\ v \\ w \end{Bmatrix} = \nabla \phi$$

Trys nežinomieji (greičio komponentai) yra sumažinami/redukuoti į vieną nežinomąjį. Tai supaprastina skaičiavimą. Tęstinumo lygtis susiprastina iki *Laplace* lygties potenciniams srautams [6]:

$$\Delta \phi = \phi_{xx} + \phi_{yy} + \phi_{zz} = 0$$

Jeigu tūrio jėgos apribojamos traukos jėgomis, Eulerio lygtys gali būti užrašytos [6]:

$$\nabla \left(\phi_t + \frac{1}{2} (\nabla \phi)^2 - gz + \frac{1}{\rho} p \right) = 0$$

Integruojant gauname Bernulio lygtį [6]:

$$\phi_t + \frac{1}{2} (\nabla \phi)^2 - gz + \frac{1}{\rho} p = \text{const.}$$

Laplace lygtys yra pakankamos spręsti nežinomiems greičiams. Jos yra linijinė. Tai suteikia galimybę sujungti elementarius sprendimus į sudėtingesnius. Potencinio srauto kodai (lygtys) vis dar dažnai naudojami SSD skaičiavimuose laivų inžinerijoje.

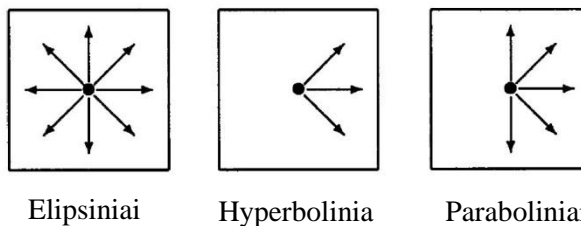
Pasienio sluoksnio lygtys įveda supaprastinimus fiziniame modelyje: difuzija (atsiskyrimas) dominuojančiame sraute yra nepaisoma, pasienio sluoksnio storis yra mažas, o slėgis sluoksnyje yra pastovus. Šios prielaidos yra sulaužomos greta atsiskiriančio pasienio sluoksnio. Todėl atsiskyrimas negali būti numatytas tinkamai, o pats atsiskyrimas įvertintas tinkamai.

Pasienio sluoksnio metodas buvo beveik visiškai pakeistas *RANSE* metodais 1980 metų pabaigoje. Daugelis tyrimų rodė, kad srauto lygtys pasienio sluoksniui laivagalyje buvo netinkamos, dėl šio sluoksnio susiaurėjimo šioje zonoje. Dalis trūkumų buvo pašalinta, todėl *RANSE* lygtys tapo patikimesnės, kartu su augančiais kompiuterių skaičiavimo galingumais.

Pagrindinės lygtys (ir srautai) kartais klasifikuojami kaip elipsiniai, hiperboliniai arba paraboliniai. Tarkime dvimatė antrojo laipsnio diferencialinė lygtis [6]:

$$A \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + 2B \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} + C \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + a \frac{\partial f}{\partial x} + b \frac{\partial f}{\partial y} + cf + d = 0$$

Kai $\delta = AC - B^2 > 0$, tai lygtis yra elipsinė, kai $\delta = 0$, parabolinė, kai $\delta < 0$, hiperbolinė. Pavadinimai kilo iš analogiškų algebros lygčių. Šių matematinių lygčių fizikinė reikšmė pavaizduota 26 pav.



26 pav. Sutrigdymai juda skirtinga linkme priklausomai nuo lauko lygčių [6]

Elipsiniai. Sutrigdymai (*angl. disturbances*) sklinda visomis kryptimis. *RANSE* ir *Laplace* lygtys yra elipsinės.

Hiperboliniai. Sutrigdymai apriboti judėjimu kūginiu (arba dvimatėje erdvėje pleišto forma). Viršgarsiniai srautai su Macho kūgiu “išplaukia“ iš hiperbolinių lygčių.

Paraboliniai. Ekstremalūs hiperboliniai srautai yra paraboliniai srautai. Tokiu atveju kūgio kampas siekia iki 90° . Trikdžiai susidaro tik pasroviui. Paraboliniai *RANSE* metodai suteikia spartesnes skaičiavimo galimybes su mažesniu kiekiu duomenų. Skaičiavimas prasideda srovės tekėjimo pradžioje ir pasroviui tęsiasi iki skysčio tekėjimo pabaigos (ištekėjimo). Tokiu atveju neskaičiuojamas visas skysčio laukas vienu momentu, o tik dvi gretimos skysčio tekėjimo juostos. Deja skystis modeliuojamas tik viena kryptimi, todėl skysčio krypties pakitimas į kitą pusę nėra užfiksuojamas.

5.2 Tinklelio sudarymas

Dauguma SSD skaičiavimo metodikų remiasi į tam tikros erdvės (ploto) suskaidymo į mažesnius elementus/daleles, kuriuose nustatomi vidutiniai srauto kintamieji [10]. Ši suskaidyta 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).
- Turi daleles sugrupuotas į krašto ribą (*angl. Boundary zone*), kurioje nustatoma krašto/pasienio sluoksnio sąlyga (*angl. Boundary condition*) [2].

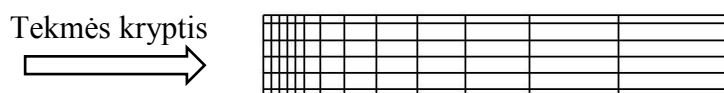
Svarbios tinklelio savybės į kurias reikia atsižvelgti norint gauti tikslius rezultatus:

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

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

- Paprasčiausia trimatė sistema yra stačiakampių sistema apibrėžta plokštumomis lygiagrečiomis X, Y, Z koordinatėms[10].
- Šešiabriauniai elementai (*angl. cell*) duos tikslesnius rezultatus esant tam pačiam elementų skaičiui, ypač jei tinklelio linijos yra išdėstytos atsižvelgiant į srautą [2].
- Tinklelio tankumas turi būti pakankamai didelis, kad užfiksuotų visus reikiamus srauto reiškinius ir savybes [2].
- Daugiau elementų ir detalesnis tinklelis duos 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, keturkambiai, šešiakampiai, ar kiti geometriškai sudėtingesni elementai [2].

- Kraštinių santykis tai santykis tarp ilgiausios ir trumpiausios kraštinės ilgių. 1 santykis idealus lygiakraščiams trikampiams ir kvadratui [2].
- 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.
- Atitinkamui srautui turėtų būti sukurtas atitinkamas tinklelis. Elementų kraštinių santykis turėtų būti artimas vienetui 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 (27 pav.).
- Tam kad dalelių (elementų) kiekis nebūtų perdidelis, o rezultatai būtų pakankamai tikslūs reikia naudoti nevienodą (kintantį) tinklelį, sutelkiant tinklelio elementus tik ten, kur jie reikalingi arba panaudojant preliminarius rezultatus esant grubiam tinkleliui tobulintį tinklelį atsižvelgiant į gautus srauto rezultatus. Hibridinis tinklelis suteikia lanksčiausias galimybes.



27 pav. Teisingas kintančio tinklelio sudarymas srauto tekės kryptimi

5.3 Srauto vizualizavimas

Analizuojant sudėtingų skaičiavimų rezultatus, kompiuterinės vizualizacijos yra neišvengiamos. Žmonės sugeba apdoroti žymiai daugiau informacijos, kai ši informacija yra pateikiama vizualiai, o ne skaitmeniškai [11]. Galima išskirti du pagrindinius vizualizavimo modelius/būdus [11]:

- **Eulerio** (*angl. Eulerian*). Fizikiniai dydžiai yra konkrečioje fiksuotoje padėtyje trimatėje erdvėje. Standartinė Eulerio vizualizacija pateikia statinį viso tyrimo vaizdą. Įprasta Eulerio vizualizacija yra rodyklių (vektorių) laukas, parodantis srauto kryptį rodyklėmis kiekviename tinklelio taške (elemente).
- **Lagranžo** (*angl. Lagrangian*). Fizikiniai dydžiai sujungti su dalelėmis judančiomis kartu su srautu ir yra duota kaip pradinės padėties ir laiko funkcija. Vizualizacija dažnai apima dinaminį judančių dalelių atvaizdavimą (animaciją), nurodant tik vietinę informaciją tose vietose kur dalelės juda.
- Kiti atvaizdavimo būdai gali būti pavadinami netiesioginiu srauto lauko vizualizavimu.

Gavus SSD eksperimento duomenis ir apdorojus juos, reikia informaciją apie srautą/tekmę pateikti vizualiai suprantama forma. Tyriamieji objektai, reiškiniai ir aplinka gali būti pateikiama paveiksliukų arba animacijos pavidalu [11].

Pagrindiniai srauto/tekmės atvaizdavimo elementai[11]:

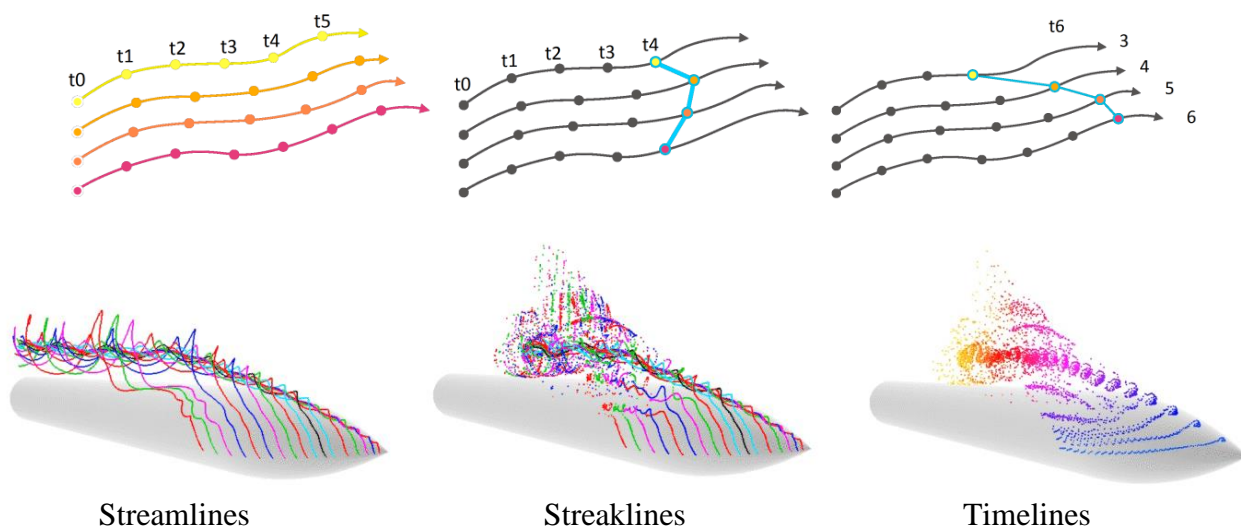
- **Rodyklės.** Rodyklės sudarytos iš paprasčiausių tiesių linijų. Kitaip tariant tai vektoriai, kurie duoda pakankamai gerus ir suprantamus rezultatus dvimatėje erdvėje, kadangi rodyklės nesikerta. Trimatėje erdvėje atvaizdavimas rodyklėmis (vektoriais) yra kur kas sudėtingesnis, todėl tokiu atveju dažniau naudojamos trimatės rodyklės. Tada rodyklės dydis priklauso nuo greičio dydžio, krypties ir perspektyvos.
- **Kreivės.** Naudojamos srauto tekmės ir laiko tekmės atvaizdavimui, kontūrams ir pan. Duoda gerus rezultatus 2D erdvėje, tačiau 3D erdvėje gali būti sunkiau suprantamos. Taip pat negali būti perdidelis jų kiekis, kadangi vizualizacija pasidaro chaotiška ir nesuprantama. Kreivės taip pat gali būti trimatės, atvaizduojamos kaip vamzdžiai, tokiu atveju galima panaudoti optinius/vizualinius gylio suvokimo efektus.
- **Paviršiai.** Galima gauti gerą srauto tekmės krypties kreivių efektą atvaizduojant jas kaip juosteles, kurios sudaromos sujungiant dvi gretimas kreives daugiakampe geometrija. Atvaizdavus jas su tinkamu apšvietimu ir šešėliais, jos gerai perteikia suvokimą apie srauto kryptį ir parodo tokius tekmės kitimus kaip susisukimus ir vingius.
- **Dalelės ir kiti elementai.**

Atvaizduojant srauto tekmę, yra keletas pagrindinių atvaizdavimo metodų. Kiekvienas jų suteikia skirtingus duomenis, todėl būtina žinoti, ką vienokiu ir kitokiu atveju jie parodo. Netinkamas srauto atvaizdavimo elementų ir metodų interpretavimas gali duoti klaidingus rezultatus. Pagrindiniai srauto atvaizdavimo elementai yra tokie:

- **Tekmės krypties kreivė** (*angl. Streamline*). Tai tekmės kreivė kurią nubrėžia judanti dalelė (28 pav.). Tekmės kryptis parodo srauto tekėjimo kryptį, todėl galime vizualiai matyti ir suprasti kaip juda srautas tam tikroje aplinkoje. Taip pat tai padeda suprasti kaip srautas apteka tam tikrus objektus, ir kaip jie įtakoja srauto ir tekmės kryptį. Kadangi atvaizduota tekmės kryptis (kelias) yra dalelės kiekvieno laiko momento projekcija, negalime numatyti kokių greičiu juda dalelė. Tai tam tikra prasme negalioja kai yra keletas kreivių viena šalia kitos, tokiu atveju tam tikroje vietoje labiau susiglaudusios kreivės reikš, kad greitis toje vietoje yra didesnis, o labiau išsiplėtusios, kad lėtesnis. *Pathlines* vektorius v kinta laike, *streamlines* pastovus.
- **Laiko juostos kreivė** (*angl. Timeline*). Tai laiko tekmės kreivė, suformuota iš keletos dalelių “įleistų“ į srautą tuo pačiu laiko momentu ir sujungtų kreive (28 pav.). Laiko juostos neparodo judėjimo trajektorijos, tačiau parodo daleles tam tikru laiko momentu. Pagal laiko

juostą galime numatyti kokių greičiu juda dalelės (srautas), kaip jos pasiskirsto po tam tikro laiko tarpo.

- **Srauto dryželiai** (*angl. Streak lines.*) tai dalelių eilė, palaipsniui paleidžiamos į srautą (28 pav.). Panaši į laiko juostos kreivę, tačiau skirtumas toks, kad visos dalelės paleidžiamos į srautą ne iš karto, o tam tikru laiko intervalu. Šios kreivės neparodo trajektorijų, tačiau parodo dalelių eilę duotu laiko momentu.
- **Vektorių laukas**, tai tarsi žemėlapis, parodantis judėjimo kryptį ir greitį kiekviename lauko taške. Vektorių atvaizdavimui reikalingi du vizualiniai požymiai, tai kryptis ir dydis. Rodyklės (vektoriai) kryptis parodo judėjimo kryptį, o ilgis parodo greitį. Taip pat galimi skirtingų spalvų arba dydžių vektoriai. Tokiu atveju greitį gali parodyti ne tik vektoriaus dydis, bet ir jo spalva.



28 pav. Pagrindiniai tekės atvaizdavimo metodai (*pavadinimai pateikiami originalo t.y. anglų kalba*) [atkurta iš 12]

Reikia pabrėžti, kad per daug srauto linijų (arba kitų srauto atvaizdavimo elementų) gali susipinti ir persikirsti tarpusavyje, bei duoti chaotišką rezultatą, todėl reikia pasirinkti tas srauto linijas (kreives), kurios geriausiai atvaizduoja srauto tėkmę.

Žmogaus sugeba suvokti trimatę erdvę pateiktą 2D paveiksliuke, jei tame paveiksliuke yra pakankamai vizualinių ženklų, atvaizduojančių trimatę erdvę ir gylį. Gylio suvokimui būdingos šios savybės [11]:

- **Perspektyva.** Lygiagretūs kraštai susilieja tolumoje, toliau esantys objektai atvaizduojami mažesni.
- **Stereoskopija.** Skirtingi vaizdai abiem akims. Šiuo metu plačiai naudojama 3D kino filmuose.
- **Okliuzija.** Arčiau esantys objektai uždengia toliau esančius objektus.

- Paviršiaus tekstūra. Tekstūra keičiasi atitinkamai pagal objekto formą ir kraštus.
- Šešėliai. Šešėliai, kuriuos objektas meta ant žemės arba kitų objektų, duoda geresnį suvokimą apie erdvinį jų tarpusavio sąryšį ir padėtį erdvėje.
- Atmosferos rūkas. Sumažėjęs kontrastas ir spalvos tolymoje.
- Optiniai efektai. Tokie kaip lauko/ryškumo gylis (*angl. DOF*).
- Interaktyvus eksperimento atvaizdavimas. Kai naudotojas gali valdyti vizualizaciją trimatėje erdvėje (sukti, keisti matymo padėtį ir pan.).

Teisingai panaudojus atvaizdavimo elementus ir gylio suvokimo efektus, galima informatyviai ir suprantamai atvaizduoti srauto tekės ir skysčio reiškinius.

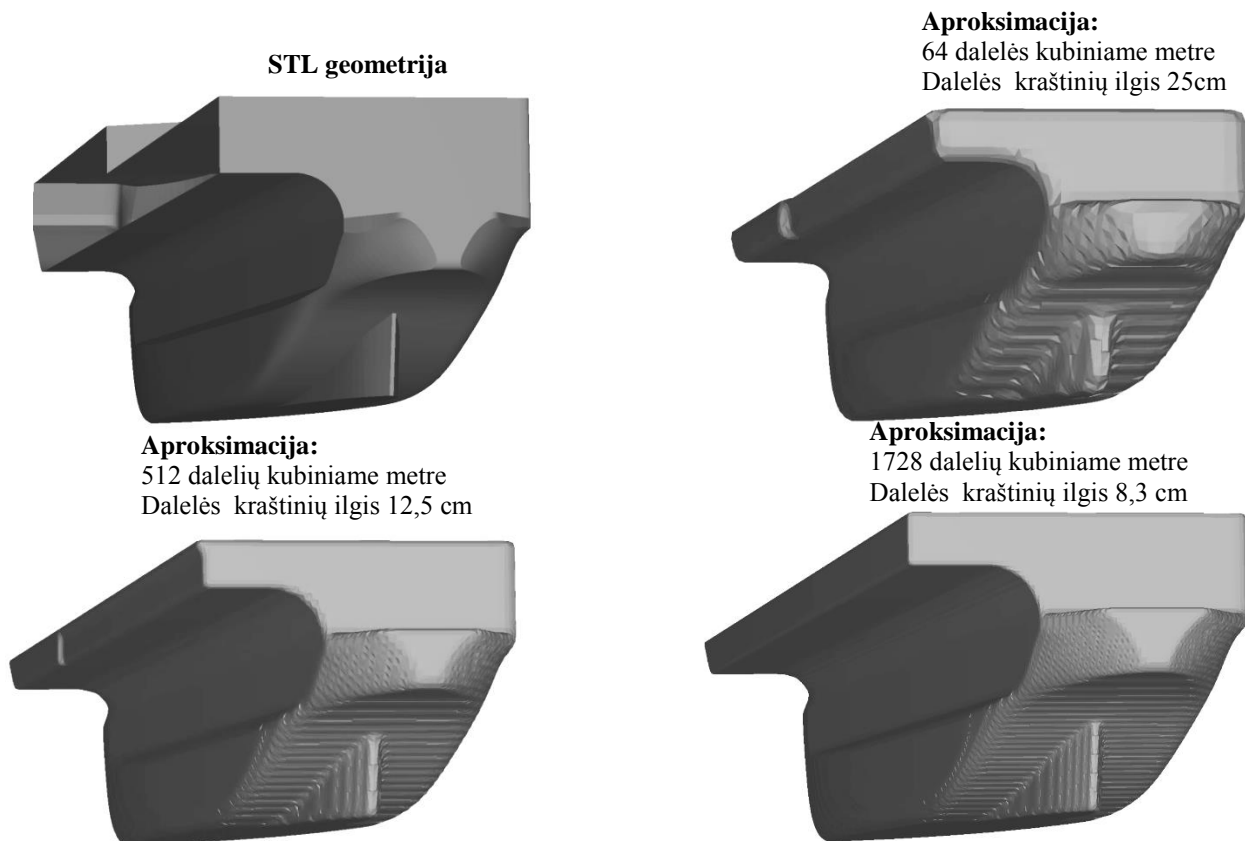
VI. EKSPERIMENTO SUDARYMAS LAIVUI MINTIS

Vienas iš SSD trūkumų tai, jog rezultatai ir jų tikslumas priklauso nuo naudojamos SSD kompiuterinės programos, skaičiavimo metodo, sąlygų ir kitų parametų. Tam, kad gautume tikslius tyrimo duomenis 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 askaičiuoti ir apdoroti, todėl nereikalingi jokie kiti papildomi moduliai. Ja galima tirti reiškinis susijusius su šiluminės energijos perėjimu, 6 laisvės laipsnių skysčio judėjimu ir sąveika, bei mechaniniais ir šiluminiais įtempimais bei jėgomis. Laisvojo paviršiaus sekimui naudojamas TruVOF algoritmas. Tinklelio sudarymas atliekamas paprastai (pusiau automatiškai). Vizualizacija ir duomenų apdorojimas padeda lengviau suprasti tiriamus reiškinis bei pateikti juos vartotojams ir klientams. Šios galimybės padeda tirti įvairius skysčių ir dujų reiškinis skirtingose pramonės ir mokslo srityse.

Tyrimui reikalingas trimatis laivo korpuso modelis. Kadangi FLOW-3D aproksimacijos (tiriamo objekto atvaizdavimo) tikslumas daugiausiai priklauso nuo tinklelio dalelių kiekio (tankio), labai tiksliam laivo korpuso 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. Aproksimuojant laivo korpusą taip pat iškyla problema norint atkartoti aštrias laivo korpuso briaunas ir lūžius. Laivo MINTIS korpusas turi skegą laivagalyje, kurio briaunos yra neužapvalintos, todėl aproksimuojant SSD programoje laivo korpusas gausis kiek „švelnesnis“ nei yra ištikrųjų. 29 paveiksliuke pavaizduota korpuso aproksimacija esant skirtingam tinklelio detalumui. Padidinus dalelių kiekį kubiniame metre iki 4096 (dalelės kraštinės ilgis 6,25cm), kompiuteris nesugebėjo aproksimuoti korpuso dėl didelės skaičiavimų apimties. Todėl būtina optimaliai išnaudoti tinklelio detalumą, ten kur jo labiausiai reikia. Matome, kad kuo tankesnis tinklelis, tuo laivo korpusas atkartojamas tiksliau. Kadangi laivagalyje skegas pasižymi kampuota geometriniu konstrukcija, žemas tinklelio detalumas atkuria tik labai apytikslią skego formą. Tokiu atveju tiriant laivo korpusą galime gauti srauto reiškinis ir tėkmę, kuri neatitiks tikrosios geometrijos sukeliama srauto.

Dėl šios priežasties laivo korpusą modeliuosime apytiksliai, nes aukštesnis laivo korpuso tikslumas neduos mums jokio papildomo tikslumo jį aproksimuojant (atvaizduojant) FLOW-3D programoje. Korpuso modeliavimui naudosime kompiuterinę programą DELFTship. Koreguosime turimą laivo korpuso modelį panaudojant teorinį laivo korpuso brėžinį (priedas nr.

12). Teorinis brėžinys yra nubraižytas Autocad kompiuterinėje programoje, todėl galime španhautus, vaterlinijas ir batoksus sudėlioti trimatėje erdvėje pagal atitinkamas jų koordinatas ir importuoti juos į DELFTSHIP programą, kurioje jie bus rodomi kaip markeriai, padedantys orientuotis modeliuojant. Laivo korpuso modelį eksportuosime į STL formatą, kurį vėliau importuosime į FLOW-3D programą.



29 pav. Laivo korpusas importavus STL geometrijos failą ir aproksimavus (atvaizdavus) FLOW-3D programoje su skirtingo tankumo tinkleliais

Laivo korpuso modelis taip pat bus naudojamas kaip pagrindas, kuriant alternatyvias jo formas siekiant optimalaus srauto aptekėjimo aplink korpusą.

6.1 Preliminarus eksperimento sąlygų nustatymas

Kaip buvo minėta, teisingam eksperimento sudarymui būdingos tam tikros sąlygos ir reikalavimai. Pradiniame eksperimento sudarymo etape bandysime nustatyti optimaliausias eksperimento sąlygas, kurios duos mažiausiai klaidingus rezultatus. Pradžioje bandysime nustatyti teisingus tinklelio krašto ribos nustatymus. Tinklelio bloko krašto ribos nustatymai suteikia tinklelio bloko plokštumoms tam tikrą fizikinį būvį (savybes), pavyzdžiui priklausomai nuo nustatymų, skystis gali sąveikauti su minėta plokštuma kaip su siena arba atvirškčiai, ištekėti. Dėl to būtina

suprasti kokia krašto ribos sąlyga sukels mažiausią interferenciją su laivo korpusu ir bus tinkamiausia vienokiu arba kitokiu atveju.

Programoje FLOW-3D eksperimentą atliksime SI matavimo vienetų sistemoje, todėl laivo greitį išreiškiame metrais per sekundę. Maksimalus laivo MINTIS greitis metrais per sekundę skaičiuojams pagal formulę:

$$v = v_s \cdot 0,5144 = 12,5 \cdot 0,5144 = 6,43 \text{ m/s}, \quad (7)$$

čia v – laivo greitis, m/s;

v_s – laivo greitis mazgais, kt.

Panaudodami (7) formulę sudarysime lentelę visiems laivo greičiams nurodytais metrais per sekundę. Orientuosimės į greičius, kurie yra arčiau eksploatacinio (ekonominio) ir maksimalaus greičio, kadangi didėjant greičiui didėja tikimybė susidaryti turbulentiniam srautui ir sūkūriams.

Taip pat apskaičiuosime Reynoldso ir Frūdo skaičius įvairiems greičiams.

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL_{\perp}}} = \frac{6,43}{\sqrt{9,81 \cdot 39,06}} = 1,39, \quad (8)$$

čia Fr – Frūdo skaičius hidrostatinams laivams;

g – laisvojo kritimo pagreitis, m/s^2 ;

L_{\perp} - laivo ilgis (vaterlinijos ilgis), m (paimta iš Delftship moodelio).

Skaičiuojame Reynoldso skaičių:

$$Re = \frac{vL}{\nu} = \frac{6,43 \cdot 39,06}{1,35383 \cdot 10^{-6}} = 18,6 \cdot 10^7, \quad (9)$$

čia ν – vandens kinematinio klampumo koeficientas, m^2/s .

1 lentelė. Greičių lentelė.

Greitis	kt	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5
Greitis	m/s	3,09	3,34	3,60	3,86	4,12	4,37	4,63	4,89	5,14	5,40	5,66	5,92	6,17	6,43
Frūdo sk.		0,16	0,17	0,18	0,20	0,21	0,22	0,24	0,25	0,26	0,28	0,29	0,30	0,32	0,33
Reynoldso sk.	$\cdot 10^7$	8,90	9,65	10,4	11,1	11,9	12,6	13,4	14,1	14,8	15,6	16,3	17,1	17,8	18,6

Sudarant preliminarų eksperimentą (simuliaciją), nustatysime tokius jos parametrus:

- Tiriama tik vienas katamarano korpusas (pusė laivo). Ties Diametriline plokštuma nustatoma simetriška krašto ribos sąlyga (*boundary conditions > symmetry*). Tiriant klampius skysčius (srautus) tokia sąlyga nėra visiškai teisinga. Pavyzdžiui cilindras su plokščia plokšte ties viduriu pasižymės ženkliai mažesniu pasipriešinimu nei cilindras be jos, kadangi ties viduriu iš dalies neleidžiama susidaryti sūkūriams, kurie cilindro be plokštės atveju gali chaotiškai judėti į abi cilindro puses t.y. gali kirsti diametralinę plokštumą [6]. Dėl to sudarant klampių skysčių eksperimento sąlygas daryti prielaidą dėl eksperimento simetrijos plokštumos reikėtų atsargiai, atsižvelgiant į tyrimo objektą ir tiriamus reiškinius.
- Priimama sąlyga, kad laivas yra stacionarus (nejuda) o jį apteka vandens srautas.

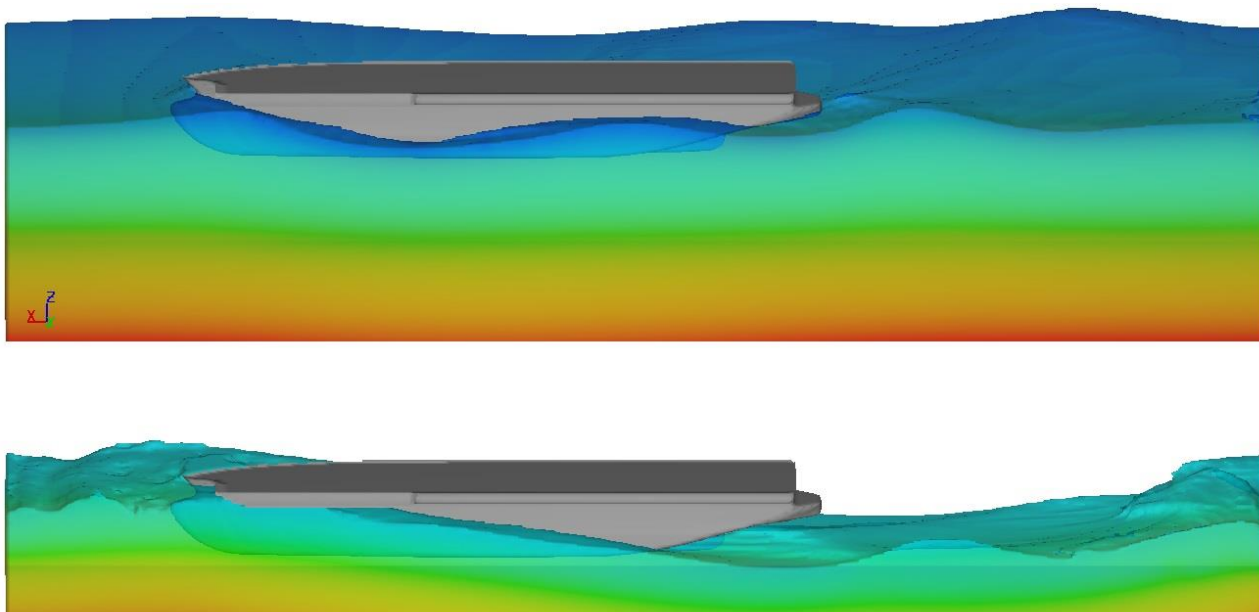
- Eksperimento tinklelio bloko x plokštumose nustatome skysčio greičio sąlygą (*Specified Velocity*), kurios greitis $-6,43$ m/s (12,5 mazgo) x kryptimi. Tai reiškia, kad šiose plokštumose pastoviu greičiu įtekės ir ištekės skystis. Taip pat nustatome skysčio lygį (*fluid elevation*) 2,8 metrus įtekančioje plokštumoje ir 3 metrus ištekančioje. Sysčio lygis skaičiuojamas nuo laivo korpuso apačios, nes nulinė koordinatė yra ties laivagalinio statmens ir bazinės linijos susikirtimu.
- Nustatome skysčio lygį ir greitį tinklelio bloke (*Fluid elevation ir velocities*). Skysčio lygis 2,8 metrai, o greitis $-6,43$ m/s x kryptimi.
- Eksperimento trukmė 60 s (*finish time*). Tai eksperimento trukmė užduotomis sąlygomis. Tikimasi, kad per minutę srautas ir skysčio tekėjimas aplink korpusą nusistovės ir taps pastovus. Vėlesniuose eksperimento žingsniuose trukmė gales būti sumažinta arba padidinta, priklausomai nuo pradinių (preliminarių) eksperimentų.
- Eksperimento matavimo vienetai SI sistemoje. Temperatūra Celsijaus laipsniais.
- Nustatoma trauka (laisvojo kritimo pagreitis) $-9,81$ m/s² z ašimi (*gravity and non inertial reference frame*)
- Skaičiuojami klampūs skysčiai (*viscosity and turbulence*). Šis nustatymas įgalina programą modeliuoti reiškinius, kurie pasireiškia dėl skysčių klampumo.
- Eksperimento skystis nustatomas vanduo. Skysčio savybes (vandenį) pasirenkame iš programoje pateikiamos skysčių bibliotekos. Joje vanduo pateikiamas 293 kelvinų temperatūros (19,9C^o), o jo tankis 1000 kg/m³.
- Pasirenkame, kad programa skaičiuotų objektą veikiančias skysčio jėgas (*preasure and shear force output*). Tai duos galimybę įvertinti eksperimento duomenis ne tik vizualiai, tačiau ir konkrečiais, apčiuopiamais parametrais. Tokiu atveju galima skaitiškai įvertinti skirtingų korpuso modifikacijų sukeltą pasipriešinimą.

Detaliai aprašyti preliminarius bandymus būtų netikslinga, kadangi kiekvienas jų skirtingas, be to dalis bandymų rezultatų išlieka neaiškūs, o kartu ne iki galo suprantama ir kai kurių programos nustatymų įtaka jiems. Iš preliminarių bandymų duomenų nustatėme, kad:

- Naudojant simetrinę (*symmetry*) krašto ribos sąlygą ir esant mažoms eksperimento riboms pasireiškia stipri modelio ir eksperimento ribų (sienu) sąveika (30 pav.). skystis susispaudžia dėl siaurų eksperimento ribų, todėl jis nebeprateka ir jo lygis drastiškai kyla, o aptekęjęs korpusą krinta dėl padidėjusio srauto greičio. Šia prasme tokia tinklelio krašto riba panaši į sieną.
- Nustatant fiksuotą slėgį krašto ribose priklausomai nuo aukščio (*specified preasure*), skystis pasienyje (sienoje) išlaiko pastovų (nustatytą) lygį (slėgį), o naudojant *Continuative* arba

Outflow nustatymus pasireiškia kiti skysčio reiškiniai, kurie nepriimtini šiam eksperimentui. Dalis skysčio išteka arba jo lygis kinta (4 priedas).

- Atsižvelgiant į tai reikalingos didesnės eksperimento ribos, tam kad išvengti interferencijos (skysčio ir modelio sąveikos su tinklelio bloko krašto ribomis).
- Srautas po 60 sekundžių nusistovi nevysiškai. Rekomenduojama ilgesnė eksperimento trukmė.



30 pav. Interferencija, esant simetrijos krašto ribos nustatymui prilausomai nuo eksperimento ribų dydžio

Kadangi nepavyko nustatyti tinkamos tinklelio krašto ribos sąlygos, kuri leistų sudaryti mažesnes eksperimento ribas nepasireiškiant modelio ir bandymo ribų interferencijai, eksperimentą darysime su *Symmetry* krašto ribos nustatymu.

Bandymai rodo, jog laivo povendėninės dalies skerspjūvio ir bandymų baseino skerspjūvio ploto santykis turėtų būti ne didesnis nei 1%, rekomenduojama 0,4% procento [19]. Esant 2,8 metrų grimzlei laivo MINTIS korpuso (vienos pusės) projekcijos plotas $10,77 \text{ m}^2$ (išmatuotas Autocad programoje iš teorinio brėžinio). Jei vadovausimės aukščiau pažymėta rekomendacija, tada skersinės tyrimo ribų projekcijos plotas turėtų būti nemažesnis nei 1077 m^2 , rekomenduojama 2693 m^2 , atitinkamai lygiašonio tokio kvadrato kraštinės projekcijos matmenys būtų apie 33m ir 52m. Tokiu atveju turime:

- Dideles eksperimento ribas, atitinkamai didesnę dalelių kiekį esant tam pačiam jų tankiui.
- Palyginti mažą korpuso detalumą esant pastoviam dalelių kiekiui.
- Ilgą skaičiavimo laiką esant detalesniam tinkeliui.

Norint išvengti šių trūkumų sudarant didesnę tinklelio bloką, reikia sudaryti kintantį tinklelį, koncentruojant daugiau tinklelio elementų ten, kur tiriamieji srauto reiškiniai yra svarbiausi t.y. aplink laivo korpusą.

6.2 Eksperimentas laivui MINTIS

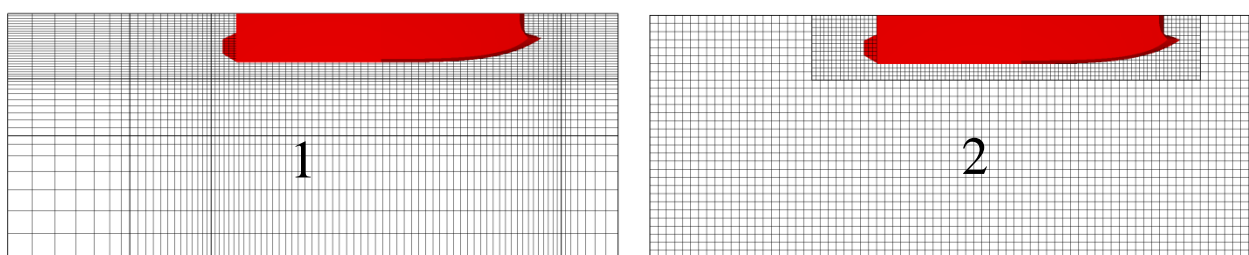
Sudarysime eksperimentą mokslinių tyrimų laivui MINTIS ir išstirsime hidrodinamines jo savybes. Orientuojamasi į laivagalio rajoną skego zonoje, tiriamas srautas.

Atlikę keletą preliminarių FLOW-3D bandymų nustatėme, kad:

- Naudosime *symmetry* pasienio sluoksnio sąlygą (nustatymus).
- Tinklelio bloko kraštinės matmenys x ir z ašimis bus ne mažesnės nei 33 metrai. y ašimi atstumas taip pat turėtų būti pakankamai didelis.
- Naudosime kintantį tinklelį, koncentruojant daugiau tinklelio elementų arčiau laivo korpuso.
- Eksperimento trukmės laikas skaičiuojant nuo pradinių sąlygų rekomenduojamas ilgesnis nei 60 sekundžių.
- Kiti eksperimento parametrai ir nustatymai nesikeičia.

Sudarant kintantį tinklelį žinomos dvi galimybės:

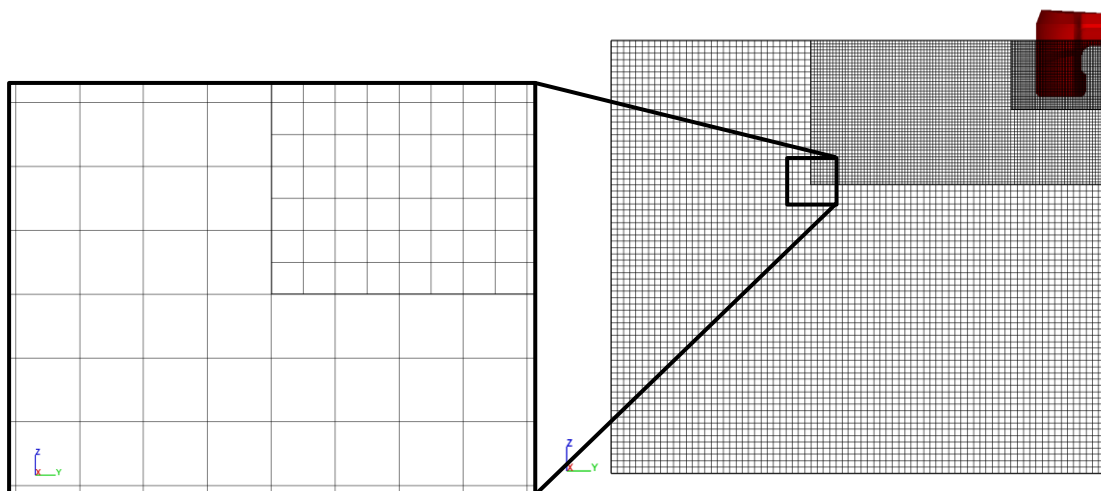
1. Sudaryti tinklelį iš vieno bloko suskaidant jį į plokštumas, kuriose laipsniškai kinta tinklelio dalelių dydžiai (31 pav.).
2. Sudaryti tinklelį iš kelių skirtingo detalumo blokų (31 pav.).



31 pav. Kintančio tinklelio sudarymo galimybės FLOW-3D komp. programoje: Vieno kintančio bloko tinklelis (kairėje) ir kelių sujungtų skirtingo detalumo blokų tinklelis (dešinėje)

Kai naudojami vienodi elementai, jų tūriai vienodi, todėl energijos perėjimas yra pastovus, kai naudojami nepastovaus dydžio elementai reikalingos sudėtingesnės lygtys norint gauti pakankamai tikslius duomenis [10]. Darant tinklelį iš kelių blokų, galime išlaikyti vienodo dydžio (kraštinių santykio) tinklelio elementus. Dėl to sudarysime tinklelį iš keleto skirtingų tinklelio blokų. Mažesni blokai esantys didesniuose nustatomi su *grid overlay* krašto ribos sąlyga. Sudarant tinklelį atsižvelgsime į 5.2 skyriaus rekomendacijas. Tinklelio elementų tankį atskiruose blokuose sudarysime tokį, kad jų elementų kraštinės susilygiuotų. Tokiu atveju SSD programa gali tiksliau ir

greičiau apskaičiuoti sąveiką tarp atskirų elementų [10]. Sudaryto tinklelio schema pavaizduota 32 pav. Tinklelio elementų kiekis 4 305 070.



32 pav. Tinklelis sudarytas iš trijų skirtingo detalumo blokų

Kadangi preliminariniuose bandymuose 60 sekundžių eksperimento trukmė parodė, kad po tokio laiko tarpo, skysčio srautas aplink laivo korpusą nusistovi, tačiau vis tiek lieka nedideli srauto svyravimai, todėl eksperimento trukmę pailginsime iki 120 sekundžių. Srautas ir šiuo atveju gali nusistovėti nevisiškai, tačiau esant turbulentiniam srautui ir sukuriams, srautas juda chaotiškai, todėl ilgesnė eksperimento trukmė gali neduoti jokios papildomos naudos. Kiti eksperimento nustatymai pateikti 9 priede *prepin* failo formatu.

6.3 Gauti eksperimento rezultatai

Pagal gautus simuliacijos/eksperimento duomenis bandysime nustatyti ir numatyti neigiamus srauto reiškinius. Taip pat bandysime nustatyti dėl kokių priežasčių vienokie ar kitokie reiškiniai susidarė ir kokia laivo konstrukcijos įtaką jiems. Gautų duomenų analizei naudosime vizualines FLOW-3D rezultatų atvaizdavimo funkcijas, kurios padeda nustatyti srauto greitį, tėkmę, slėgį bei susidariusias bangas (laisvąjį paviršių).

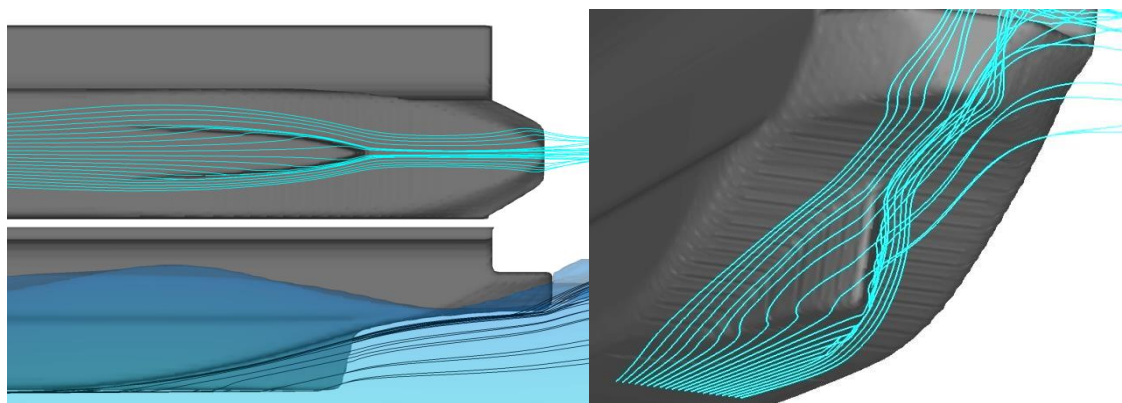
Simuliacijos/eksperimento skaičiavimo trukmė namų kompiuteryje (i5 2500k, 8GB operatyvioji atmintis) esant 4 305 070 dalelių skaičiui yra 2 paros 16 valandų. Visi pateikti ir atvaizduoti tyrimo duomenys gauti 120 tyrimo sekundę.

Išanalizavus bandymo duomenis paaiškėjo pagrindiniai laivo korpuso hidrodinaminiai trūkumai, kurie gali būti skirstomi į kelias pagrindines grupes:

- Sumažėjęs srauto greitis (sūkuriai) skego pabaigos plokštumoje.
- Staigus srauto tekės kitimas kertant apatinę skego plokštumą.

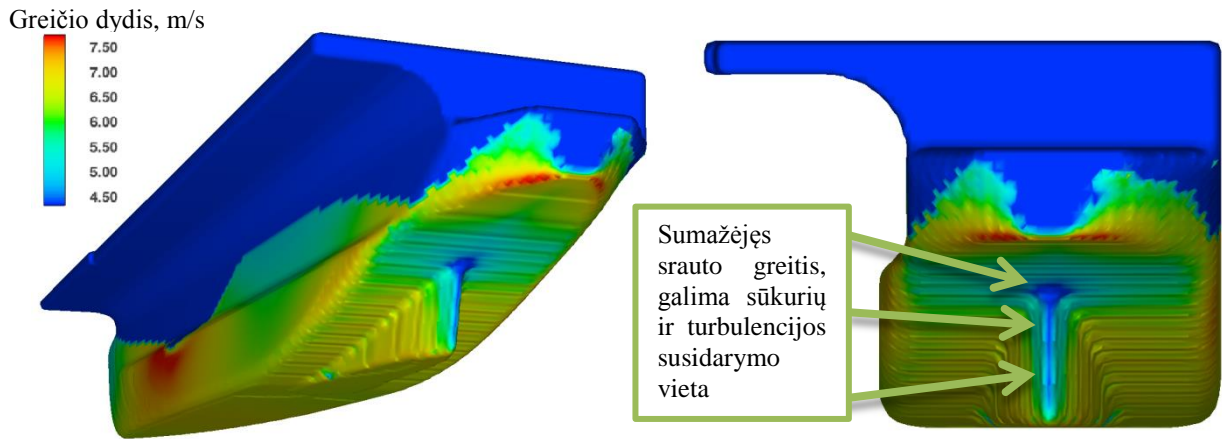
- Laivagalyje susidaro stiprus hidrodinaminis pėdsakas ir lavagalinė banga, srautas atsiskiria netvarkingai.
- Laivapriekinė banga dalinai sutampa su laivagaline.

Nustačius srauto tėkmę laivagalyje, aplink skegą, iš 33 pav. matome, kad srautas seka patoksų kryptimi, todėl jam tenka keisti savo tekėjimo kryptį, t.y. iš horizontalios plokštumos (skego apačios) pereiti vertikalių judėjimą batoksų krypti. Tai darydamas srautas gan ženkliai ir greitai keičia savo tekėjimo kryptį išilgai kirsdamas skego briaunas. Šioje vietoje FLOW-3D neparodė pastebimo srauto greičio sumažėjimo arba sukurių, tačiau tikėtina, kad tai yra dėl nepakankamai tikslaus aštrių skego kampų atvaizdavimo programoje. Praktikoje srautas pakankamu greičiu kirtęs aštrias briaunas ir priverstas staiga keisti savo tekėjimo kryptį susidrums, t.y. susidarys turbulentinis srautas ir sukuriai už kertamos plokštumos arba briaunos.

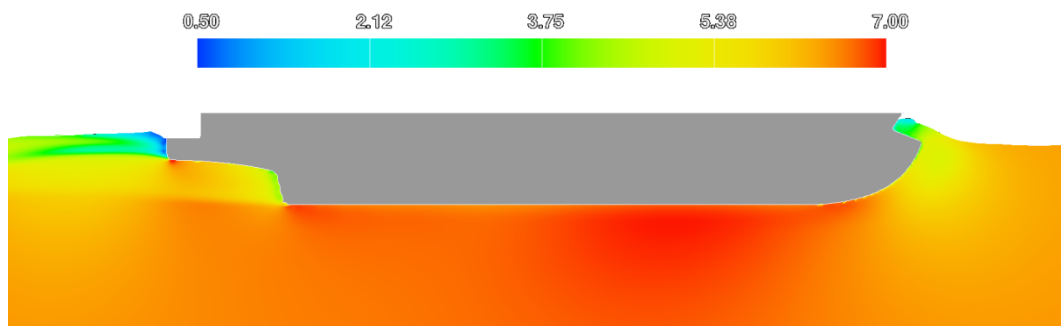


33 pav. Srauto aptekėjimas aplink skegą

Kita skego konstrukcijos vieta, kurioje pastebimi sumažėję srauto greičiai (sukuriai ir turbulencija) yra plokštuma, ties kuria užsibaigia skegas. 35 pav. matome pavaizduotą sumažėjusį srauto greitį ties skego briaunos plokštuma, bei nedidelį greičio sumažėjimo bėdsaką einantį nuo skego ties korpuso viduriu (34 pav.). Kaip buvo minėta 4.3 skyriuje, vaterlinija, o šiuo atveju skegas turi užsibaigti kuo aštriau, t.y. kreivės ties skego viduriu turi susikirsti kuo aštriau. Deja dažnai technologiškai tai padaryti neįmanoma, todėl tokiu atveju ieškoma kompromiso tarp technologiškai ir hidrodinamiškai priimtino varianto. Tikėtina, kad tai galioja ir laivo MINTIS atveju, kadangi esamos skego pabaigos briauna gali būti optimizuota tiek, kiek tai leidžia padaryti technologiniai procesai. Reikia paminėti, kad realybėje srauto greitis arti laivo korpuso yra lygūs arba artimas laivo korpuso greičiui dėl skysčio pasluoksnio, todėl akivaizdu, kad FLOW-3D greičių atvaizdavime ant korpuso į tai nėra atsižvelgiama.



34 pav. Srauto greičių pasiskirstymas ant korpuso (Pastaba: spalvų skalė nustatyta taip, kad geriausiai matytusi srauto greičio skirtumai skego pabaigoje t.y. atvaizduojami srauto greičiai nuo 4,5 m/s iki 7,5 m/s)

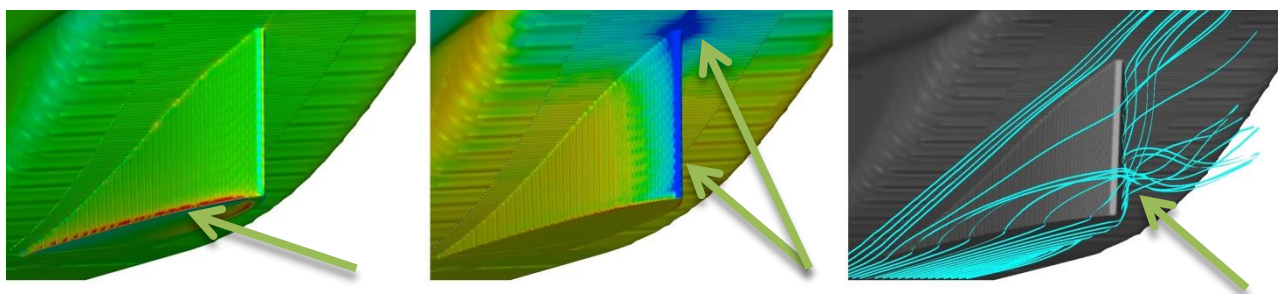


35 pav. Srauto greičių pjūvis ties skego viduriu

Tam, kad tiksliau atkartotume aštrias skego briaunas sudarysime dar vieną eksperimentą. Su FLOW-3D programa sudarysime kitą simuliaciją naudodamiesi funkcija *Restart simulation*. Ši funkcija leidžia panaudoti esamos simuliacijos duomenis ties tam tikru simuliacijos laiko momentu (šiuo atveju ties 120 sekunde) ir pakoregavus eksperimento parametrus skaičiuoti toliau nuo pasirinkto laiko taško. Tokiu atveju nereikia skaičiuoti viso eksperimento iš naujo. Prie esamos simuliacijos dadėsime dar vieną tinklelio bloką, kuris bus sukonzentruotas ties skegu, todėl skego forma bus atkartojama tiksliau, dėl didesnės tinklelio elementų koncentracijos aplink skegą. Taip pat *Output* lange pažymėsime *fluid vorticity* funkciją, kuri parodo srauto sūkurius. Kiti eksperimento nustatymai išliks tie patys.

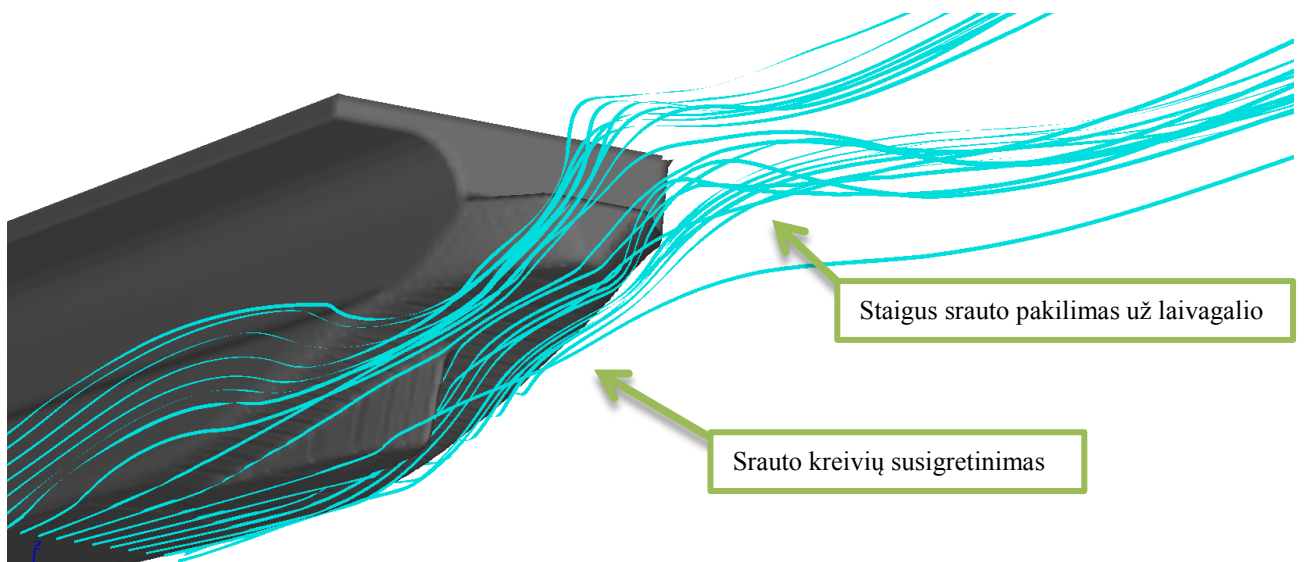
Gavus rezultatus ties 124 eksperimento sekunde (4 sekundės nuo paskutinio gauto eksperimento duomenų) skego apatinėse briaunose nepastebėta srauto greičio svyravimų, tačiau ten, kur skegas užsibaigia tiksliau matomas srauto greičio sumažėjimas. Spalvomis atvaizdavus funkciją *x-vorticity* ties apatine skego briauna matyti pakitusi spalvų gama, kuri galimai reiškia susidariusius sūkurius ties apatine skego briauna srautui kertant ją. Sukūriai kitų plokštumų (*y* ir *z*) atžvilgiu neparodė jokių srauto pakitimų toje vietoje. Deja išlieka neišku ką tiksliai parodo ši funkcija (*x vorticity*) ir kokiais matavimo vienetais ji pateikiama. Be to spalvų skalės pakitimas matomas beveik ant visų laivo korpuso briaunų, kuriuose srautas keičia kryptį dėl korpuso formos kitimo.

Srauto tekės kreivės esant detaliai atvaizduotam skegui taip pat šiek tiek skiriasi nuo ankstesnių rezultatų. Nors kreivės kaip ir pradiniuose rezultatuose kerta apatinę skego plokštumą, tačiau jų kryptis batoksų kryptimi yra kitokia. Dalis srauto kreivių susilieja (susigretina) ties apatine skego vieta ir palikdamos skegą šiek tiek užsisuka susijungdamos su kitos skego pusės srautu. Tekės kreivių susigretinimas pastebimas tik vienoje skego pusėje, kuri yra arčiau DP. Kitoje skego pusėje tekės kreivės ir atstumas tarp jų yra tolygus. Įdomu tai, jog srauto greičių atvaizdavimas ant skego neparodė jokie srauto greičio kitimo šioje vietoje, nepaisant to, kad eksperimentiniuose SSD tyrimuose atstumas tarp srauto kreivių gali (turėtų) netiesiogiai parodyti srauto greitį. Taip pat išlieka nevisiškai aišku, ar per 4 sekundes srautas pakankamai nusistovėjo prisitaikydamas prie detalesnės (pakitusios) skego formos ir tinklelio. Šiuo atveju simuliaciją galima daryti kur kas ilgesnę, tikintis kad srautas nusistovės, tačiau dėl ženkliai išaugusio tinklelio elementų skaičiaus (8 996 954 tinklelio elementai) skaičiavimo laikas pasidaro labai ilgas, todėl toks detalus eksperimento tyrimas pasidaro nepraktiškas laiko ir kompiuterinių resursų atžvilgiu.



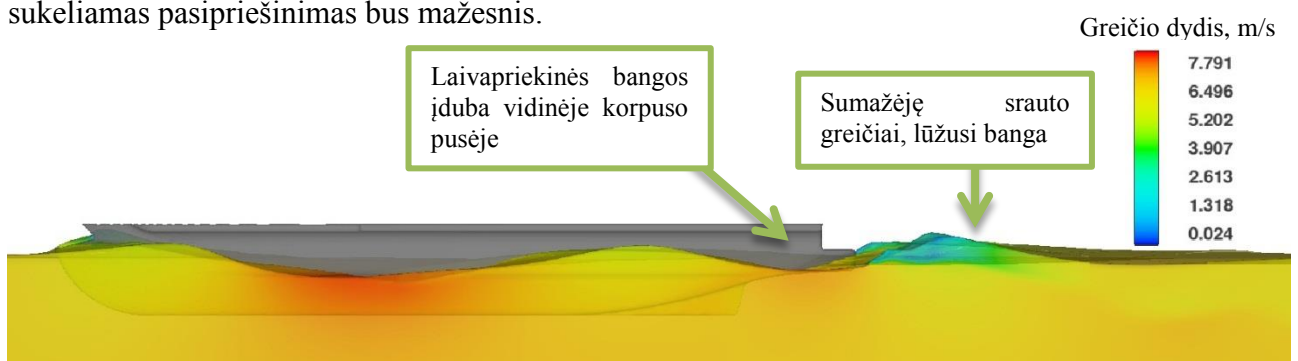
36 pav. Srauto sūkuriai x plokštumos atžvilgiu (kairėje), srauto greičiai ties skegu (viduryje) ir srauto tekės kryptis (dešinėje) esant detaliam tinkleliui ties skegu.

Laivo MINTIS laivagalis yra kiek netradicinės formos, kadangi jis panašus tiek į kreiserinio tiek į trancinio laivagalio konstrukciją. Laivagalis siaurėja, tačiau užbaigiamas plokštuma ir yra žemiau vaterlinijos (iš dalies paniręs). Kreiseriniai laivagaliai dažniausiai nebūna panirę, o tranciniai atvirksčiai. Šiuo atveju laivagalis šiek tiek paniręs, todėl kreiserinis laivagalis gali būti netinkamas esant tokioms sąlygoms. Iš 35 pav. matome, kad laivagalyje stipriai sumažėja srauto greitis, o arčiausiai tranco plokštumos yra beveik lygus nuliui t.y. artimas laivo greičiui. Tai reiškia kad vandens masė laivagalyje velkasi iš paskos, susidaro hidrodinaminis pėdsakas, stiprūs sūkuriai ir chaotiškas (turbulentinis) srautas. Taip pat stipriai padidėja vandens lygis laivagalyje, todėl atsiranda tikimybė, kad atsikišusi laivagalio dalis (platforma) bus užpilama. Laivagalio platformos užylimą iš dalies parodo ant jos likęs nežymus vandens pėdsakas (3 priedas). Pažiūrėję į tekės kreives 37 pav. matome, kad laivagalio forma siaurėja taip, kad srautas iš visų pusių pamažu kreipiamas į laivagalio viršų. Taip sudaromos palankios sąlygos susidaryti laivagaliniams sūkuriams ir laivagalinei bangai, kadangi srautas negali atitrūkti nuo laivagalio.



37 pav. Srautas laivagalyje

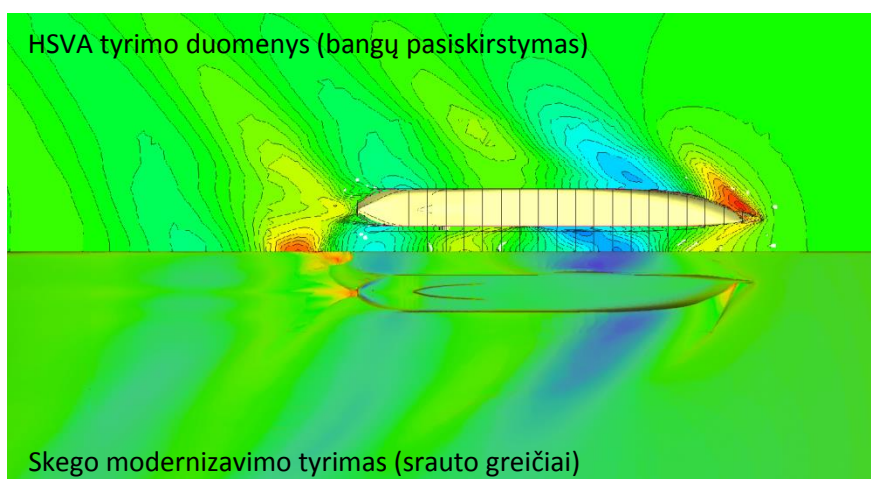
Laivo vidinėje pusėje, tarp korpusų, susidaro stiprios bangos einančios nuo laivapriekio. Esant 12,5 mazgų greičiui bangos įduba yra maždaug ties laivagalio pabaiga, o bangos viršūnė kiek toliau nuo laivagalio. Laivagalinė banga susidariusi laivagalio pabaigoje pamažu slenka tolyn, o ties DP susijungia, todėl susidaro bangų interferencija. Susijungusios gretimų korpusų laivagalinės bangos stipriai lužta ties DP, susidaro bangos ketera kuri „ritasi“ nuo iš laivo priekio atkeliavusios bangos šlaitu. Šios bangos greitis yra artimas laivo greičiui, kadangi joje yra stipriai sumažėjęs srauto greitis laivo atžvilgiu, todėl ji velkasi laivo korpuso gale. Visi šie veiksniai tarpusavyje sudaro labai prastą laivagalinį srautą, bangas ir sukurius (turbulentinį tekėjimą). Kintant laivo greičiui laivagalyje susidariusių bangų profilis keisis, kadangi laivapriekinė banga plaukiant tam tikru greičiu dalinai panaikins laivagalinę bangą, nes jų fazės bus skirtingos t.y. laivapriekinės bangos įduba bus ties laivagalinės bangos viršūne (kauburiu). Tokiu atveju bangų sukeliamas pasipriešinimas bus mažesnis.



38 pav. Srauto greičių ir bangų pasiskirstymas ties diametraline plokštuma.

Galime palyginti gautus rezultatus su ankstesniais SSD eksperimentų duomenimis, kuriuos atliko HSVA (Hamburg Ship Model Basin). Jų atliktame tyrime laivo korpuso forma nežymiai skiriasi nuo esamos, o laivas tiriamas su 2,5 metrų grimzle. Palyginsime gautus duomenis esant 12,5 mazgų greičiui. 39 paveiksle pavaizduoti HSVA ir dabartiniai FLOW-3D tyrimo

duomenys. Iš paveiksluko matyti, kad gauti rezultatai labai panašūs, nepaisant skirtingos tyrimo grimzlės ir nevienodo laivo korpuso (korpuso formos skirtumas minimalus).



39 pav HSVA tyrimo duomenų ir esamo tyrimo palyginimas (Pastaba: esamo tyrimo paveikslukas pakoreguotas taip, kad spalvų gama sutaptų su HSVA tyrimo paveiksluku, tikrasis srauto greičių (bangų) pasiskirstymas pavaizduotas 5 priede)

HSVA išvadose [21] pateikiama, kad bendras bangų profilis esantis už laivo korpuso yra geras. Taip pat pažymima, jog laivagalyje už korpuso susidaro stipri laivagalinė banga. Pažvelgę į visus tyrimo duomenis (greičius) matome, jog banga atsiranda esant 11 mazgų greičiui, o savo piką pasiekia ties maždaug 12 mazgų greičiu. Greičiui padidėjus iki 13 mazgų banga ženkliai sumažėja ir beveik išnyksta. Nors eksperimentų sąlygos šiek tiek skiriasi, esant tokiam rezultatų panašumui galime priimti, kad mūsų atveju kintant laivo greičiui laivagalinė banga kis panašiai.

Apibendrinus eksperimento rezultatus galime teigti, kad:

- 12,5 mazgų greitis yra netinkamas (nepalankus) laivo MINTIS korpuso formai (ilgiui) dėl neigiamos laivapriekio ir laivagalio sukeltų bangų sąveikos.
- Esant 12,5 mazgų greičiui, laivagalis (atsikišusi laivagalio dalis - platforma) yra hidrodinamiškai nefektyvi eigoje pirmyn dėl stipraus hidrodinaminio pėdsako ir srauto neatitrūkimo.
- Dėl bangų sistemos sąveikos ir laivagalio sukeltos bangos, ties DP susidaro stipri laivagalinė banga, kuri lūžta ir ritasi laivapriekio sukeltos bangos šlaitu.
- Vertikalių ir horizontalių skego plokštumų susikirtimo vietoje, srautas keičia savo kryptį, todėl ši skego vieta nesudaro sąlygų sklandžiam srauto aptekėjimui.
- Skego pabaigos plokštumoje susidaro hidrodinaminis pėdsakas, kadangi siaura srauto dalis pasižymi ženkliai sumažėjusiu srauto greičiu palyginus su gretimu srautu. Esant skirtingam gretimų srautų greičiui, gali susidaryti sūkurių ir turbulencija dėl jų sąveikos.

VII. LAIVAGALIO MINTIS OPTIMIZAVIMAS

Šiame skyriuje pagal gautus eksperimento rezultatus bandysime optimizuoti konstrukciją, siekiant pagerinti korpuso hidrodinamines savybes t.y. padaryti sklandesnę srauto aptekėjimą. alternatyvios (optimizuotos) laivo korpuso formos tiriamos esant identiškoms eksperimento sąlygoms, tam, kad būtų galima tiksliai palyginti skirtingas korpuso modifikacijas ir jų įtaka hidrodinaminiais reiškiniais.

Optimizacija reiškia tinkamiausio sprendimo radimą iš riboto, arba neriboto galimų variantų skaičiaus. Kartais esant neribotam galimų variantų skaičiui neįmanoma ištirti kiekvieno iš jų, todėl yra naudojami du pagrindiniai optimizavimo metodai [27]:

1. **Tiesioginės paieškos metodas** (*angl. direct search approach*). Galimi variantai kuriami/generuojami keičiant parametrus tam tikru žingsniu 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 yra 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 laivo konstrukcijos pakitimus arba technologinį modernizavimo ir optimizavimo įgyvendinimo sudėtingumą, optimizavimas gali būti pernelyg brangus, kad laivo eksploatacijos eigoje duotų teigiamą finansinę naudą. Kitavertus, laivo optimizavimas ir modernizavimas gali neduoti tiesioginės materialinės naudos, tačiau laivas gali tapti saugesnis ar ekologiškesnis.

7.1 Alternatyvių korpuso formų sudarymas

Sukursime keletą alternatyvių konstrukcijos (formas) variantų. Kadangi skego ir laivagalio konstrukcija gali būti įvairi, kartu didelis galimų nežinomųjų skaičius, todėl toks metodas leidžia atsitiktinai sukurti keletą tarpusavyje skirtingų konstrukcijų ir jas palyginti. Tai bus optimizavimo metodas, kuris panašus į tiesioginės paieškos metodą su atsitiktiniais galimais variantais. Ieškant optimaliausio varianto toks metodas netinka, todėl norint kokybiškiau optimizuoti laivagalio formą reikėtų susikoncentruoti ties jau gautu optimaliausiu variantu ir pratęsti tyrima keičiant korpuso formą tam tikru žingsniu (tiesioginės paieškos metodu) arba taikant pakopų metodą (*angl. stepness approach*).

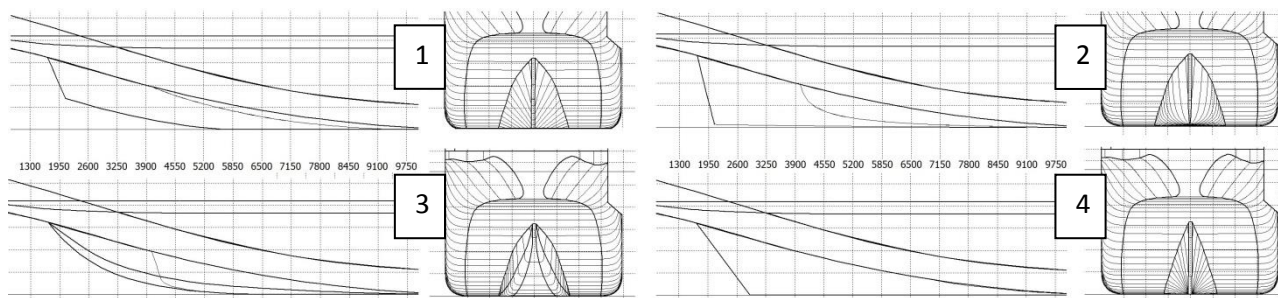
Dažnai siekiant nustatyti optimalią korpuso formą ir tiriant keletą korpuso variantų nustatoma sąlyga, kad pagrindiniai korpuso matmenys ir laivo vanentalpa nesiskirs. Laivo MINTIS atveju tokią sąlygą išlaikyti sunku, kadangi daugeliu atveju keičiant skego formą, reikėtų keisti ir laivo korpuso apvadų formą, o tai būtų tikslinga daryti tik pradinėje laivo projektavimo stadijoje. Norint pakeisti eksploatuojamo (jau pastatyto) korpuso (apvadų) formą, susiduriama su dideliais finansiniais ir technologiniais iššūkiais, todėl toks korpuso konstrukcijos pakeitimas gali neduoti grįžtamosios finansinės naudos. Tokiu atveju labiausiai priimtinas variantas yra pakeisti tik tam tikrą korpuso dalį ar elementą, arba naudoti srautą gerinančius įtaisus (movas, sparnus ir pan.).

Iš bendro išdėstymo brėžinio (11 Priedas) matome, kad laivo MINTIS skegas atlieka ne tik hidrodinaminę funkciją, jame taip pat yra balastiniai ir gėlo vandens tankai. Be to dokuojant laivą skego pradžia (plokštuma) yra pagrindas, statant laivą ant atramų. Šie aspektai gan stipriai apriboja skego formos redagavimo galimybes, todėl į tai neatsižvelgsime, arba atsižvelgsime iš dalies, susitelgdami ties hidrodinamine skego funkcija. Tinkamai suprojektuotas skegas turėtų nesukelti turbulentinio srauto ir sūkurių, užtikrinti sklandų srautą patenkantį į varytuvą, bei suteikti pakankamą kurso pastovumą. 2 priede pavaizduoti *SHRT (Ship Handling Research and Training Centre)* [16] tirti skego variantai siekiant užtikrinti pakankamą kurso pastovumą. Nustatyta, kad 7 skego variantas optimaliausias.

Iš eksperimento tyrimo duomenų žinome, kad skegą reikėtų optimizuoti keičiant skego formą taip:

- Panaikinant aštrias skego briaunas, ten kur srautas keičia savo judėjimo kryptį. Šiuo atveju reikia užapvalinti skego kampus arba iš esmės keisti jo konstrukciją.
- Sumažinant skego pabaigos plokštumą, arba iš esmės keičiant skego konstrukciją. Tikėtina, kad plokštumos sumažinimo galimybė priklauso nuo technologinių procesų.

Atsižvelgiant į šiuos aspektus sudarysime keletą skego formos modifikacijų. Redaguotos skego formos, kurios bus tiriamos pavaizduotos 40 paveiksliuke.



40 pav. Skirtingos tiriamos skego formos (tyrimo atvejai)

Ten kur laivo korpuso forma kinta judėjimo krypties atžvilgiu, geriau yra, laužti kreivę, nei palikti ją kintančią dideliu spinduliu. Laivo MINTIS laivagalio konstrukcija siaurėja pamažu ir užsibaigia trancu. Šiuo atveju laivagalio konstrukcija neatlieka savo funkcijos hidrodinaminiu požiūriu nei kaip trancinis nei kaip kreiserinis laivagalis. Tikėtina, kad netgi esant pakankamai dideliame laivo greičiui srautas atsiskirs neefektyviai, kadangi nėra atsižvelgta į sąlygą dėl korpuso formos kreivių „laužimo“. Kitavertus plaukiant atbuline eiga arba judant dreifu, esanti konstrukcija gali būti šiek tiek pranašesnė už kitas, kadangi laivagalyje esanti platforma gali būti užpilama mažiau, nukreipiant srautą į šonus.

Iš eksperimento gautų duomenų žinome, kad laivagalio formą reikia keisti taip, kad išvengtume šių reiškinių:

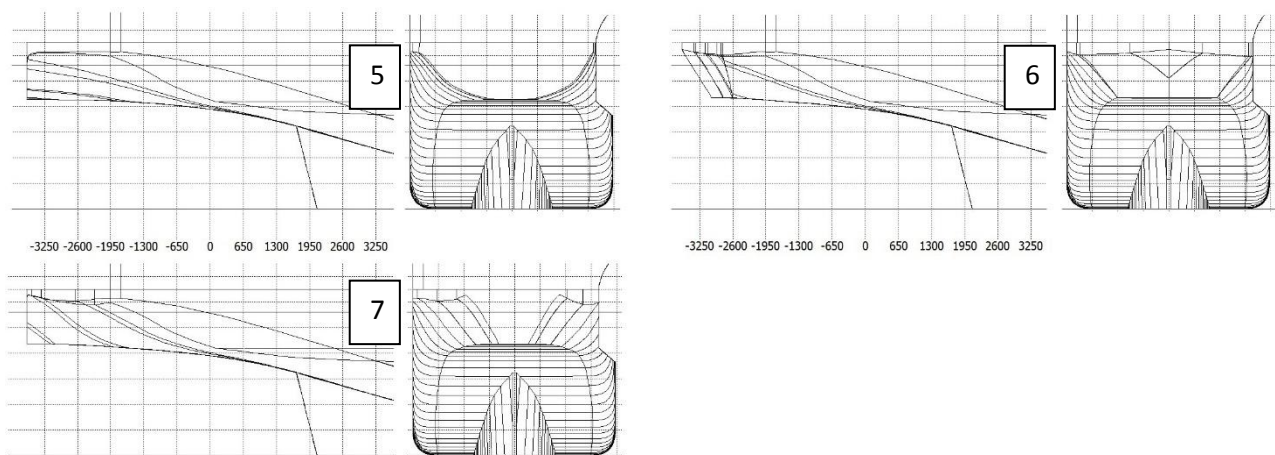
- Srautas laivagalyje turėtų atsiskirti „švariai“, t.y. atsikišusi laivagalio dalis (platforma) neturėtų būti užpilama, o srautas neturėtų vilktis laivagaliui iš paskos (hidrodinaminis pėdsakas turi būti minimalus).
- Laivagalis turėtų būti toks, kad laivagalinės bangos kauburys (viršūnė) būtų ties laivapriekinės bangos įduba (padu). Tokiu atveju laivo sukeltas bangų pasipriešinimas sumažės.

Pradžioje laivagalio formą redaguosime taip, kad srautas atsiskirtų be turbulencijos ir sukurių. Tokiu atveju tikslinga naudoti trancinę laivagalio formą, kuri užsibaigia aštriomis briaunomis, yra „nukertama“. Trancinis laivagalis dažniausiai naudojamas greitaeigiuose laivuose, o laivo mintis greitis nėra didelis, todėl srautas gali neatsiskirti arba atsiskirti neviseškai. Tokiu atveju trancinis laivagalis turėtų būti paniręs mažiau, arba reikia naudoti kitokią laivagalio formą.

Norint kad laivagalinė banga nuslopintų laivapriekinę bangą laivo ilgis arba laivo greitis turi būti kitokie. Šiuo atveju šių sąlygų pakeisti negalima, todėl reikia keisti laivagalio konstrukciją. Norint „nustumti“ laivagalinę bangą toliau už laivagalio reikia arba ilginti laivagalį, arba jį panardinti giliau ir daryti kiek paltesnį (galima naudoti srautą kreipiančius pleištus ar sparnus). Pirmuoju atveju keičiasi pagrindiniai laivo matmenys, antruoju reikalinga daugiau energijos (greičio) kad srautas atsiskirtų ir tikėtina, kad laivagalinė banga bus didesnė (bangos atitolinimas

dėl panardinimo yra abejotinas). Tokiu atveju tikslas yra, kad laivagalinė banga bent jau nesutaptų su laivapriekine, o srautas atsiskirtų efektyviau.

Sudarysime keletą laivagalio variantų. Primuoju atveju (41 pav. 5 nr.) sudarytas masyvus laivagalis, kuris siaurėja labai mažai einant link laivagalio, o laivagalyje yra nukertamas plokštuma t.y. trancu. Antruoju atveju (41 pav. nr. 6) Vis dar siekta išlaikyti trancinio laivagalio principus, tačiau trancinė plokštuma yra „laužta“ siekiant pagerinti laivagalio hidrodinamines savybes plaukiant atbuline eiga arba manevruojant. Trečiasis laivagalis (41 pav. nr. 7) skiriasi nuo MINTIES laivagalio minimaliai, kadangi siekta išlaikyti esamos konstrukcijos formą. Pakeista tik galinė laivagalio dalis, ją šiek tiek praplatinant ir panaikinant švelnias briaunas.



41 pav. Pakeistos laivagalio formos.

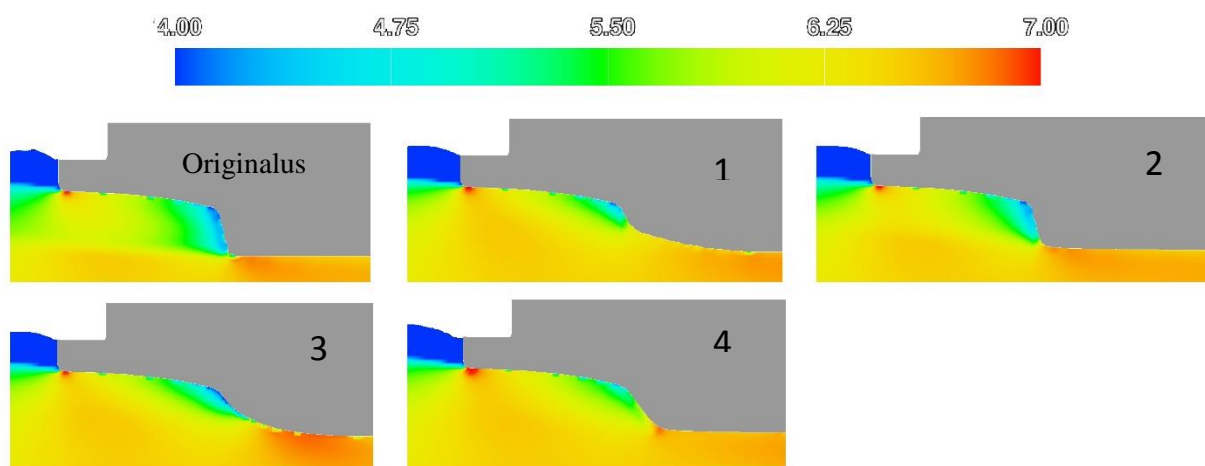
Visi septyni alternatyvūs laivagalio variantai bus tiriami atskirai, t.y. skego ir laivagalio formos tiriamos kaip atskiri atvejai, tačiau siekiant maksimalaus korpuso naudingumo, optimalias laivagalio ir skego formas galima derinti tarpusavyje (tokiu atveju vis tiek rekomenduojama iširti juos abu kartu, kaip vieną korpusą, dėl galimos jų sąveikos).

7.2 Skego formų palyginimas

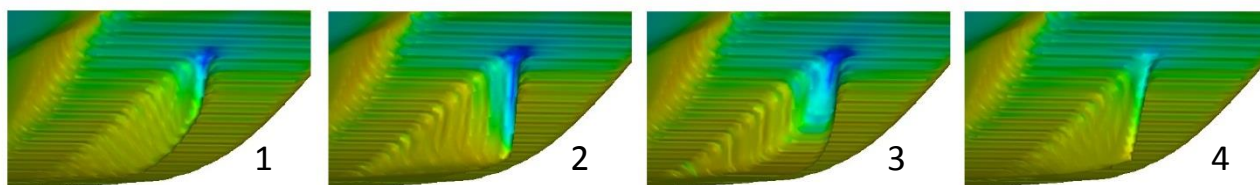
Šiame skyriuje palyginsime skirtingas korpuso modifikacijas atsižvelgiant į FLOW-3D rezultatus, bei jų įtaką hidrodinaminiam korpuso naudingumui. Visi skirtingų korpuso atvejų palyginimai atliekami vienodomis sąlygomis (spalvų skalės, tekės kreivės ir kiti rezultatų atvaizdavimo nustatymai vienodi). Skego įtaką bangų susidarymui ir laisvajam vandens paviršiui nenagrinėsime, kadangi jo įtaka nepastebima arba minimali.

42 pav. pavaizduoti srauto greičiai ties skego viduriu. Matome, kad pirmoji ir ketvirtoji skego konstrukcija palieka mažiausią srauto greičių pėdsaką, kadangi srauto suletėjimas pastebimas tik toje vietoje, kur skego viršaus pabaiga jungiasi su korpusu. Reikia paminėti, kad šie du minėti skego variantai taip pat yra mažiausi vandentalpos atžvilgiu, o tai gali būti viena iš

minimalaus srauto pokyčio priežasčių. Antruoju ir trečiuoju atveju pasireiškia kiek labiau pastebimas srauto greičio sumažėjimas ties skego jungimosi vieta su korpusu. Šios skego konstrukcijos yra masyvesnės, todėl daro didesnę įtaką srautui. Pažvelgus į srauto greičių pasiskirstymą ant korpuso (skego), aiškiai matosi srauto greičio sumažėjimo vieta skegui jungiantis su korpusu. Toje vietoje galima vandens srauto judėjimo kryptis geometriškai yra apribojama labiau t.y. srautas nebegali judėti į viršų, todėl susidaro mažesnio tekės greičio sritis. Šiuo atveju matome, kad optimaliausias yra ketvirtas skego atvejis, kadangi skego ir korpuso susikirtimo vietoje beveik nepastebimas ženklus srauto greičio mažėjimas. Šis skegas yra gan siauras ir panašus į peleką, todėl „skruodžia“ srautą ir mažiausiai „sutrigdo“ jį. Esant masyvesniam skegui, pavyzdžiui trečiuoju skego atveju, didesnė srauto dalis yra fiziškai paveikiama skego, o kartu didesnė srauto tekės kreivių dalis aptekėjusi skegą yra kreipiama link korpuso ir skego susikirtimo vietos.



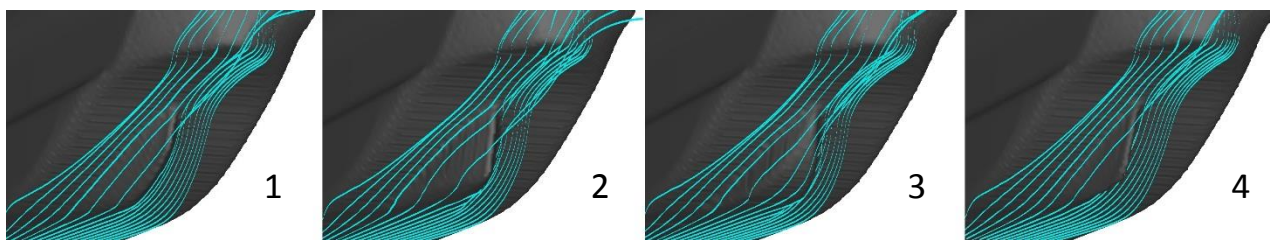
42 pav. Srauto greičiai ties skego vidurio plokštuma



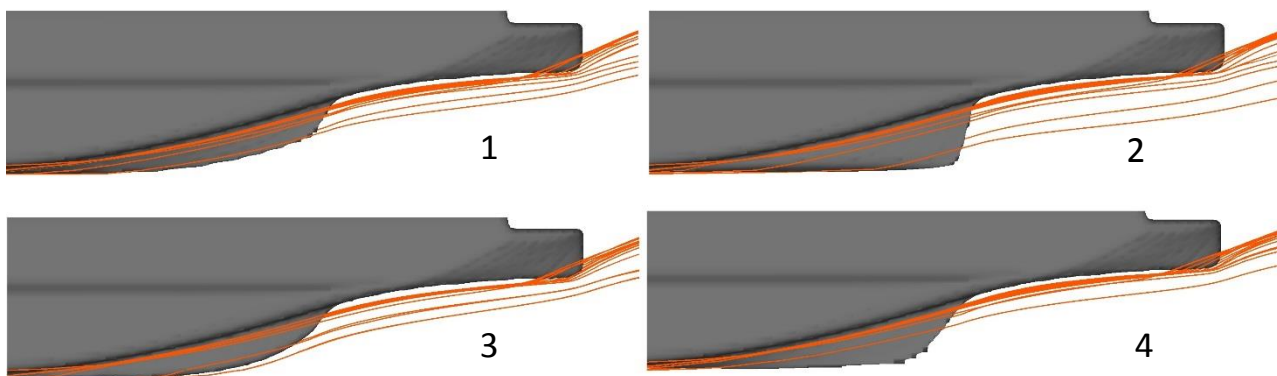
43 pav. Srauto greičių pasiskirstymas ant skirtingų skego konstrukcijų

Visos alternatyvios skego formos pasižymi geresniu srauto aptekėjimu, kadangi apatinės skego plokštumos ketera yra pašalinama arba suapvalinama. 44 ir 45 pav. pavaizduota kiekvieno skego srauto aptekėjimas. Pirmojo skego atveju srautas seka skego forma, kadangi skegas nukirstas lygagrečiai laivo korpusui, o kartu ir tekės kreivėms. Tai reiškia, kad srautui reikia kirsti arba atitrūkti nuo skego mažesniame plote, todėl jis paveikiamas (sutrigdomas) mažiau. Antruoju skego atveju srautas beveik nesiskiria nuo esamo skego srauto. Suapvalinta skego apačia leidžia srauto tekmei keisti savo kryptį pamažu, priklausomai nuo skego apačios suapvalinimo spindulio. Toks skegas turėtų pasižymėti panašiomis savybėmis kaip ir MINTIES skegas, tačiau jo hidrodinaminės savybės (aptekėjimas) šiek tiek geresnis. Trečiuoju atveju srauto aptekėjimas taip

pat sklandus, tačiau skegas pamažu kyla link korpuso, su kuriuo susijungia. Kylant pamažu keičiasi skego kampas tekės kreivių atžvilgiu (45 pav.), todėl pasiekus tam tikrą kampą tekės srautas pradeda atitrūkti ir gali susidaryti turbulentinis srauto tekėjimas ir sūkuriai, kuriuos iš dalies parodo srauto greičių pasiskirstymas ant korpuso.



44 pav. Srauto tekės kryptys aplink skegas



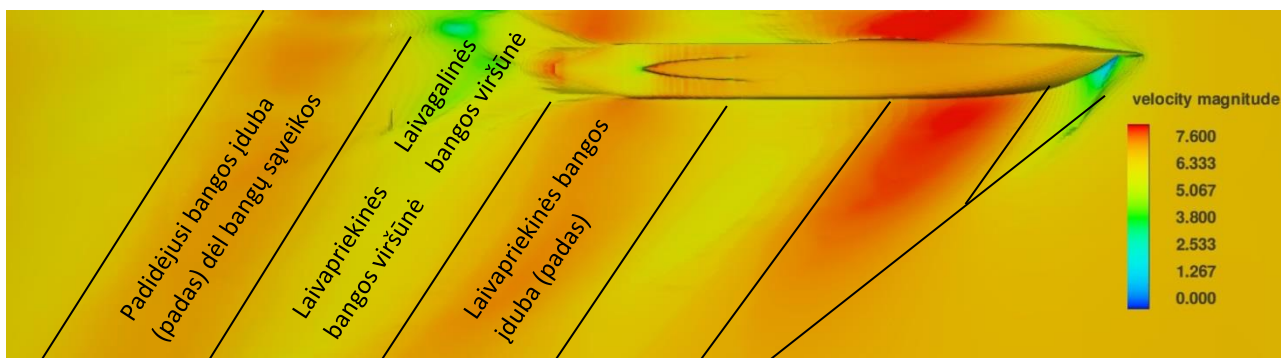
45 pav. Srauto tekės kreivių šoninis vaizdas

Galime teigti, kad visos alternatyvios skego konstrukcijos pasižymi geresniu srauto aptekėjimu. Kitavertus jos gana skirtingos, kartu skirtinga ir jų vandentalpa, todėl pasirenkant optimaliausią formą (konstrukciją) reikėtų atsižvelgti į norimus gauti rezultatus ne tik srauto aptekėjimo atžvilgiu, bet ir vandentalpos pokyčio, kurso išlaikymo stabilumo, konstrukcijos bei tankų įtaisymo reikalavimus ir kitus aspektus.

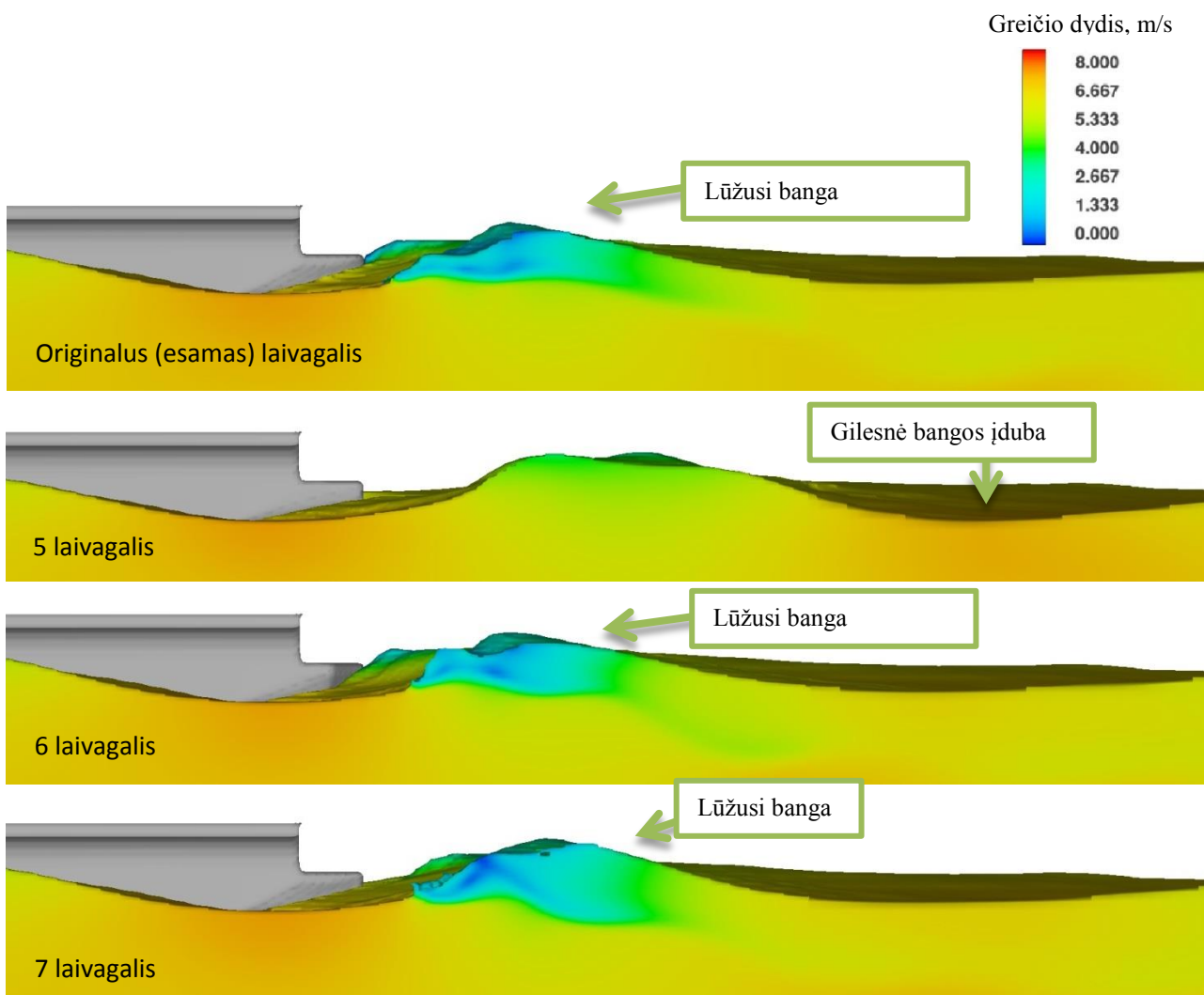
7.3 Laivagalio formų palyginimas

Tiriant laivagalį (atsikišusią laivagalio dalį-platformą), priklausomai nuo laivagalio konstrukcijos srautas ir laisvasis paviršius yra paveikiamas kur kas labiau. 3 ir 6 prieduose pateikiamas bendras tyrimų rezultatų vaizdas. Matome, kad 5 atveju t.y. trancinio laivagalio atveju skirtumas yra didžiausias. 46 pavaizduota laivapriekinės bangos schema. Matome, kad laivapriekinė banga esant 12,5 mazgų greičiui bet koku atveju patenka ties laivagalio sukelta banga. Atitolinti arba priartinti laivagalinę bangą taip, kad ji patektų ties laivapriekinės bangos įduba yra labai sudėtinga, kadangi reikia iš esmės keisti laivagalio konstrukciją, jį ilginant, ir keičiant laivo pagrindinius matmenis. Esant tranciniam laivagaliui (5 atvejis) laivagalinė banga pasislenka šiek tiek toliau, todėl patenka ties laivapriekinės bangos viršune. Tokiu atveju laivagalyje

susidariusi banga ir po jos einanti bangos įduba susidaro didesnė nei MINTIES korpuso atveju, kadangi bangos sutampa ir sumuojasi. Bangų pasipriešinimo dalis susidariusi dėl jų sąveikos turėtų būti didesnė. Tačiau laivagalinė banga dabar yra jau ne ties laivaprieikinės bangos šlaitu, todėl ji “nelūžta“ ir nesivelka laivui iš paskos “ridendamasi“. 47 pav. matome, kad trancinis laivagalis (5 atvejis) nesukelia bangos lūžio. 6 ir 7 atveju banga vis dar lūžta, o ties diametraline plokštuma sumažėjusio srauto greičio (lūžusios besiritančios bangos) plotas yra netgi didesnis. 6 priede pavaizduotas bendras laivo vandens paviršiaus vaizdas esant skirtingiems laivagaliams.

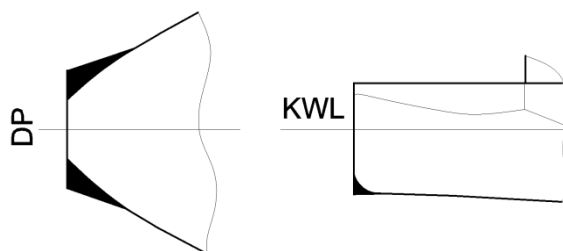


46 pav. Trancinio laivagalio (5 atveju) bangų sąveikos schema



47 pav. Diametralinės plokštumos srauto greičių pjūvis

Tranciniame laivagalyje srautas atsiskiria tvarkingai t.y. nėra jokio hidrodinaminio pėdsako, kuris vilktusi laivagaliui iš paskos. Tą matome ir 7 priede. Šeštuoju, laužtu trancinio laivagalio atveju, srautas neatsiskiria nuo laivagalio, todėl velkasi iš paskos (susidaro hidrodinaminis pėdsakas). Tokia laivagalio forma esant 12,5 mazgų greičiui yra visiškai netinkama, kadangi plokštuma, paskui kurią velkasi srautas yra žymiai didesnė, kartu ir didesnis sukeliamas pasipriešinimas, nes vandens masė velkama iš paskos yra didesnė. Nors šiuo atveju tokia konstrukcija yra visiškai netinkama, tikėtina, kad esant didesniems greičiams vandens srautas nuo laivagalio atsiskirs sklandžiai. Septintoji laivagalio konstrukcija taip pat nepalieka didelio hidrodinaminio pėdsako, kadangi srautas atsitrūksta nuo laivagalio. Šiuo atveju trancinė laivagalio plokštuma yra labai nedidelė, o srauto tekė aptekėjusi laivagalį iškart susijungia. Nors laivagalis ir yra “sausas“, tačiau srautas staigiai kyla į viršų. Tikėtina, kad realybėje srautas gali neatsiskirti (ypač esant lėtesniems greičiams), todėl šią laivagalio formą reikėtų tirti detaliau. Nepaisant to, tokia laivagalio forma nereikalauja didelių esamos korpuso formos pakeitimų, todėl pagerinti MINTIES laivagalio hidrodinamines savybes ir srauto aptekėjimą galima su minimaliais esamo korpuso pakeitimais. Tokia korpuso modernizavimo schema pavaizduota 48 pav.



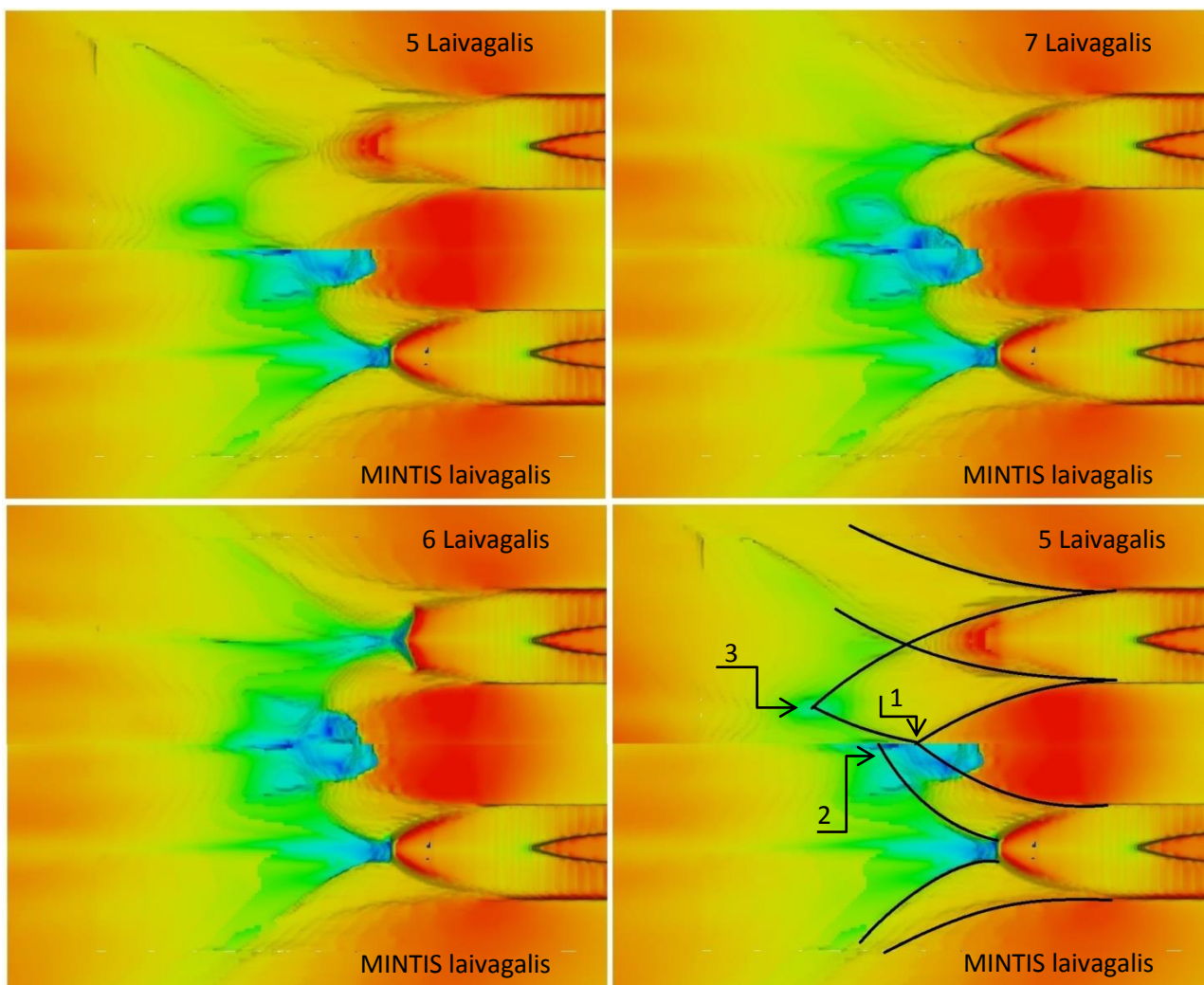
48 pav. Esamo laivagalio formos pakeitimo schema, norint pasiekti srauto atsiskyrimą. Pastaba: pavaizduota Diametralinė Plokštuma yra sąlyginė.

Norint sukelti mažesnę laivagalinę bangą ir lengvesnį srauto atsiskyrimą, laivagalio apatinę dalį reikėtų šiek tiek pakelti. Kaip buvo minėta rekomendacijose, kai Frūdo skaičius artimas 0,3 reikšmei, tracinis laivagalis turi būti šiek tiek paniręs. Tokiu atveju reikia mažiau energijos (greičio), kad srautas atsiskirtų, o srautui neatsiskyrus nuo laivagalio, hidrodinaminis pėdsakas bus mažesnis. Konstrukcine prasme tai padaryti gali būti truputi sudėtinga, kadangi reikia atsižvelgti ir į azimutinių varytuvų įtaisymo vietą ir padėtį.

Galime palyginti skirtingų laivagalio formų sukuriamas bangas laivagalyje. 49 pav. pavaizduotos laivo MINTIS laivagalio tyrimo rezultatų palyginimas su alternatyviomis laivagalio formomis. Šeštuoju ir septintuoju atveju bangų profilis labai panašus, tačiau lūžusi banga yra šiek tiek toliau nei MINTIES laivagalio atveju. Septintame laivagalio variante srautas atsiskira nuo laivagalio, matoma gili įduba iškart po laivagalio. Tracinio laivagalio atveju (5 variantas) matosi ryškus bangų skirtumas. Hidrodinaminio pėdsako nėra, banga pasislenka toliau, o jos lūžio nebėra.

Kaip buvo minėta anksčiau, už laivagalinės bangos susidaro kiek gilesnė įduba (padas), kuri šiuo atveju parodo pakitusi spalvų gama.

Detaliau pažvelgę pamatysime, jog laivagalyje susidaro dvi atskiros bangos. Viena susidaro ties laivo korpuso žiauna ir yra mažiau pastebima, kita dėl laivo korpuso formos pabaigos (laivagalio). MINTIS korpuso atveju abi bangos patenka maždaug ties laivapriekio bangos nuolydžiu (vieta pažymėta 2 numeriu 49 paveiksliuke), todėl lūžusi banga ir sumažėję srauto greičiai joje yra šių bangų pasekmė. Trancinio laivagalio (5 variantas) atveju taip pat pastebima šių bangų sąveika. Banga susidariusi ties laivo korpuso žiauna nukeliavusi į DP “atsimuša” sąveikaudama su identiška kito korpuso banga (1 numeris 49 paveiksliuke). “Atsimušusi” banga tolsta nuo Diametralinės Plokštumos ir kertasi su laivagalio sukelta banga. Susikirtimo vietoje pastebimas nedidelis bangos iškilimas ir sumažėjęs srauto greitis (3 numeris). Norint sumažinti šių bangų sąveiką reikia optimizuoti ne tik laivagalį, tačiau keisti ir apvadų formą laivagalyje, siekiant sumažinti laivo korpuso šonuose (ties žiauna) susidariusias bangas. Tačiau, toks drastiškas laivo korpuso formos pakeitimas yra sunkiai įgyvendinamas, ir turėtų būti tiriamas (optimizuojamas) projektavimo eigoje t.y. prieš pastatant laivą.



49 pav. Laivagalio srauto greičių (bangų) palyginimas

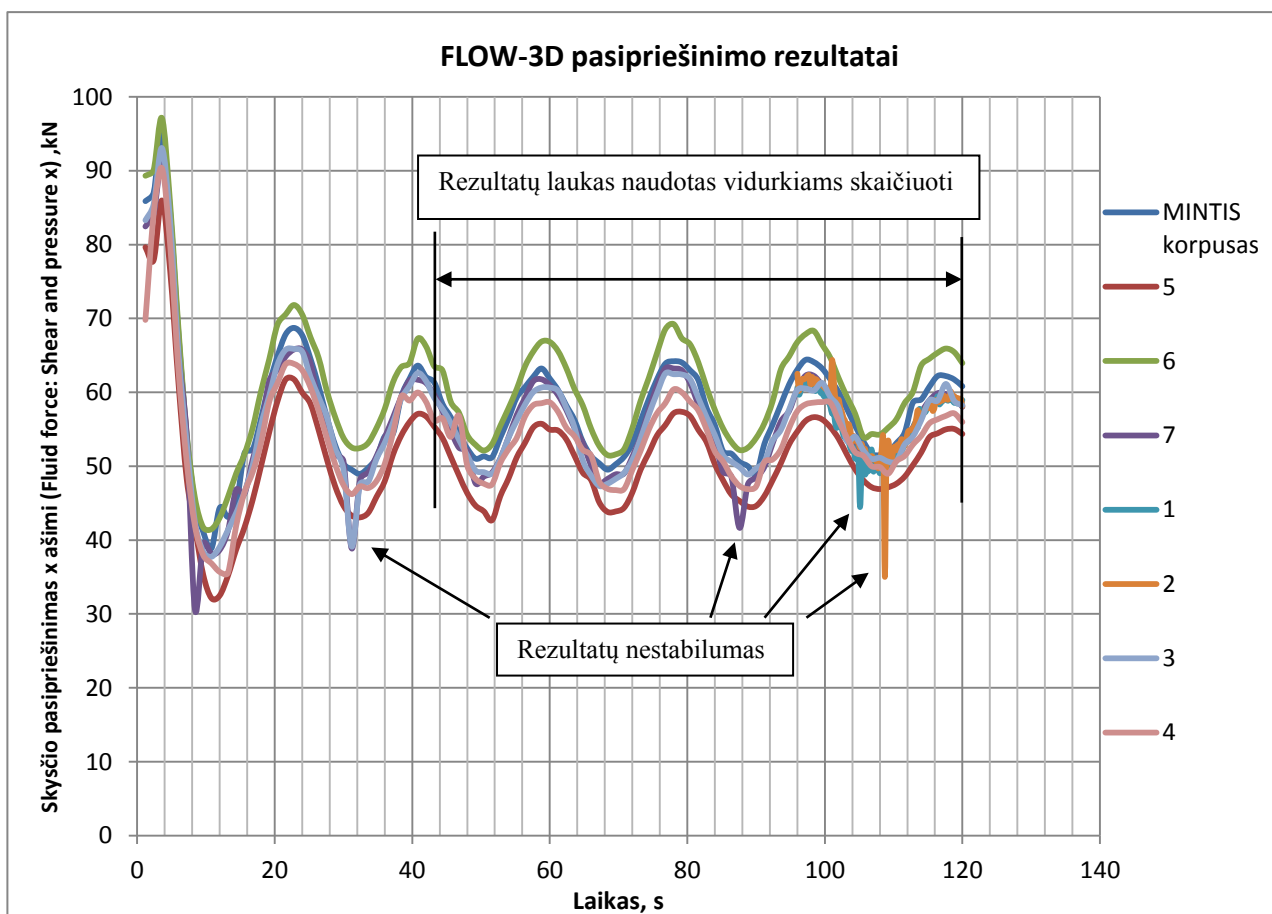
Ištyrę visus laivagalio variantus, galime teigti, kad geriausiomis hidrodinaminėmis savybėmis ir srauto atsiskyrimu pasižymi 5 laivagalio variantas. Nepaisant to, kad šiuo atveju laivapreikinės ir laivagalinės bangos sąveika yra didesnė, tikėtina, kad sukeltas pasipriešinimas dėl srauto atsiskyrimo bus mažesnis. Septintuoju laivagalio atveju taip pat pasiekiamas srauto atsiskyrimas, tačiau išlieka banga esanti ties DP. Šis variantas reikalauja mažiausių esamo laivagalio pakeitimų. Šeštasis laivagalio variantas yra netinkamas esant 12,5 mazgų greičiui dėl stipraus hidrodinaminio pėdsako.

7.4 Korpuso sukkelto pasipriešinimo palyginimas

Galime gauti pakankamai daug informacijos iš vizualinio eksperimento duomenų pateikimo, tačiau būtina rezultatus įvertinti skaitiškai. Skirtingų korpuso modifikacijų sukeliama pasipriešinimą įvertinsime pasirinkę x *fluid force: pressure+shear* parametrą. Ši duomenų išėiga pateikia laivo korpuso 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 pateikiamiami tekstiniu formatu, kurį importuosime į MS excel programą ir sudarysime visų korpuso formos atvejų sukeliama slėgio priklausomai nuo laiko grafiką. Gautas grafikas pavaizduotas 50 pav. Antruoju ir trečiuoju skego atveju dėl netinkamų eksperimento nustatymų negauta skysčio pasipriešinimo duomenų, todėl šiuos rezultatus gausime panaudojant esamus eksperimento duomenis ir funkciją *restart simulation*. Šioms korpuso formoms eksperimentas perskaičiuojamas nuo 96 sekundės. Tokiu atveju gauta paklaida gali būti didesnė, tačiau vis tiek galime palyginti rezultatus su kitais skego variantais šioje laiko atkarpoje (nuo 96 sekundės).

Iš grafiko matome, kad prasidėjus simuliacijai pasipriešinimas (slėgis) smarkiai pakyla, o vėliau šiek tiek nusistovi, tačiau išlieka stiprūs svyravimai iki pat simuliacijos laiko pabaigos. Tikėtina, kad šie svyravimai nusistovės po tam tikro laiko tarpo, tačiau iš grafiko matyti, kad tai truktų labai ilgai, todėl daryti labai ilgą eksperimento laiką netikslinga. Šių svyravimų atsiradimą galėjo lemti neteisingas eksperimento sąlygų sudarymas. Tikėtina, kad ribotos eksperimento ribos galėjo sukelti viso vandens skysčio svyravimus, kadangi tiriamas skystis yra nespūdas (nesugeria energijos), o energijai (svyravimams) išsisklaidyti nėra kur, nes skystis įteka ir išteka iš x plokštumų fiksuotų greičiu. Visos kitos krašto ribos yra uždaros, todėl bangos ir skystyje esanti energija „atsimuša“ į eksperimento krašto ribas, susidaro bangų „aidas“. Sudarius laisvojo paviršiaus animaciją, eksperimento pradžioje vizualiai matyti bangų svyravimai ir „aidas“, kuris po tam tikro laiko tarpo tampa nebepastebimas, tačiau svyravimai nėra tokie akivaizdūs kaip

pateiktame grafike. Kitas rezultatų nepastovumas pastebimas skaitinių duomenų netolygume, kadangi pasipriešinimo reikšmės vietomis smarkiai kinta. Pirmuoju ir antruoju skego atveju eksperimento duomenų žingsnis laiko atžvilgiu yra kur kas mažesnis, kadangi eksperimento trukmė trumpesnė (nuo 96 sekundės), todėl rezultatų nukrypimai (kreivės grubumas) yra labiau pastebimi.



50 pav. FLOW-3D pasipriešinimo rezultatai (pusei korpuso)

Norint gauti pakankamai tikslius rezultatus reikia juos apdoroti, pašalinant svyravimus ir skaitinių reikšmių nepastovumą. Šiuo atveju nėra aišku, ar svyravimai ir nestabilumas yra dėl blogo eksperimento sudarymo, ar dėl pačios skaičiavimo programos (metodo) nestabilumo/nepastovumo. Nors pasipriešinimas svyruoja, matome, kad skirtingų konstrukcijų sukeliama slėgio x ašimi svyravimų dažnis ir fazė sutampa. Tokiu atveju galime nesunkiai palyginti skirtingos korpuso formos sukiamą pasipriešinimą esamos konstrukcijos atžvilgiu. Tam, kad rezultatų palyginimas būtų lengvesnis ir suprantamesnis apskaičiuosime pasipriešinimo vidurkius nuo 43 eksperimento sekundės. Tokių būdu pašalinsime eksperimento pradžioje susidariusius aukštus svyravimus, be to kreivių pabaigos ir pradžios reikšmės bei padėtyms maždaug sutaps. Vidurkiai apskaičiuojami komp. programoje MS excel. Pirmuoju ir antruoju skego atveju, dėl ribotų duomenų (pasipriešinimo rezultatai nuo 96 iki 120 tyrimo sekundės), rezultatus gausime palyginę su trečio ir ketvirto skego rezultatais ties 96-120 s. ir 43-120 s. laiko intervalais. Tokiu atveju pirmo arba antro skego pasipriešinimo vidurkis skaičiuotas taip (10 formulė):

$$\bar{R}_T = \bar{I}_{96-120} + \frac{\bar{3}_{43-120} - \bar{3}_{96-120} + \bar{4}_{43-120} - \bar{4}_{96-120}}{2}, \quad (10)$$

čia \bar{I}_{96-120} – 1 Skego varianto pasipriešinimo vidurkis nuo 96 iki 120 eksperimento sekundės (antro skego atveju atitinkamai imami antro skego rezultatai);

$\bar{3}_{43-120}$ – 3 skego pasipriešinimo vidurkis nuo 43 iki 120 eksperimento sekundės;

$\bar{3}_{96-120}$ – 3 skego pasipriešinimo vidurkis nuo 96 iki 120 eksperimento sekundės;

$\bar{4}_{43-120}$ – 4 skego pasipriešinimo vidurkis nuo 43 iki 120 eksperimento sekundės;

$\bar{4}_{96-120}$ – 4 skego pasipriešinimo vidurkis nuo 96 iki 120 eksperimento sekundės.

Iš gautų rezultatų galime sudaryti lentelę, kurioje palyginsime skirtingų korpuso laivagalio ir skego modifikacijų rezultatus. Tai leis lengviau suprasti ir palyginti hidrodinaminius ir kitus konstrukcijų pakitimus. Lentelė sudaroma ir skaičiuojama MS excel programoje. Naudojami duomenys iš FLOW-3D ir Delftship kompiuterinių programų.

2 lentelė. Gauti tyrimo duomenys, kai $d=2,8\text{m}$, $v_s=6,43$ (12,5 kt.).

	Dim.	0	SKEGAS				LAIVAGALIS		
			1	2	3	4	5	6	7
Vandentalpa (D)	m ³	607,9	603,5	606,4	606,2	602,1	610,1	607,8	608,0
Vand. pokytis	%	-	-0,7	-0,3	-0,3	-1,0	0,4	0,0	0,0
Suvilgyto pav. plotas (D)	m ²	615,1	603,6	609,5	608,4	607,0	619,9	614,6	615,6
Suv. pav. pokytis	%	-	-1,9	-0,9	-1,1	-1,3	0,8	-0,1	0,1
Pasipriešinimas vid. (SSD)	kN	114,0	105,9	107,4	110,2	106,9	101,3	120,0	110,0
Pasipriešinimo pokytis	%	-	-7,7	-6,3	-3,5	-6,7	-12,6	+4,9	-3,7

Pastabos: D – žymi DELFTship rezultatus.

SSD – žymi FLOW-3D eksperimentų rezultatus.

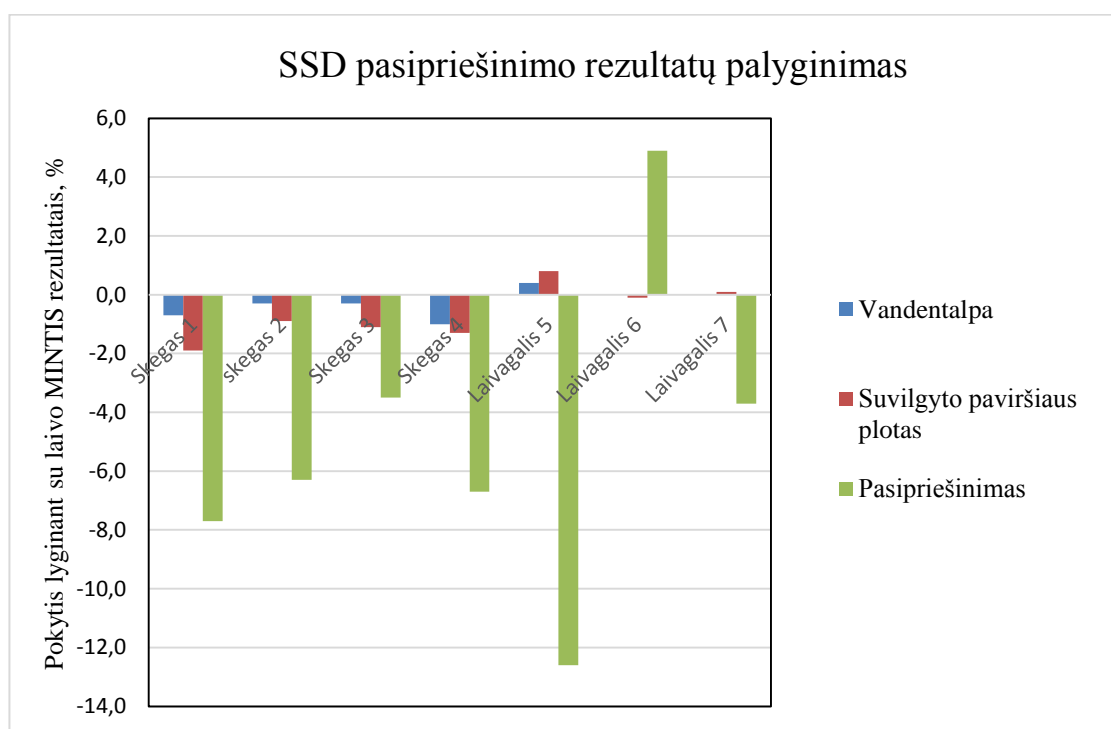
0 – pradinis, nepakeistas laivo MINTIS korpusas.

1 ir 2 skego atvejais, apskaičiuotas pasipriešinimas gali būti mažiau tikslus lyginant su kitais atvejais.

Iš lentelės duomenų matome, kad visi, išskyrus šeštąjį laivagalio variantą pasižymi mažesniu pasipriešinimu. Skego atvejais pasiektas apie 3-8% pasipriešinimo sumažėjimas, laivagalių apie 4-13%. Reikia paminėti, kad kartu su pasipriešinimu, pakitusios ir kitos korpuso charakteristikos. Matome, kad daugeliu atveju pakitusi ir vandentalpa bei suvilgyto paviršiaus plotas. Kartu su pakitusia laivo korpuso forma, turėtų kisti ir laivo formos koeficientai bei svorio ir vandentalpos centrai, tačiau į šiuos aspektus neatsižvelgsime, kadangi tai nėra tiesiogiai susiję su šiuo tiriamuoju darbu ir jo uždaviniais.

Sudarysime grafiką, kuriame pavaizduosime visus 2 lentelėje pateiktus charakteristikų pokyčius. Tai leis lengviau vizualiai įvertinti pasipriešinimo priklausomybę nuo vandentalpos ir

suvilgyto paviršiaus ploto. Iš sudaryto grafiko (51 pav.) matome, kad trancinis laivagalis (t.y. 5 variantas) išsiskiria iš kitų tuo, jog laivo vandentalpa ir suvilgyto paviršiaus plotas padidėja. Tai reiškia, kad sumažėjęs pasipriešinimas yra hidrodinamiškai teisingos korpuso formos (laivagalio) pasekmė. Skego atvejais vandentalpa ir suvilgytas paviršius sumažėja, todėl dalis sumažėjusio pasipriešinimo gali susidaryti būtent dėl šios priežasties. Lieka neaišku, kurią sumažėjusio pasipriešinimo dalį sudaro pagerėjęs srautas. Tačiau galime išlaikyti minimaliai pakitusią vandentalpą ir suvilgyto paviršiaus plotą apjungdami 5 laivagalio variantą ir kurį nors skego variantą į vieną korpusą. Šiuo atveju, dėl trancinio laivagalio padidėjusi vandentalpa bus atsverta mažesnio skego, todėl vandentalpa ir suvilgytas paviršiaus plotas pakis minimaliai, o bendras korpuso pasipriešinimas sumažės dar labiau, ir gali siekti net apie 20% ir daugiau. Vis dėl to, tokią korpusą reiktų detaliai iširti, kadangi nėra žinoma pakitusio skego ir laivagalio sąveika.



51 pav. Alternatyvių korpuso variantų charakteristikų palyginimas

Palyginę FLOW-3D pasipriešinimo rezultatus nustatėme, kad esant 12,5 mazgų greičiui ir 2,8 metrų grimzlei visų skego variantų pasipriešinimas sumažėjęs (2 lentelė). Pagal gautus tyrimo rezultatus galime trumpai apibūdinti kiekvieną iš tirtų variantų:

- Pirmasis skegas pasižymi mažiausiu sukeliamu pasipriešinimu, tačiau jo suvilgyto paviršiaus plotas taip pat labiausiai sumažėjęs. Srauto aptekėjimas gana geras, tačiau dėl mažo skego, gali būti suprastėjęs kurso išlaikymo pastovumas.
- Antrojo skego vandentalpos ir suvilgyto paviršiaus pokytis yra mažiausias, todėl galima daryti prielaidą, kad didžioji jo sumažėjusio pasipriešinimo dalis yra dėl srauto pagerėjimo. Šis skegas panašus į esamą laivo MINTIS skegą, todėl modernizuojant laivą, galima pakeisti

tik dalį egzistuojančio skego. Reikia paminėti ir tai, kad redaguojant šį skegą šiek tiek sumažėjo skego pabaigos plokštuma, o tai, tam tikra prasme, yra korpuso formos redagavimo klaida. Dėl to dalis sumažėjusio pasipriešinimo gali būti dėl šios plokštumos sumažėjimo. Be to, pirmo ir antro skego atvejų nustatytos pasipriešinimo reikšmės yra apytikslės dėl kitokios nustatymo metodikos.

- Trečiasis skegas sukelia didžiausią pasipriešinimą iš visų alternatyvių skego variantų. Taip pat jo konstrukcija geometriškai yra kiek sudėtingesnė, kadangi skego kampai yra lenkti dvejomis kryptimis (ašimis).
- Ketvirtas skegas pasižymi gan ženkliu vandentalpos ir suvilgyto paviršiaus ploto sumažėjimu, atitinkamai jo pasipriešinimo sumažėjimas aukštas. Šis skegas yra gan siauras, plonas ir ilgas, panašus į peleką, tad tikėtina, kad kurso išlaikymas bus geresnis. Kitavertus tokia plona skego konstrukcija gali būti labiau pažeidžiama.
- Penktas, trancinis laivagalis gan smarkiai sikiriasi nuo pradinio laivagalio tiek savo konstrukcija, tiek hidrodinaminėmis savybėmis. Ši laivagalio konstrukcija atskiria srautą efektyviai, todėl srautas nėra “tempiamas“ trancinio paviršiaus, be to išvengiama kitais atvejais susidariusi laivagalinė banga ties Diametraline Plokštuma.
- Šeštas laivagalis netinkamas esant 12,5 mazgų greičiui, kadangi greitis yra per mažas, tam, kad srautas atsiskirtų. Ši laivagalio forma sukelia didesnę pasipriešinimą
- Septintas laivagalio variantas šiek tiek sumažina pasipriešinimą. Nors šis pasipriešinimo sumažėjimas nėra toks akivaizdus kaip trancinio laivagalio atveju, o laivagalinė banga ties DP vis dar susidaro, srautas geba atitrūkti nuo laivagalio. Ši laivagalio forma panaši į esamo laivo MINTIS laivagalį, todėl norint modernizuotį laivą esamo laivagalio forma gali būti palyginti nesudėtingai pakeičiama. Vis dėl to srauto atitrūkimas neatrodo pakankamai patikimas, todėl modernizavimo atveju šis variantas (kaip ir visi kiti) turėtų būti tiriamas detaliau.

Tikėtina, kad tikrasis laivo pasipriešinimas bus didesnis dėl kelių priežasčių. Visų pirma gautuose tyrimų duomenyse trinties pasipriešinimas (*shear*) yra labai mažas (mažiau nei 1%). Taip pat korpuso neįvertinamos išsikišančios dalys (pavairavimo mechanizmai ir kt.). Be to simetrijos krašto riba ties Diametraline Plokštuma gali slopinti sūkurius neleisdama jiems kirsti minėtos plokštumos.

VIII. IŠVADOS

Moksliniame tiriamajame darbe surinkta ir pateikta aktuali informacija apie laivagalio srauto tyrimus ir optimizaciją, sudaryta literatūros apžvalga ir analizė. Apžvelgta laivo eigumo teorija, laivagalio konstrukcijos ir rekomendacijos, reikalingos siekiant suprojektuoti optimalią laivagalio formą.

Nustatyta, kad laivui MINTIS srautas bus tirtas kompiuterine SSD programa FLOW-3D. Sudaryti preliminarūs eksperimentai siekiant nustatyti eksperimento sudarymo nustatymus programoje FLOW 3D. Tyrimui sudarytas tinklulis iš trijų skirtingo detalumo blokų, kurio bendras elementų skaičius yra 4 305 070.

SSD eksperimentu nustatyta, kad esant 12,5 mazgų (6,43 m/s) greičiui ir 2,8 metrų grimzlei laivo korpuso patiriamas pasipriešinimas yra 114 kN. Laivagalyje susidaro hidrodinaminis pėdsakas. Srautas pakyla ir susidaro laivagalinė banga, atsikišusi laivagalio dalis (platforma) gali būti užpilama. Tarp laivo korpusų susidariusi banga dalinai sutampa su laivagaline banga, todėl laivagalyje ties DP susidaro gana didelė banga, kuri lūžta ir velkasi laivo korpusui iš paskos. Taip pat srauto aptekėjimas ties skegu yra nepriimtinas, kadangi srautas staiga kreičia savo krypti ties skego briaunomis.

Atsižvelgiant į rezultatus sudaryti keturi skego ir trys laivagalio formos variantai. Ištirta ir nustatyta, kad alternatyvių korpuso formų pasipriešinimas (x krypties atžvilgiu) sumažėjo maždaug nuo 3,5% iki 12,6%. Mažiausiu sukeliamu pasipriešinimu pasižymi 1 skego konstrukcija kurios pasipriešinimas yra 7,7% mažesnis už esamo skego, tačiau kartu mažesnė vandentalpa ir suvilgytas paviršiaus plotas. Trancinis laivagalis sumažina pasipriešinimą 12,6%, nes srautas atsiskiria nuo laivagalio, todėl srautas nėra „velkamas“ iš paskos. Laužtas trancinis laivagalis sukėlė didesnę pasipriešinimą nei esama konstrukcija. Šio laivagalio plokštuma yra didesnė, todėl pasipriešinimas ir velkamas srautas yra ženkliai didesni, tad esant 12,5 mazgų greičiui ši konstrukcija netinkama. Bendras laivo korpuso pasipriešinimas turėtų būti didesnis, kadangi gauta trinties pasipriešinimo dalis turėtų būti didesnė. Detaliau tiriant, optimizuojant, bei derinant optimalius laivagalio ir skego variantus pasipriešinimą galima sumažinti dar labiau.

Padidėjęs laivo korpuso naudingumas ir sumažėjęs pasipriešinimas nevisada duos didesnę greitį, nes nuo sąlygų varytuvo veikimo zonoje, jo naudingumas gali padidėti arba sumažėti, todėl tikslesniam laivo greičio pokyčiui reikėtų nagrinėti varytuvą ir korpusą kartu.

Norint tiksliau ir kokybiškiau optimizuoti laivo MINTIS laivagalį reikia tobulinti tyrimo metodiką, bei detaliau ištirti laivagalio ir skego formos bei matmenų įtaką sukeliama pasipriešinimui. Rekomendacijos mokslinio tiriamojo darbo tobulinimui ir tolesniam nagrinėjimui pateikiamos sekančiame skyriuje.

REKOMENDACIJOS

Norint labiau ir tiksliau išnagrinėti korpuso hidrodinamines savybes laivagalyje ir jį optimizuoti reikia:

- Iširti esamo korpuso hidrodinamines savybes ir srauto aptekėjimą esant skirtingai grimzlei ir skirtingiems greičiams. Tai leistų nustatyti kokiomis sąlygomis (priklausomai nuo laivo pakrovimo ir greičio) laivagalinė banga pasiekia piką t.y. hidrodinaminės korpuso savybės ir srauto aptekėjimas yra blogiausi ir atvirkščiai. Taip pat kritinį greitį, ties kuriuo srautas atsiskiria nuo laivagalio.
- Detaliau išnagrinėti srautą skego ir tranco zonoje. Detalesnis tinklelis šiose vietose leistų labiau atkartoti aštrias korpuso briaunas, o tai gali įtakoti tikslesnius srauto aptekėjimo rezultatus sudetingesnės geometrijos vietose.
- Norint geriausiai optimizuoti skegą, reikėtų tirti ne tik srauto aptekėjimą, bet ir skego įtaka laivo jūrinėms savybėms. Turėtų būti tiriama skego įtaką kurso išlaikymo stabilumui bei manevringumui esant skirtingiems varytuvų režimams (padėčiai).
- Sudaryti eksperimentą kartu su veikiančiu varytuvu laivagalyje. Esant veikiančiam varytuvui srauto aptekėjimas laivagalyje gali ženkliai skirtis, todėl rekomenduojama tirti varytuvą ir laivo korpusą kartu. Taip pat reikia tirti ne tik laivo korpuso pasipriešinimą ir aptekėjimą, bet ir srauto įtaką varytuvo propulsiniam naudingumui, kadangi sumažėjęs korpuso pasipriešinimas gali reikšti prastesnę varytuvo darbą dėl kitokio srauto.
- Detaliau išnagrinėti optimizuotas laivo korpuso konstrukcijas, sudarant daugiau tiriamų variantų. Tokiu būdu galima iširti optimaliausias skego ir laivagalio konstrukcijas ir jų matmenų bei geometrijos įtaką pasipriešinimui.
- Norint maksimaliai tiksliai nustatyti laivo korpuso padėtį eigoje, reikėtų atsižvelgti į korpusą veikiančius momentus ir jėgas, bei atitinkamai pakoreguoti laivo padėtį (diferentą ir grimzlę).
- Tiksliausi rezultatai gaunami derinant SSD, eksperimentinius ir natūrinius tyrimus. Rekomenduojama SSD tyrimus daryti lygiagrečiai su eksperimentiniais, bei derinti (palyginti) juos tarpusavyje.
- Norint sumažinti SSD skaičiavimo laiką, galima sumažinti eksperimento trukmę.
- Detaliau iširti trinties pasipriešinimo dedamąją (*shear*). Labai mažos šio pasipriešinimo reikšmės SSD rezultatuose gali iškreipti skirtingų korpuso formų pasipriešinimo rezultatus.

LITERATŪRA

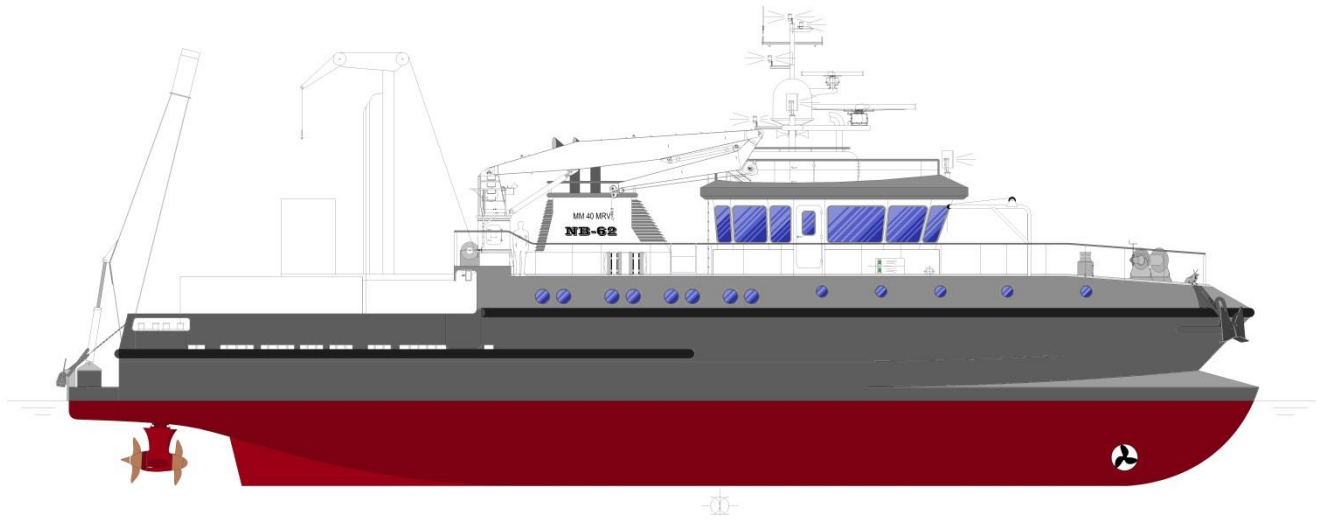
1. Auke van der Ploeg. 2014. Optimization of the STREAMLINE tanker using RANS/FS computations. Mulheim: 16th NuTTS.
2. Bakker A. 2006. Applied Computational Fluid Dynamics. [žiūrėta 2015 m. Gegužės 23d.] Prieiga per internetą: <<http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/07-mesh.pdf>>
3. Baltijos slėnis [žiūrėta 2015 m. Gegužės 23d.] Prieiga per internetą: <http://balticvalley.lt/?page_id=1642>
4. Bandringa H., Verstappen R., Wubs F., et al. 2012. On novel simulation methods for complex flows in maritime applications. Corton: 15th NuTTS.
5. Barkevičius S. 2011. Daugiakorpusių laivų korpusų įtakos eigumui tyrimas. Magistro baigiamasis darbas. Klaipėda: Klaipėdos Universitetas.
6. Bertram V. 2012. Practical ship hydrodynamics. Oxford: Butterworth-Heinemann.
7. Boutanios Z., R. Van't Veer. 2012. CFD Analysis of a U-shaped Water Tunnel Bilge Keel. Corton: 15th NuTTS.
8. Čerka J. 2005. Laivo eigumas. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla.
9. Eyres D.J. 2001. Ship construction. Oxford: Butterworth-Heinemann.
10. Flow Science [interaktyvus], [žiūrėta 2015 m. Gegužės 23d.] Prieiga per internetą: <<http://www.flow3d.com/home/resources/cfd-101>>
11. Frits H. Post, Theo van Walsum. 1993. Fluid flow visualization. Focus on Scientific Visualization: Berlin. [žiūrėta 2015 m. Gegužės 23d.] Prieiga per internetą: <http://www.researchgate.net/profile/Frits_Post/publication/221025525_Fluid_Flow_Visualization/links/0046351a7c352c6c9e000000.pdf>
12. Garth C. An Introduction to Flow Visualization. University of California. [žiūrėta 2015 m. Gegužės 23d.] Prieiga per internetą: <<http://graphics.cs.ucdavis.edu/~joy/ecs277/other-notes/ecs277-1.pdf>>
13. Haase M., Binns J., Thomas G., et al. 2012. Resistance Prediction of Medium-speed Catamarans Using Free-surface Viscous Flow Simulations. Corton: 15th NuTTS.
14. Hochkirch K., Bertram V., Mallol B. 2013. Reflections on the Importance of Full-Scale Computations for Ship Flows. Mulheim: 16th NuTTS.
15. You-Sheng Wu, Wei-Cheing Cui, Guo-Jun Zhou. 2001. Practical ship design and Other Floating Structures. Shanghai: Tong University.
16. Kobylinski L. 2013. Problems of handling ships equipped with azipod propulsion systems. Prace naukowe politechniki warszawskiej. [žiūrėta 2015 m. Gegužės 23d.] Prieiga per internetą: <http://www.wt.pw.edu.pl/content/download/1581/10989/file/Z95-art_21.pdf>

17. Krukoniš A. 2010. Baigtinių skirtumų metodo skaičiavimo būdų tyrimas. Vilnius: Vilniaus Gedimino technikos universitetas. [žiūrėta 2015 m. Gegužės 23d.] Prieiga per internetą: <<http://www.mla.vgtu.lt/index.php/mla/article/viewFile/mla.2010.023/pdf>>
18. Marion C. James, Stephen R. Turnock, Dominic A. Hudson. 2012. Design of retrofit devices using CFD, validated with wind tunnel tests. Corton: 15th NuTTS.
19. Molland A. 2008. The maritime engineering reference book. Hungary: Butterworth-Heinemann.
20. Nishikawa T., Yamade Y. Sakuma M. Ir kt. 2012. Fully Resolved Large Eddy Simulation as an Alternative to Towing Tank Resistance Tests – 32 Billion Cells Computation on K computer. Mulheim: 16th NuTTS.
21. Numerical Propulsion Test for a Multi Purpose Research Catamaran. The Hamburg Ship Model Basin.
22. Paprastųjų diferencialinių lygčių sistemų kraštinio uždavinio skaitiniai sprendimo metodai. Vilniaus Gedimino Technikos Universitetas: konspektai. [žiūrėta 2015 m. Gegužės 23d.] Prieiga per internetą: <http://www.techmat.vgtu.lt/konspektai/difskM/Paskaita_DLSM_5.pdf>
23. Pelaez G., Martin E., Lamas A. M., et al. 2010. Preliminary study of a new stern device to improve efficiency in a fishing vessel. First International Symposium on Fishing Vessel Energy Efficiency. [žiūrėta 2015 m. Gegužės 23d.] Prieiga per internetą: <http://www.academia.edu/819205/Preliminary_study_of_a_new_stern_device_to_improve_efficiency_in_a_fishing_vessel>
24. Rawson K.J., Tupper E.C. 2001. Basic ship theory. Oxford: Butterworth-Heinemann.
25. Ruggeri F., Challela M., Sampaio C.M.P. et al. 2012. Parametric Model and CFD Integrated Process for WED Optimization. COMPIT 2012.
26. Sakamoto N., Kawanami Y., Uto S. 2012. Investigations of Design Criteria for Ships with Split-Stern by RANS. Corton: 15th NuTTS.
27. Schneekluth H., Bertram V. 1998. Ship Design for Efficiency and Economy. Oxford: Butterworth-Heinemann.
28. Sileo L. Steen S. 2009. Numerical investigation of the interaction between a stern tunnel thruster and two ducted main propellers. Trondheim: Department of Marine Technology, Norwegian University of Science and Technology.
29. Slade S. 1998 [žiūrėta 2015 m. Gegužės 23d.] Prieiga per internetą: <http://www.navweaps.com/index_tech/tech-014.htm>
30. Stonkus V. 2006. Laivo teorija. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla.

31. Strake B., Raven H., Auke van der Ploeg. 2007. Computation of transom-stern flows using a steady free-surface fitting RANS method. Michigan: 9th International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics.
32. Strake B., Windt J. 2003. Two examples of hull-form optimization using viscous-flow computations. London: Computational Fluid Dynamics Technology in Ship Hydrodynamics.
33. Tanasescu H., Tanasescu O. 2008. Stern flow improvement by using some new, original concepts and ideas, in the world of ship hydrodynamics. Bucharest: 5th National Conference of Romanian Hydropower Engineers.
34. Tregde V. 2003. Aspects of Ship Design Optimization of Aft Hull with Inverse Geometry Design. Faculty of Engineering Science and Technology, Department of Marine Technology.
35. Tupper E. 2002. Introduction to Naval Architecture. Oxford:Butterworth-Heinemann.
36. Uithof K., P. G. van Oossanen and Bergsma F. 2015. The feasibility and performance of a trimaran yacht concept equipped with a hull vane. Design & Construction of Super & Mega Yachts. Genoa. [žiūrēta 2015 m. Gegužēs 23d.] Prieiga per internetu: <<http://www.oossanen.nl/beheer/wp-content/uploads/2015/05/RINA-DCSMY-2015-Paper-vRevised.pdf>>
37. Valkhof H.H. Minguito E., Kooiker K. 2006. New Promising Generation of Twin-Gondola LNG Carriers Optimized with the Aid of CFD Calculations. Maritime Technology Conference and Expo and Ship Production Symposium.
38. Viscous resistance: Flow around ship hull. 2010. [žiūrēta 2015 m. Gegužēs 23d.] Prieiga per internetu: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779577244303/RP_10_Lecture3.pdf>
39. Visonneau M. 2005. A step towards the numerical simulation of viscous flows around ships at full scale - recent achievements within the european union project effort. Marine CFD: Southampton.

PRIEDAI

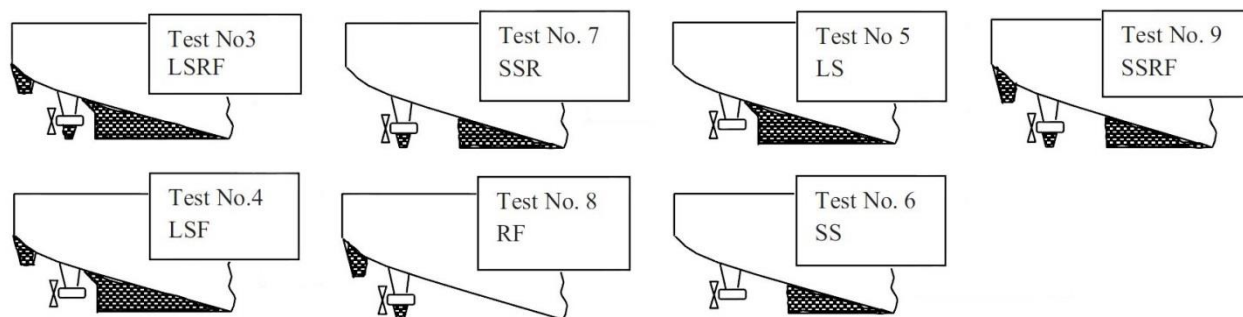
1 priedas. Pagrindiniai laivo MINTIS duomenys



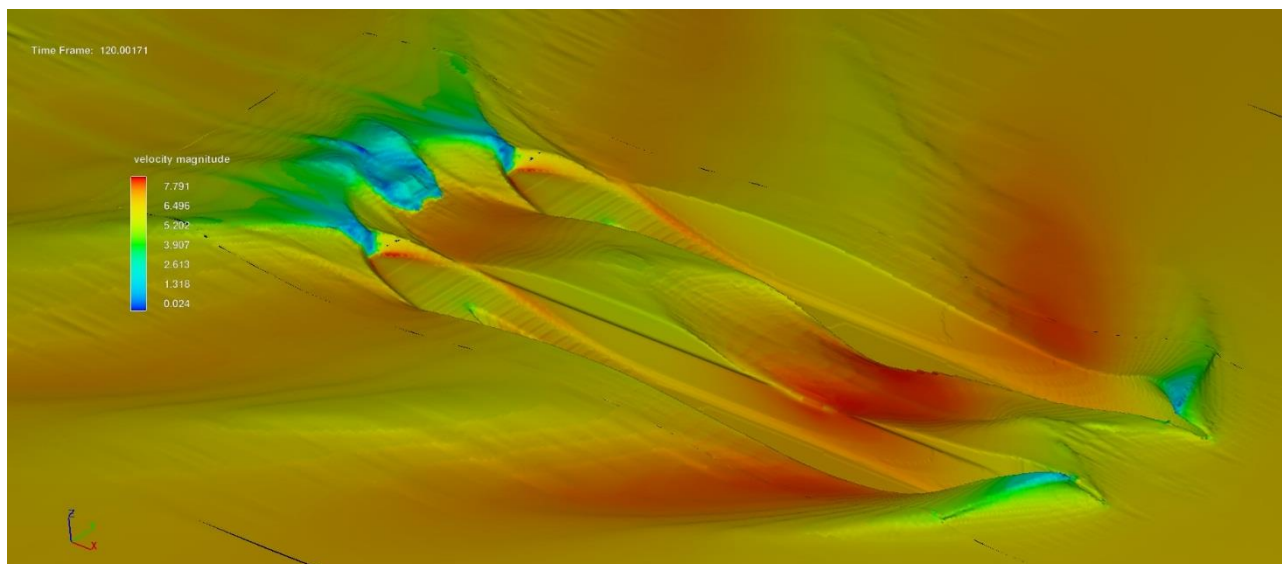
Pagrindiniai techniniai duomenys:

Laivo tipas	katamaranas	
Ledo klasė	ICE-1C	
Didžiausias ilgis	L_{max} , m	38,7
Didžiausias plotis	B_{max} , m	12
Didžiausia grimzlė	d_{max} , m	2,8
Autonomiškumas	R, dienos	21
Plaukiojimo nuotolis	R, n miles	2500
Bendras galinumas	P_{bendr} , kW	~1800
Maksimalus greitis	V_{max} , knt	12,5
Ekonominis greitis	V_{eco} , knt	11,5
Bendrasis tonažas	GT	493
Galinio denio plotas	$A_{aft\ deck}$, m ²	120
Bio laboratorijos plotas	$A_{bio\ lab}$, m ²	15,8
Geo laboratorijos plotas	$A_{geo\ lab}$, m ²	16,6
A-rėmo aukštis	h_{Aframe} , m	8
KB krano kėlimo galia	SWL_{PS} , t	6
DB krano kėlimo galia	SWL_{SS} , t	12
Gervės, 2 vnt.	SWL, t	7
Gervės, 2 vnt.	SWL, t	3
Hidrografinė gervė	SWL, t	1
Įgula	žm.	6
Mokslinis personalas	žm.	12

2 priedas. Tirtos gazovežio skego konfiguracijos [16]

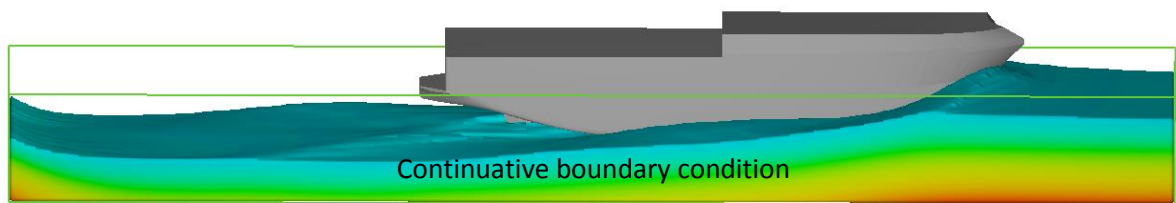
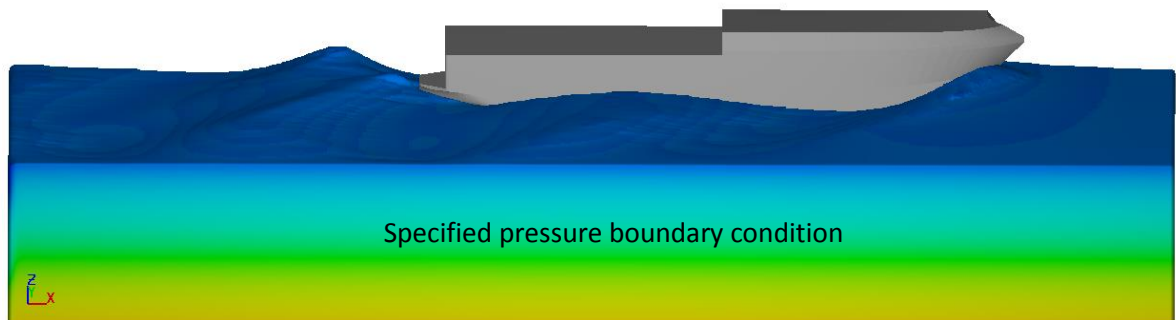


3 Priedas. Bendras tyrimo (laisvojo paviršiaus) vaizdas

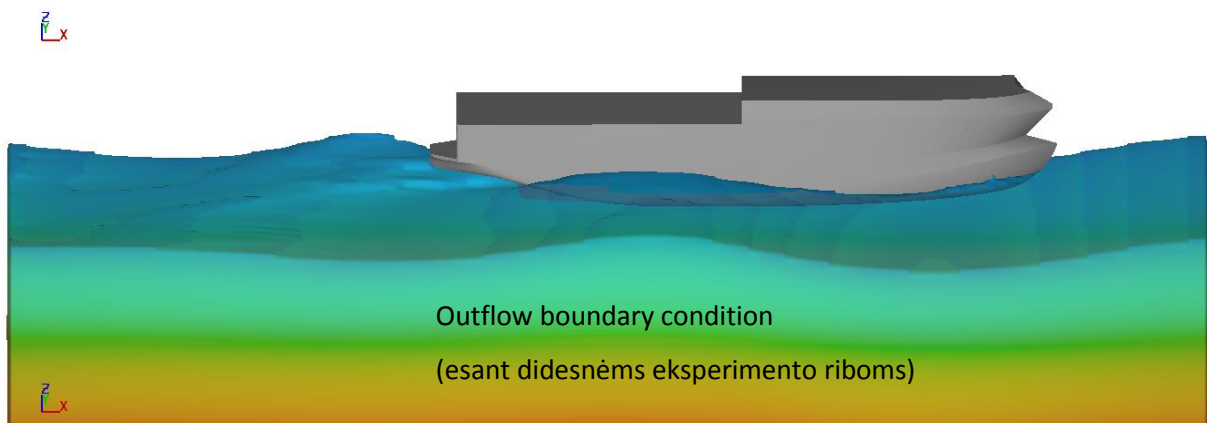
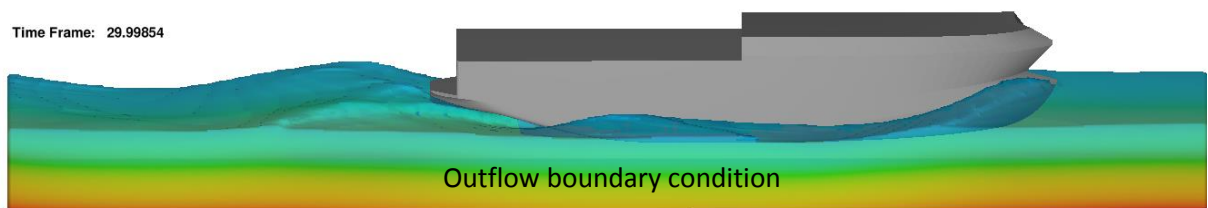


4 priedas. Rezultatai esant skirtingiems FLOW-3D krašto ribos (*boundary conditions*) nustatymams

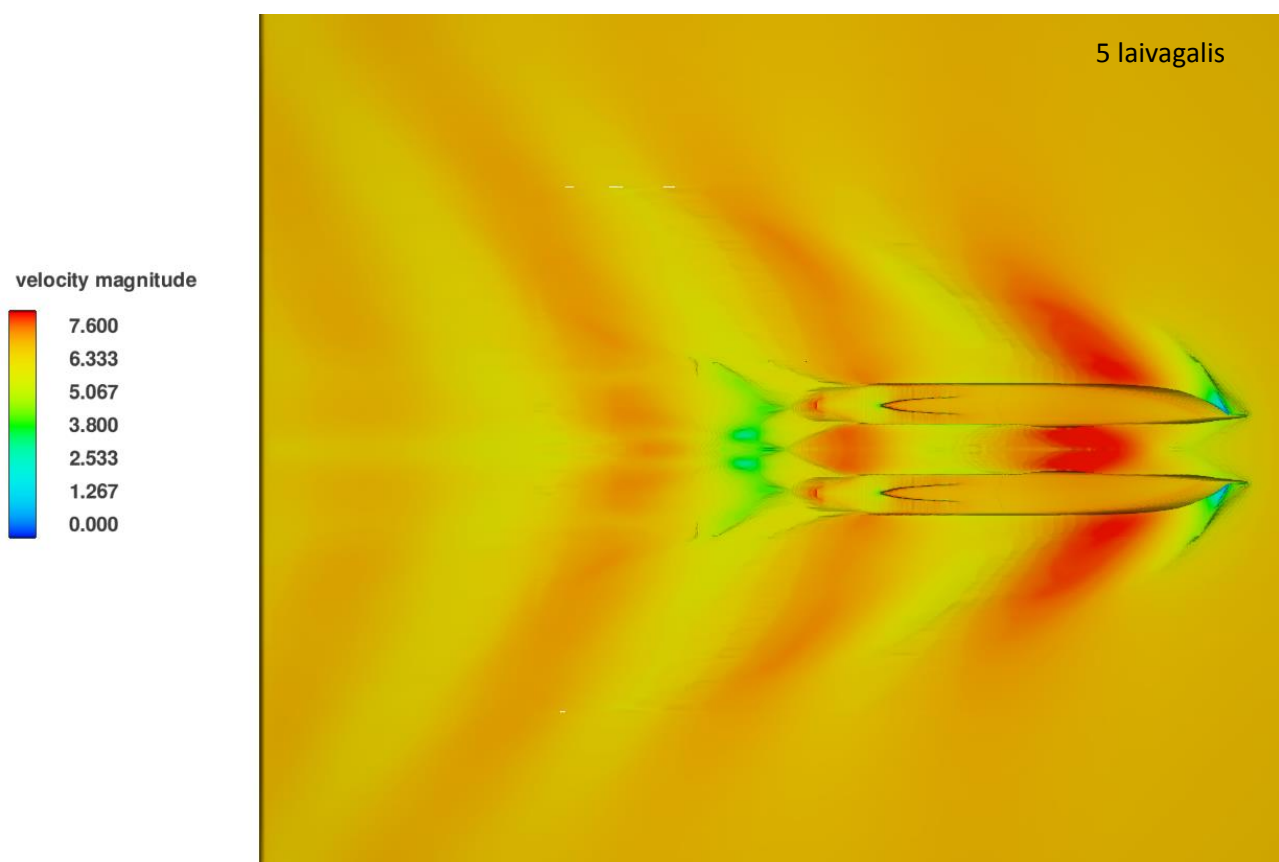
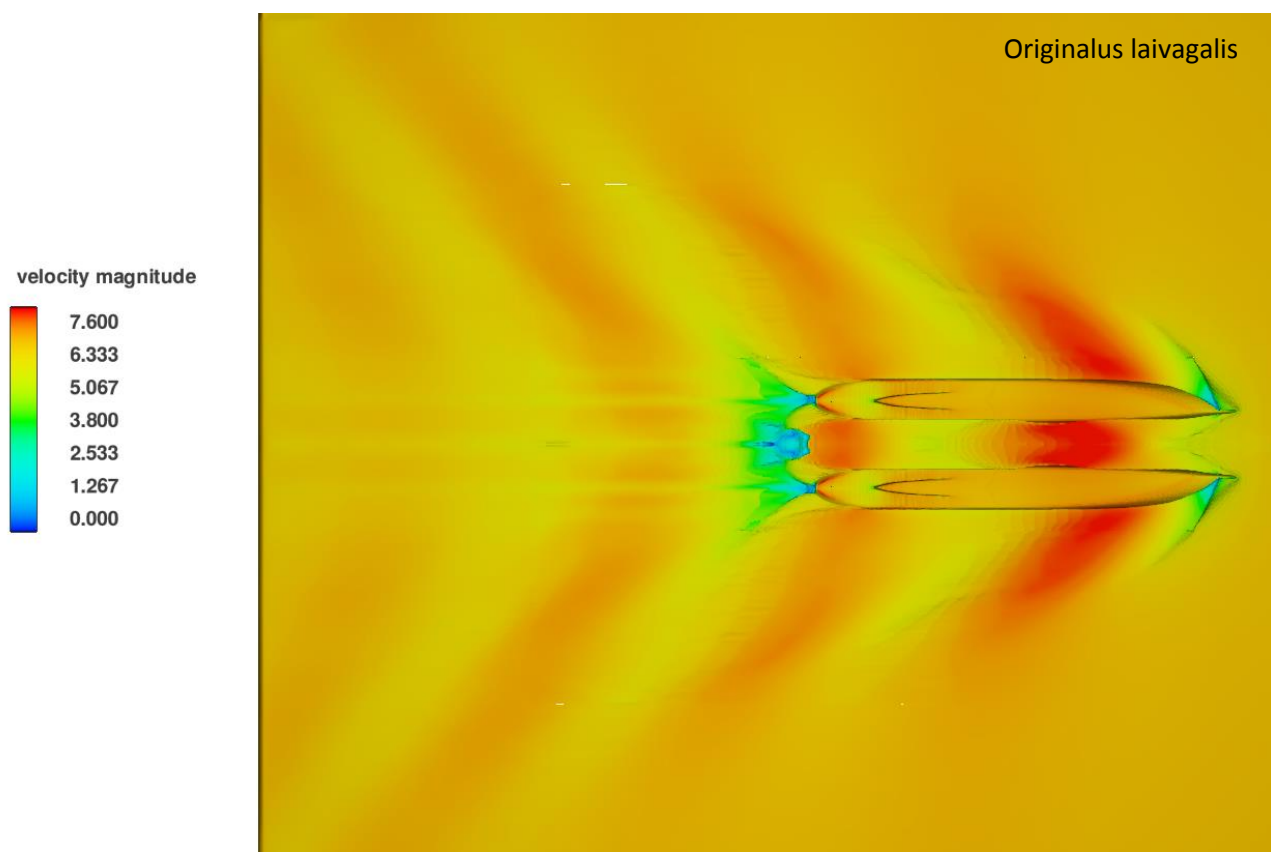
Time Frame: 30.00442



Time Frame: 29.99854

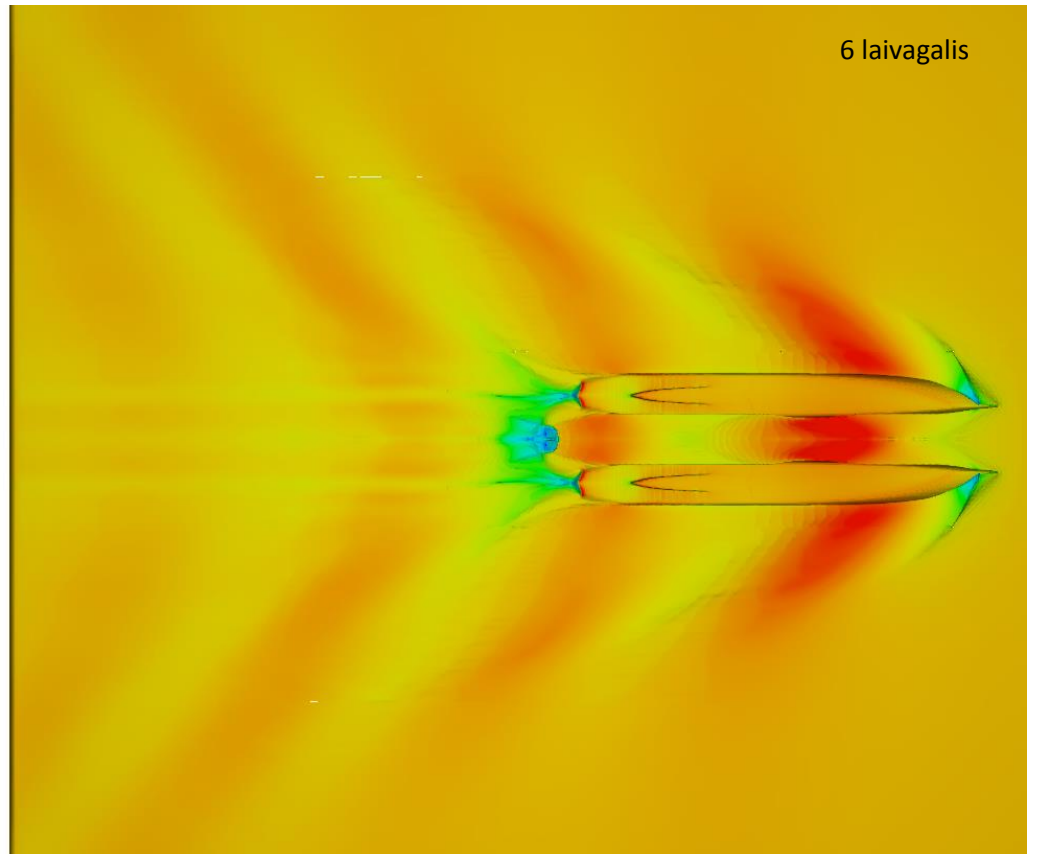
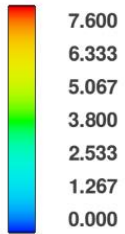


5 priedas. Laivagalio sukeltos bangos (srauto greičiai)

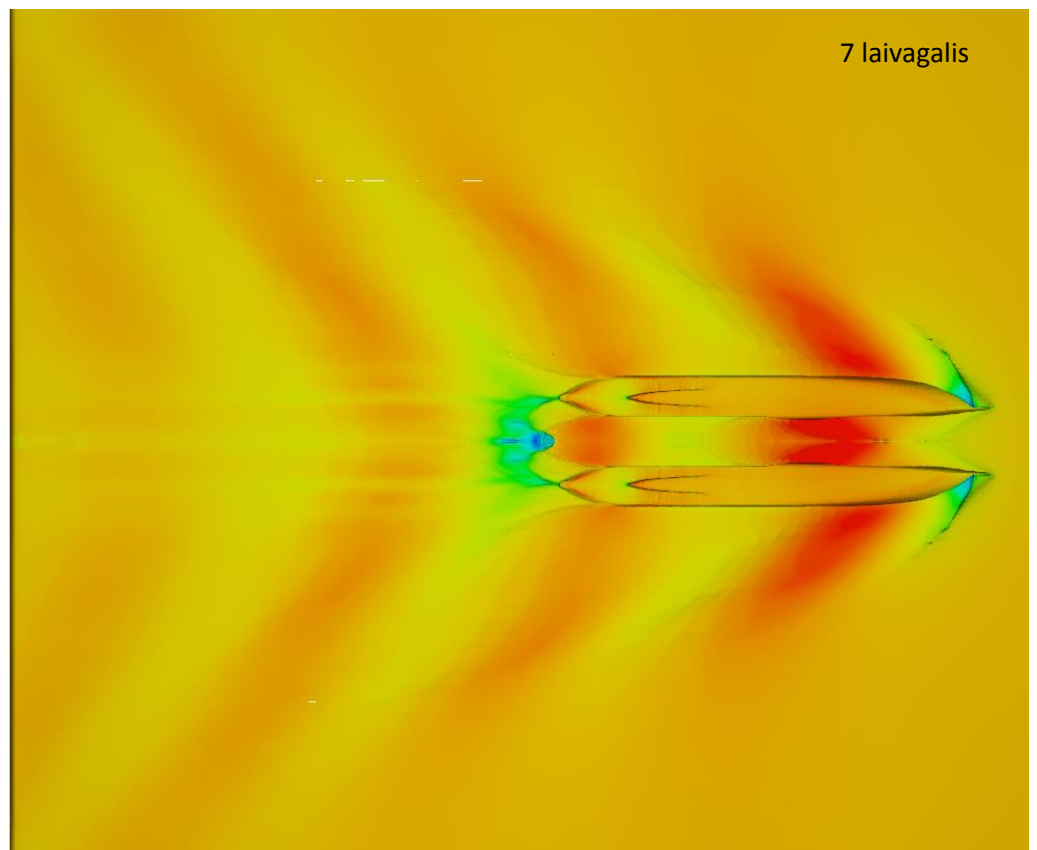
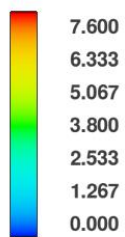


5 priedo tęsinys

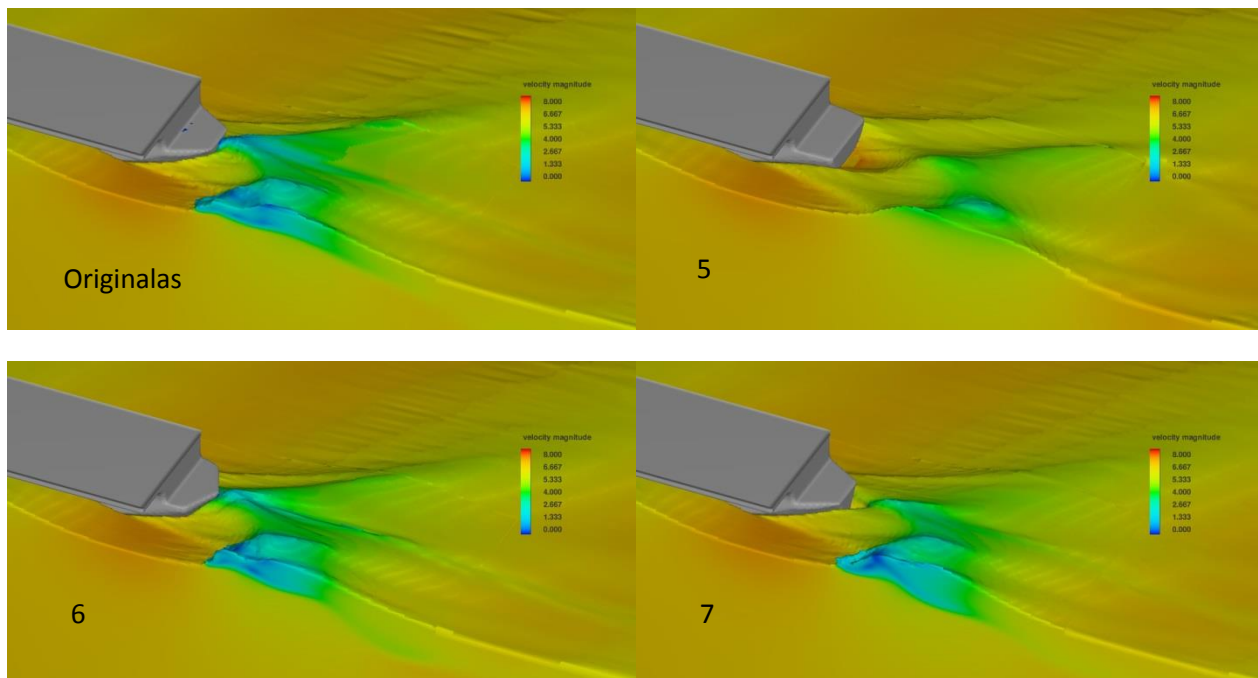
velocity magnitude



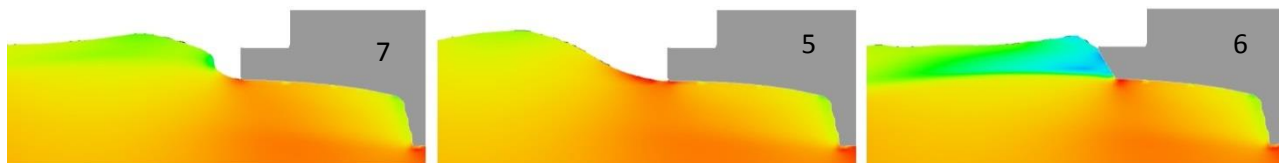
velocity magnitude



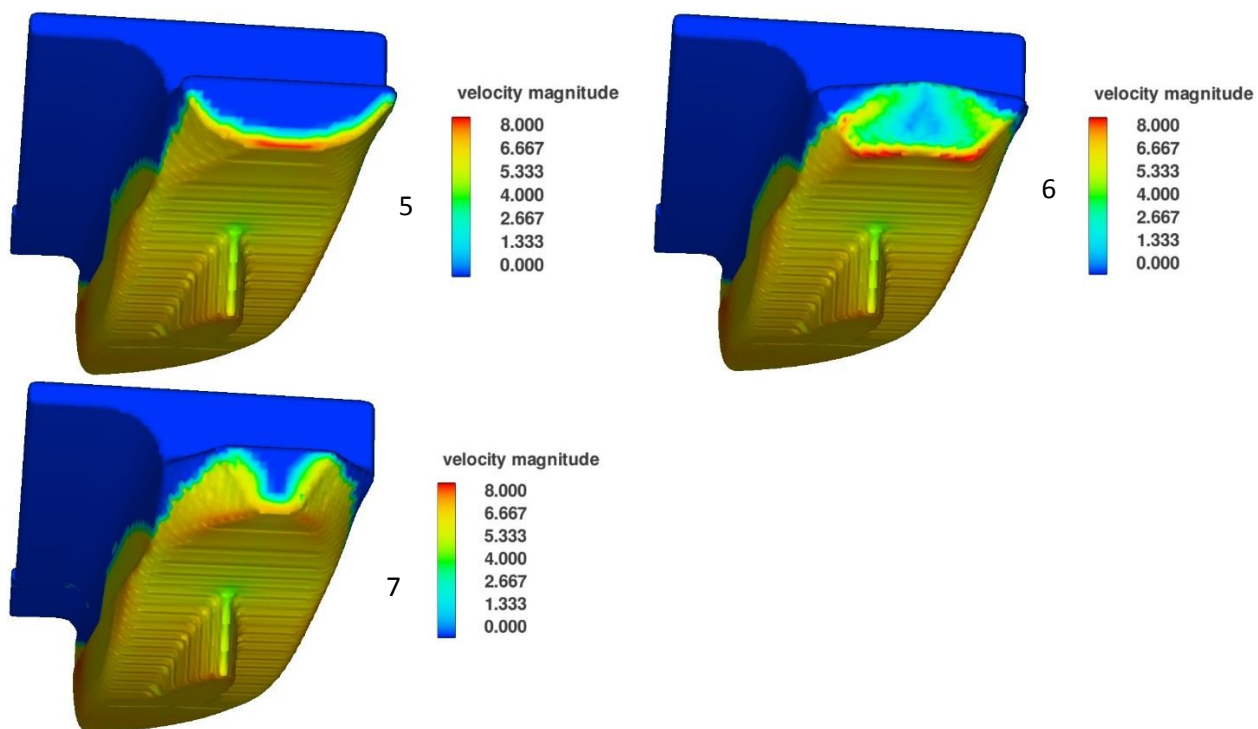
6 priedas. Laivagalių sukeltas srauto greitis (bangos) laisvajame skysčio paviršiuje



7 priedas. Srauto greičių pjūvis ties skegu



8 priedas. Srauto greičių pasiskirstymas ant korpuso



9 priedas. Eskeprimento nustatymai (prepin failo duomenys)

Title

This is a sample input file

\$xput

```
remark='!! Remarks beginning with "!! " are automatically added and removed by FLOW-3D.',  
remark='!! Do not begin any user added remarks with with "!! ". They will be removed',  
twfin=120,  
itb=1,  
ifvisc=1,  
imp=2,  
ifdynconv=1,  
gz=-9.81,  
tedit(1)=0,  
tapltd(1)=1,
```

\$end

\$limits

\$end

\$props

```
units='si',  
tunits='c',  
mu1=0.001,  
fluid1='Water at 293 K',  
thexf1=0.00018,  
cv1=4182,  
tstar=100,  
tl1=-0.149999999999977,  
ts1=-0.149999999999977,  
clht1=335000,  
cvs1=2100,  
thcs1=2.215,  
rhofs=917,  
teut=-273.15,  
tmelt=-273.15,  
ceut=0,  
pcoef=0,  
rhof=1000,  
sigma=0.073,  
thc1=0.597,
```

\$end

\$scalar

\$end

&PCAP

/

&BCDATA

```
remark='!! Boundary condition X Min',  
ibct(1)=7,  
ipbctp(1)=0,  
ubct(1, 1)=-6.43,  
flhtbct(1, 1)=3,
```

```
remark='!! Boundary condition X Max',  
ibct(2)=7,  
ubct(1, 2)=-6.43,  
flhtbct(1, 2)=2.8,
```

```
remark='!! Boundary condition Y Min',
ibct(3)=7,

remark='!! Boundary condition Y Max',
ibct(4)=7,

remark='!! Boundary condition Z Min',
ibct(5)=7,

remark='!! Boundary condition Z Max',
ibct(6)=7,

remark='!! Boundary condition common parameters',
timbct(1)=0,
/
```

```
&MESH
nxcelt=440,
px(1)=-15,
px(2)=40,

nycelt=64,
py(1)=-8,
py(2)=0,

nzcelt=44,
pz(1)=-1,
pz(2)=4.5,
iswatloc=0,
/
```

```
&BCDATA
remark='!! Boundary condition X Min',
ibct(1)=7,

remark='!! Boundary condition X Max',
ibct(2)=7,

remark='!! Boundary condition Y Min',
ibct(3)=7,

remark='!! Boundary condition Y Max',
ibct(4)=7,

remark='!! Boundary condition Z Min',
ibct(5)=7,

remark='!! Boundary condition Z Max',
ibct(6)=7,
/
```

```
&MESH
nxcelt=312,
px(1)=-30,
px(2)=48,

nycelt=96,
py(1)=-24,
py(2)=0,

nzcelt=46,
pz(1)=-7,
pz(2)=4.5,
```

/

&BCDATA

remark='!! Boundary condition X Min',
ibct(1)=6,
ipbctp(1)=0,
ubct(1, 1)=-6.43,
flhtbct(1, 1)=3,
fnx(1)=-6.43,

remark='!! Boundary condition X Max',
ibct(2)=6,
ubct(1, 2)=-6.43,
flhtbct(1, 2)=2.8,

remark='!! Boundary condition common parameters',
timbct(1)=0,

/

&MESH

nxcelt=234,
px(1)=-55,
px(2)=62,

nycelt=80,
py(1)=-40,
py(2)=0,

nzcelt=69,
pz(1)=-30,
pz(2)=4.5,

/

\$obs

nobs=1,

remark='!! Component 1',
obsid(1)='Korpusas',
ccolor(1)=4294901760,

remark='!! Subcomponent 1',
iob(1)=1,
igen(1)=3,

fstl(1)='C:/Users/Zydrunas Asmontas/Desktop/MTD/Mintis failai/WBS-62_HULL_2222.stl',

remark='!! Component 1 properties',
ifrco(1)=1,
itpobs(1)=0,
iaqsr(1)=0,

remark='!! Component common parameters',
avrck=-3.1,

\$end

\$fl

ui=-6.43,
flht=2.8,
iflinityp=1,

\$end

\$bf

\$end

```
$motn
$end
```

```
$grafic
  anmtyp(1)='f',
  anmtyp(2)='p',
  anmtyp(3)='part',
  anmtyp(4)='vel',
$end
```

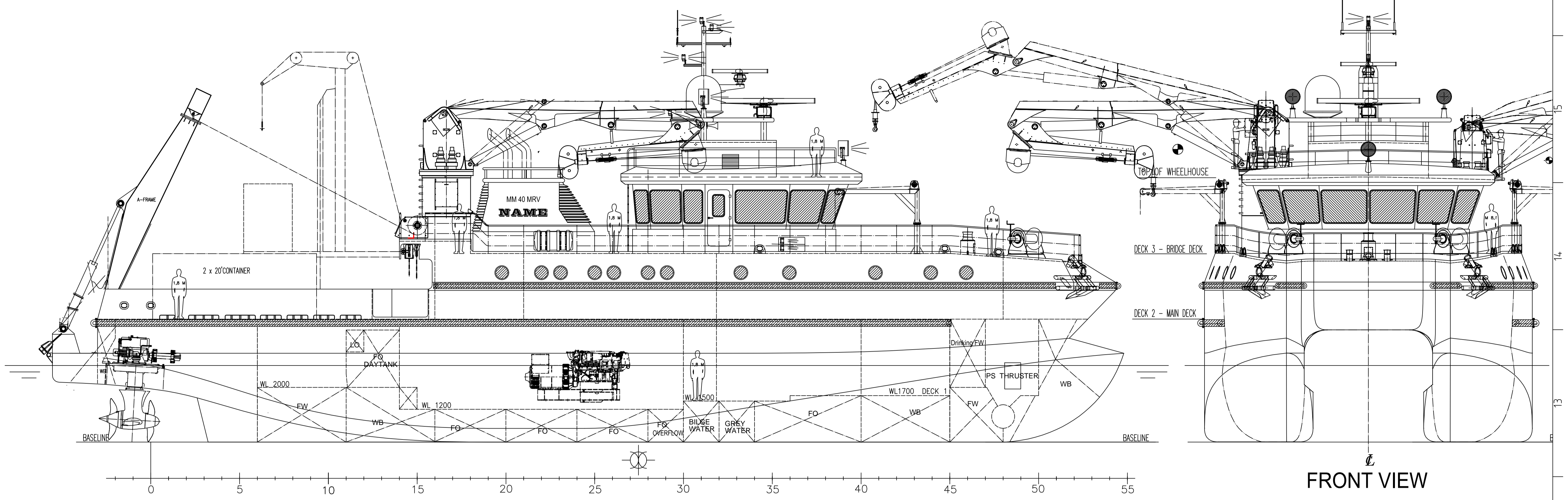
```
&RENDERSPACE
  ifcompf=-1,
/
```

```
&HEADER
  project='MINTIS D2800 V125 Grid overlay',
  version='double',
  nprocs=0,
  runser=0,
  use_parallel_token=0,
/
```

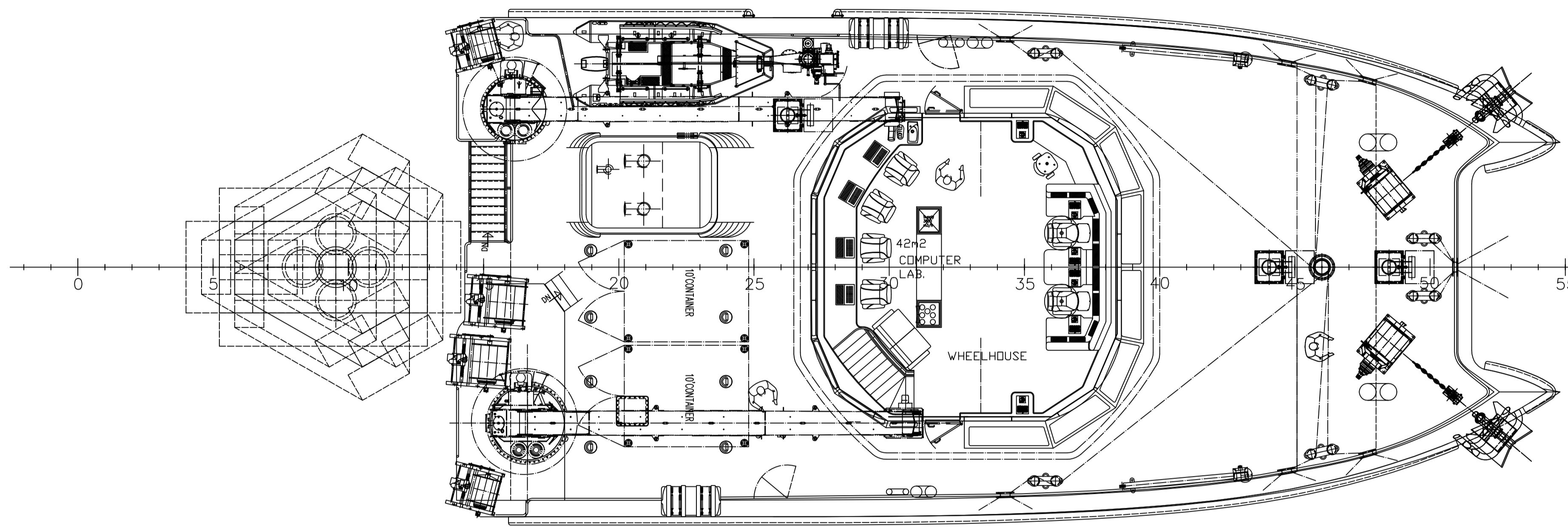
```
$parts
$end
```

Documentation: general comments, background, expectations, etc.

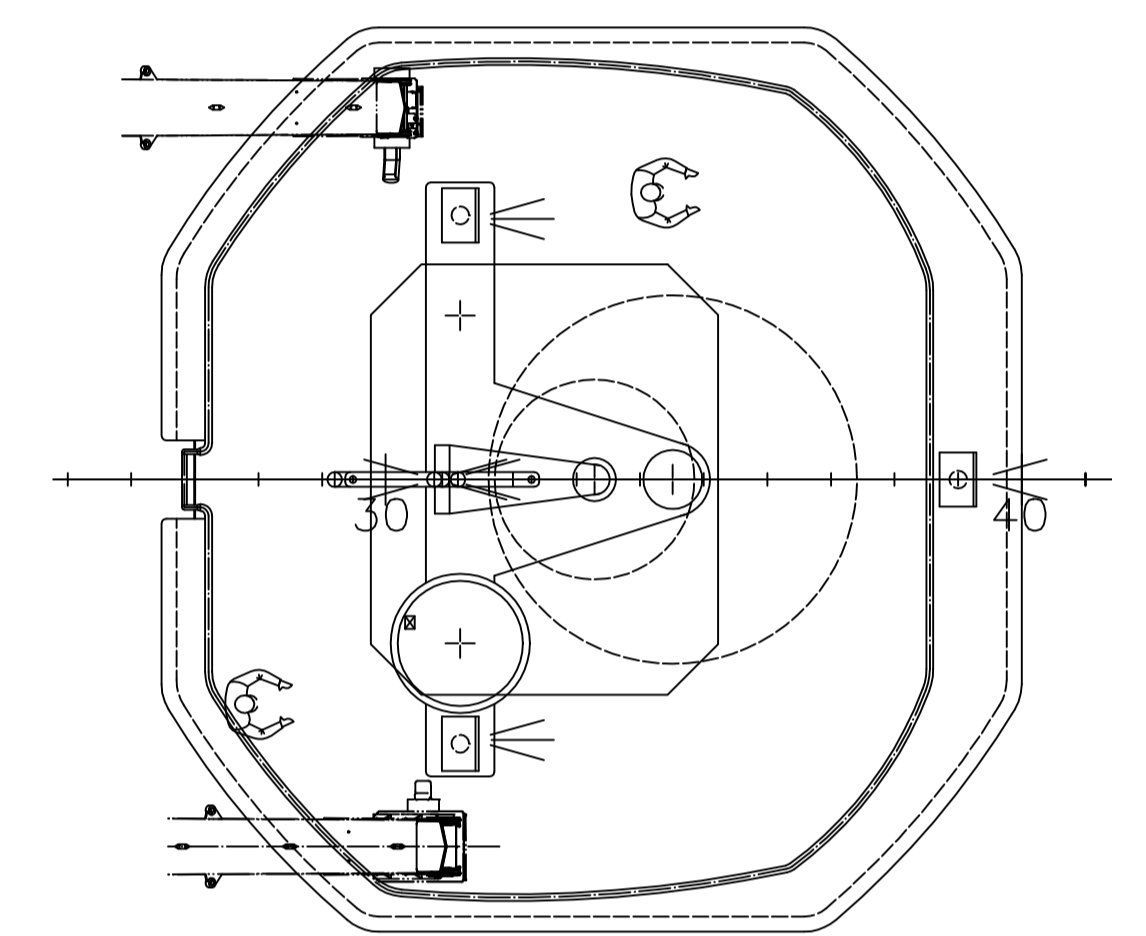
```
#start tables:
#end start tables
```



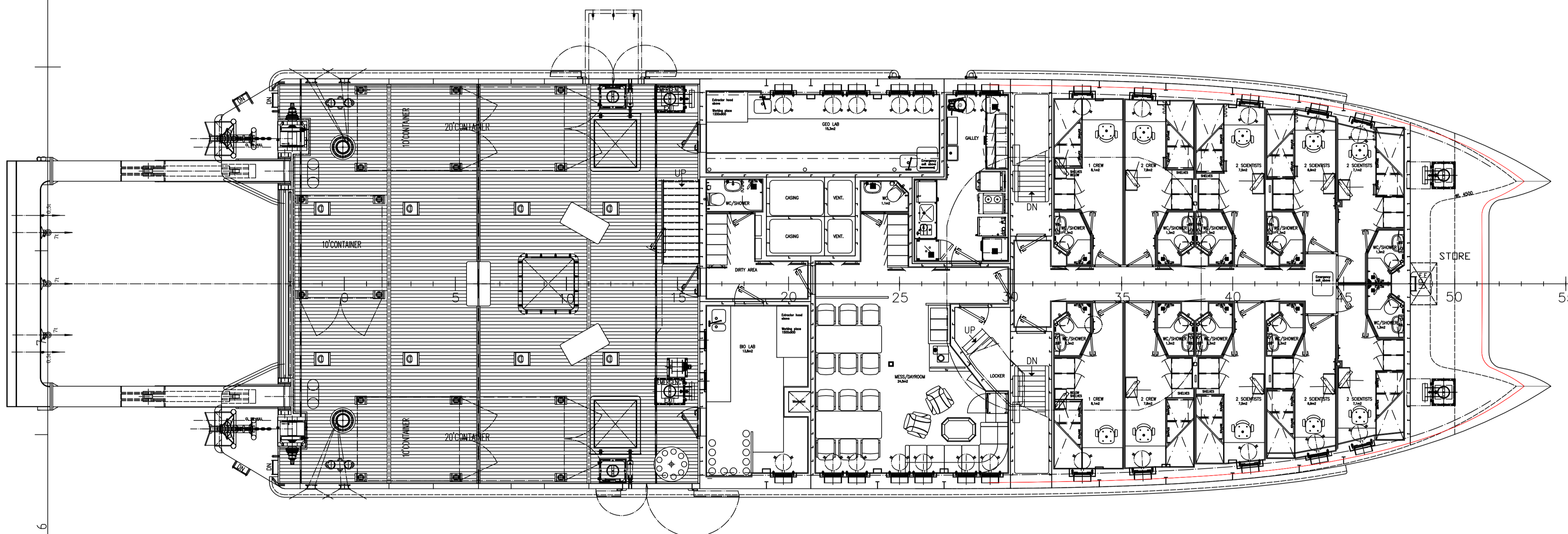
FRONT VIEW



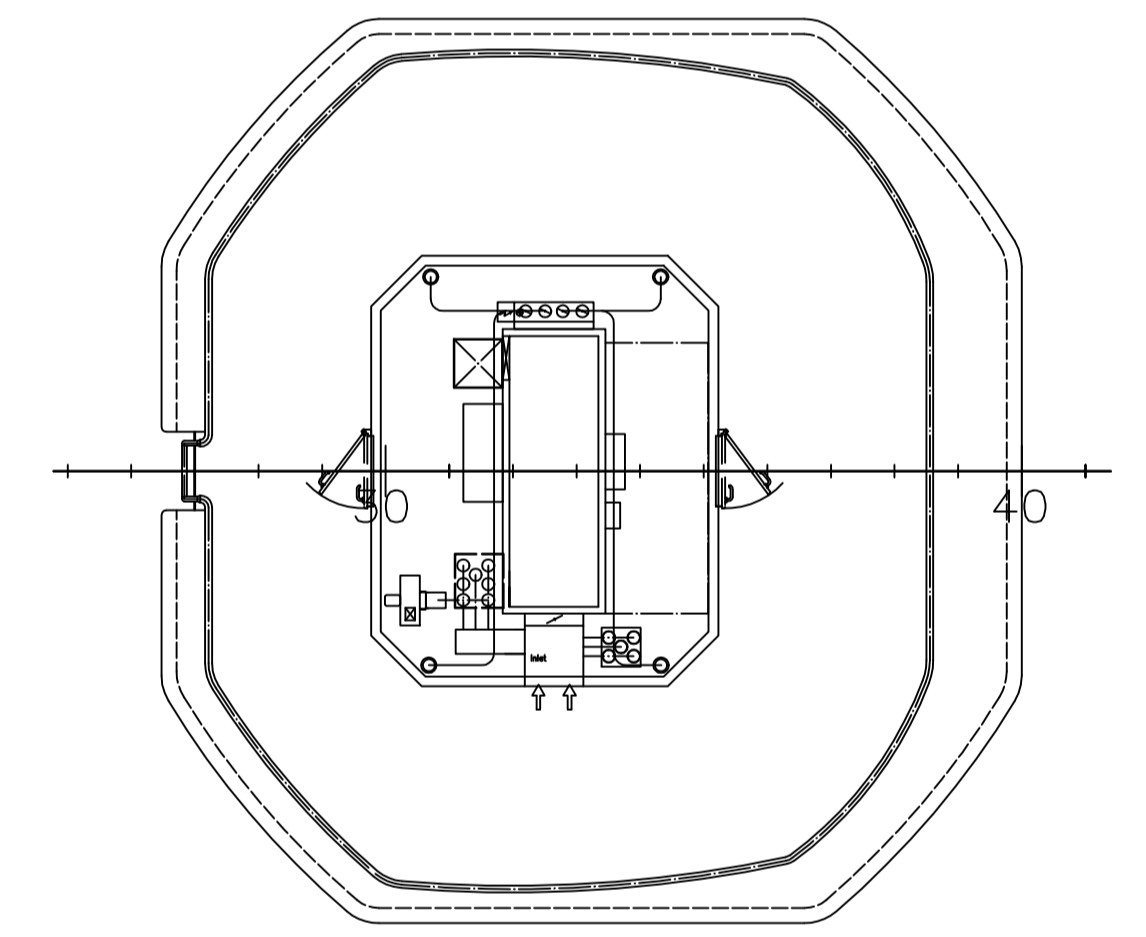
DECK 3 - BRIDGE DECK



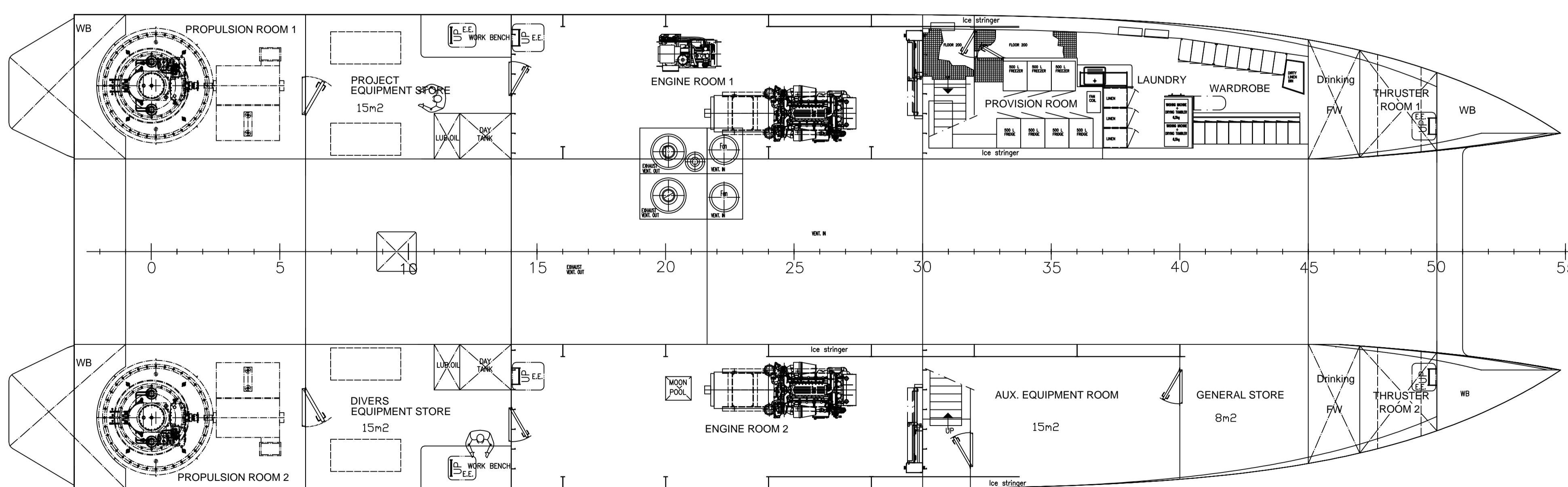
WHEELHOUSE TOP



DECK 2 - MAIN DECK



VENTILATION ROOM



DECK 1 - TANK TOP

MAIN DIMENSIONS

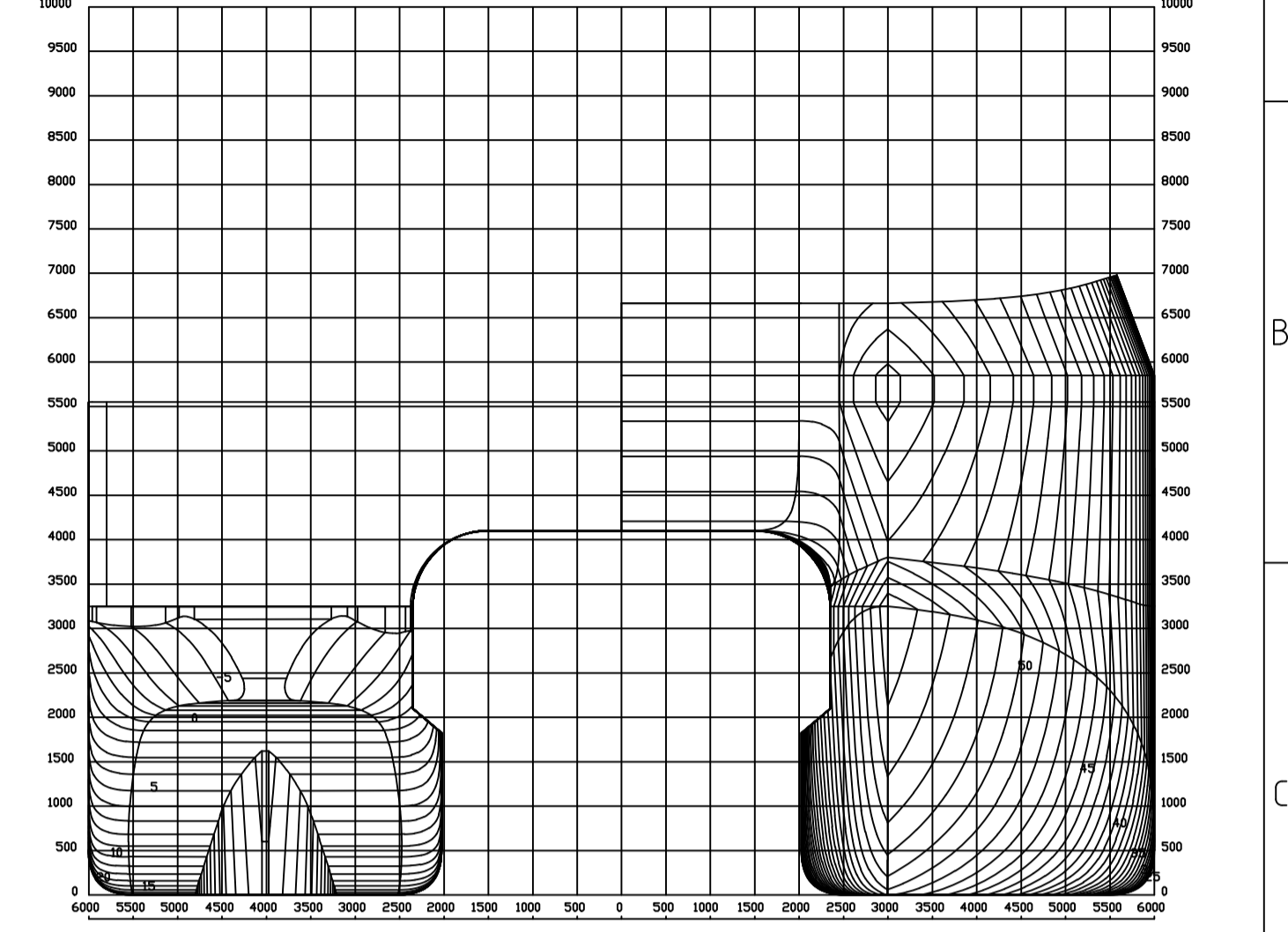
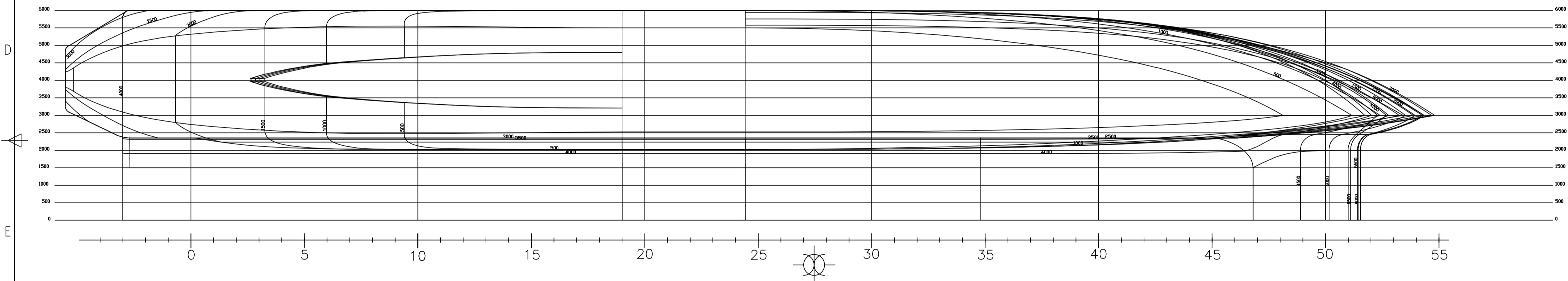
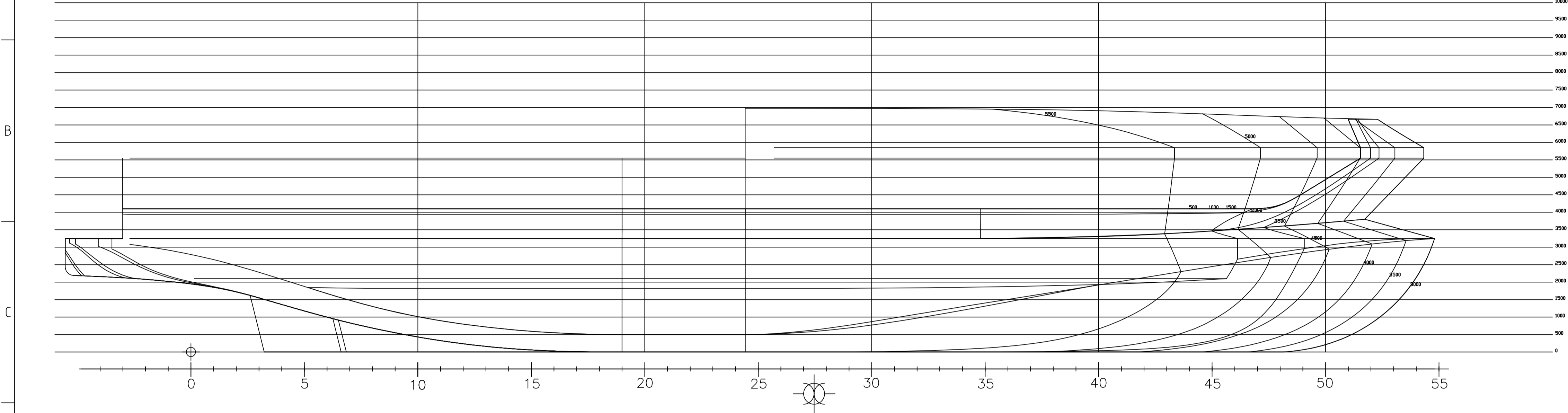
LENGTH OVER ALL:	APPR. 39.25 m
BREADTH, MOULDED:	12.00 m
DEPTH, MOULDED:	4.50 m
DRAFT, SUMMER:	MAX 2.80 m
CREW:	6
SPECIAL PERSONEL:	12
NUMBER OF CABINS:	10
NUMBER OF BEDS:	18
GROSS TONNAGE:	BELOW 500
SPEED:	12.5 knots
CLASS:	BV, I + Hull +Mach, Special service - Research Ship, Unrestricted Navigation - 100 mm for winter zone, 200 mm for summer zone ICE IC, +AUT - UMS, +DYNAPOS AM, +SYSNEQ-1
FLAG:	LITHUANIAN

REV. NO.	REVISION	DATE	APPR.
3	Corrected acc. to arrangement drawings, accommodation, mooring etc.	25.02.14	HJB
2	Corrected acc. to comments from BV	29.08.13	HJB
1	New title-field. Class notation changed, Wheelhouse, casing etc.	31.05.13	HJB
0	This drawing replaces drawing 10401513. Issued with draft for specification	08.02.13	HJB

CLIENT	WESTERN BALTIC SHIPBUILDING	SCALE	1:75	DRAWN LCD	29.11.12
TITLE	GENERAL ARRANGEMENT	SCALE	1:75	CHK'D	
TITLE	MULTIPURPOSE RESEARCH VESSEL	APPR.			
DESIGNER	MULTI MARITIME AS	PROJECT NO.	297/2	YARD NO.	62
CLASSIFICATION	N-6801 FBRE	PHONE	47 57825000	FILE NAME	62_101
MASTERSHIP		TELEFAX	47 57828451	DRAWING NO.	62-101-001
APPROVED		E-MAIL	info@multimarine.no	REV. NO.	3

This drawing is the property of MULTI MARITIME A/S. It must not be copied or adapted to any other vessel without written authorization from MULTI MARITIME A/S. The recipient of this drawing implies that the conditions as mentioned herein are accepted.

MULTI MARITIME A/S
N-6801 FBRE



MAIN DIMENSIONS

LENGTH OVER ALL: APPR. 39.25 m
 BREADTH, MOULDED: APPR. 12.00 m
 DEPTH, MOULDED: 4.50 m
 DRAFT, SUMMER: MAX 2.80 m
 Cb WL 2,8: 0,526

GROSS TONNAGE: BELOW 500
 SPEED: 12.5 knots

CLASS:
 BV, I + Hull +Mach, Special service - Research Ship,
 Unrestricted Navigation - 100 nm for winter zone, 200 nm for summer zone
 ICE 1C, +AUT - UMS, +DYNAPOS AM, +SYSNEQ

FLAG:
 LITHUANIAN

B	New lines for aft ship according to requirements for thruster STP550	27.09.13	HJB
A	Issued for info	08.03.13	HJB
REV.NO.	REVISION	DATE	APPR
CLIENT	WESTERN BALTIJA SHIPBUILDING		CLIENT REFERENCE
TITLE	LINES PLAN		SCALE 1:75
OWNER	YARD	CLASSIFICATION	MARITIME AUTH.
Approved			
PROJECT NO.	YARD NO.	SFI	
297/2	62	102	
FILE NAME / DRAWING NO.	REV.NO.		
62-102-101	B		

This drawing is the property of MULTI MARITIME A/S. It must not be copied or divulged to any unauthorized third party without written authorization from MULTI MARITIME A/S. The receipt of the drawing implies that the conditions as mentioned herein are accepted.
 MULTI MARITIME A/S
 N-6801 FØRDE

