

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS
Jūros technologijų ir gamtos mokslų fakultetas
Jūrų inžinerijos katedra

Paulius Žurna

**KU MOKSLINIŲ TYRIMŲ LAIVO „MINTIS“ KORPUSŲ
PAILGINIMO ĮTAKOS EIGUMO
CHARAKTERISTIKOMS TYRIMAS**

Laivybos ir uostų inžinerijos (6211EX066) specialybės Laivų
projektavimas ir statyba specializacijos magistro baigiamasis darbas

Klaipėda, 2020

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO LYDRAŠTIS

Pildo magistro baigiamojo darbo autorius

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

KU mokslinių tyrimų laivo „Mintis“ korpusų pailginimo įtakos
eigumo charakteristikoms tyrimas
(magistro baigiamojo darbo pavadinimas lietuvių kalba)

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

.....Paulius Žurna.....
(magistro baigiamojo darbo autoriaus vardas, pavardė ir parašas)

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

.....Paulius Žurna.....
(magistro baigiamojo darbo autoriaus vardas, pavardė ir parašas)

Pildo magistro baigiamojo darbo vadovas

Magistro baigiamąjį darbą ginti
(įrašyti – leidžiu arba neleidžiu)

.....doc. dr. Vasilij Djačkov.....
(data) (magistro baigiamojo darbo vadovo vardas, pavardė ir parašas)

Pildo Jūrų inžinerijos katedros, kuruojančios studijų programą, administratorius (sekretorius)

Baigiamasis darbas įregistruotas katedroje 61J-M-BD-JI-14

.....
(data) Aušra Gricė
(katedros sekretorės vardas, pavardė ir parašas)

Pildo Jūrų inžinerijos katedros, kuruojančios studijų programą, vedėjas ir programų vadovas

Magistro baigiamąjį darbą ginti
(įrašyti – leidžiu arba neleidžiu)

.....Prof. habil. dr. Sergejus Lebedevas
(data) (katedros vedėjo vardas, pavardė ir parašas)

Magistro baigiamąjį darbą ginti
(įrašyti – leidžiu arba neleidžiu)

.....doc. dr. Vasilij Djačkov.....
(data) (programų vadovo vardas, pavardė ir parašas)

Recenzentais skiriu

.....doc. dr. Rima Mickevičienė
(įrašyti recenzento vardą, pavardę)

.....doc. dr. Mindaugas Česnauskis
(įrašyti recenzento vardą, pavardę)

.....doc. dr. Vasilij Djačkov.....
(data) (programų vadovo vardas, pavardė ir parašas)

SANTRAUKA

Žurna P. KU mokslinių tyrimų laivo „Mintis“ korpusų pailginimo įtakos eigumo charakteristikoms tyrimas. Laivų projektavimo ir statybos magistrantūros studijų programos baigiamasis darbas. Darbo vadovas dr. V. Djačkov. Klaipėdos universitetas: Klaipėda, 2020.

Raktiniai žodžiai: KU Laivas MINTIS, bangų interferencija, optimizacija, SSD, FLOW-3D, eigumas, laivo pasipriešinimas.

Šio baigiamojo darbo tikslas pailginti tyrimų laivą ir įvertinti skirtingų pailginimo variantų įtaką eigumui. Išanalizuojama ir pritaikoma informacija matematiniam eksperimentui. Įvertinus matematinio eksperimento rezultatus, naudojant Alferiev metodą gaunami rezultatai, kurie gerai dera su realaus laivo eksploatacinėmis charakteristikomis. Pagal tą pačią metodiką atliekami pailgintų laivo korpusų skaičiavimai, kurių rezultatai rodo vandens pasipriešinimo mažėjimą, tačiau atliekant skaičiavimus susiduriama su Alferievo matematinio metodo apribojimais.

Papildomai nuspręsta sudaryti eksperimentą FLOW-3D SSD programa siekiant nustatyti korpuso hidrodinamines savybes ir jo įtaką laivą aptakančiam vandens srautui. Tyrime orientuotasi į skirtingų laivo ilginimų variantų pasipriešinimą ir eigumo savybes. Pateiktos išvados apie laivo ilginimų pasipriešinimą.

SUMMARY

Žurna P. study of KU research vessel lengthening influence to the propulsive qualities of the ship. Naval Architecture and Marine Engineering studies programme thesis. Klaipėda University: Klaipėda.

Keywords: KU vessel MINTIS, wave interference, optimization, CFD, FLOW-3D, flow research, ship resistance.

Purpose of this thesis is to lengthen the hull of research vessel and assess the effect of propulsive qualities to the vessel. Gathered information is analyzed and applied to a mathematical experiment. After evaluating the results of the mathematical experiment, using the Alferiev method, results indicate that the performance characteristics fit well to a real ship characteristics. According to the same methodology, calculations of extended hulls are performed, the results show a decrease in water resistance, but the calculations of Alferiev mathematical method face the limitations.

Therefore, it was decided to conduct an experiment with the FLOW-3D CFD program to determine the hydrodynamic properties of the hull and its influence on the water flow around the vessel. The study focused on the resistance and propulsion properties of different ship extensions. Conclusions on the resistance of ship extensions are presented.



Laivybos ir uostų inžinerija (6211EX066) specialybės Laivų projektavimas ir statyba specializacijos magistro studijų baigiamasis darbas

Užduotis studentui: Pauliui Žurnai

Temos pavadinimas: KU mokslinių tyrimų laivo „Mintis“ korpusų pailginimo įtakos eigumo charakteristikoms 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 su pailgintais laivo korpusais
 - 11.2. Matematinio eksperimento rezultatų palyginimas ir analizė
12. Išvados
13. Literatūros sąrašas
14. Priedai

Darbo vadovas: doc. dr. Vasilij Djačkov

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Vandens pasipriešinimo skaičiavimo rezultatai skirtingiems greičiams.....	44
2 lentelė. Gauti tyrimo duomenys (nuo 80 iki 120 sekundės).....	62
3 lentelė. Gauti tyrimo duomenys (nuo 120 iki 180 sekundės).....	62

Paveikslų sąrašas

1 pav. KU mokslinių tyrimų laivo laivagalis.....	9
2 pav. Tradicinio korpuso formu daugiakorpusiu laivu tipai.....	10
3 pav. Laivo pasipriešinimo komponentės	19
4 pav. Skystyje judančio kūno sukeltas slėgis.....	20
5 pav. Judančio slėgio taško ir laivo sukeltos bangų sistemos	21
6 pav. Laivapriekio ir laivagalio bangų sistemų sąveika.....	21
7 pav. Laivo bangų sukulto pasipriešinimo priklausomybė nuo greičio.....	22
8 pav. Pasienio sluoksnis.....	23
9 pav. Trinties pasipriešinimo susidarymas.....	24
10 pav. Pasipriešinimo dedamosios priklausomai nuo Frūdo skaičiaus.....	26
11 pav. Pasipriešinimo nustatymo metodai	27
12 pav. Tūrio elementas iš tęstinumo lygties dvimatėje sistemoje.....	30
13 pav. Sutrigdymai juda skirtinga linkme priklausomai nuo lauko lygčių.....	32
14 pav. Teisingas kintančio tinklelio sudarymas srauto tekės kryptimi.....	34
15 pav. Simetrinis katamarano vienodų korpusų išdėstymas	37
16 pav. Parametro L/B įtaka katamarano likusio pasipriešinimo koeficientui, kai laivas juda iki kritinių greičių zonoje giliame vandenyje, a) kai $0,3 < \overline{C} < 0,5$; b) kai $0,5 < \overline{C} < 0,9$	38
17 pav. Parametro δ įtakos likusio pasipriešinimo pasikeitimui, katamaranui plaukiant iki kritinių greičių zonoje, kai $0,3 < \overline{C} < 0,5$ ir $L/B < 15$ grafikas.....	39
18 pav. Parametro δ įtakos likusio pasipriešinimo pasikeitimui, katamaranui plaukiant iki kritinių greičių zonoje, kai $0,5 < \overline{C} < 0,9$ ir $L/B < 15$ grafikas.....	39
19 pav. Parametro B/d įtakos likusio pasipriešinimo pasikeitimui katamaranui, plaukiant iki kritinių greičių zonoje, kai $0,5 < \overline{C} < 0,9$ grafikas.....	40
20 pav. Trinties pasipriešinimo koeficiento C_{FO} grafikas pagal Prandtli ir Šlichtinga.....	41
21 pav. Katamarano vandens pasipriešinimo priklausomybė nuo greičio grafikas.....	44
22 pav. Laivo „Mintis“ bendras išdėstymas ir planuojamo skerspjuvio vieta.....	45
23 pav. Laivo „Mintis“ korpuso ilginimas.....	46
24 pav. Katamarano vandens pasipriešinimo priklausomybė nuo greičio grafikas (origalas ir 4 pailginti variantai).....	47
25 pav. Katamarano vandens pasipriešinimo priklausomybė nuo greičio grafikas (Trinties pasipriešinimas).....	47

26 pav. Katamarano vandens pasipriešinimo priklausomybė nuo greičio grafikas (Liekamas pasipriešinimas).....	48
27 pav. Tinklelis sudarytas iš trijų skirtingo detalumo blokų.....	51
28 pav. Srauto greičių pasiskirstymas ant korpuso (Originalus „Mintis“ korpusas – ilgintas 2,6 m.)	52
29 pav. Srauto greičių pasiskirstymas ant korpuso (Originalus „Mintis“ korpusas – ilgintas 5,2 m.)	52
30 pav. Srauto greičių pasiskirstymas ant korpuso (Originalus „Mintis“ korpusas – ilgintas 7,8 m.)	53
31 pav. Srauto greičių pasiskirstymas ant korpuso (Originalus „Mintis“ korpusas – ilgintas 10,4 m.)	53
32 pav. Srauto greičių pasiskirstymas ant korpuso (iš šono). Nuo viršaus: 1. Originalus laivo „Mintis“ korpusas. 2. Ilgintas laivo korpusas 2,6 m. 3. Ilgintas laivo korpusas 5,2 m. 4. Ilgintas laivo korpusas 7,8 m. 5. Ilgintas laivo korpusas 10,4 m.	54
33 pav. FLOW-3D pasipriešinimo rezultatai	56
34 pav. FLOW-3D Liekamas pasipriešinimas (80-120 sek. vidurkiai).....	56
35 pav. Trinties pasipriešinimas (80-120 sek. vidurkiai).....	57
36 pav. Alternatyvių korpuso variantų charakteristikų palyginimas (80-120 sek. vidurkiai).....	57
37 pav. FLOW-3D Liekamas pasipriešinimas (120-180 sek. vidurkiai).....	59
38 pav. FLOW-3D Liekamas pasipriešinimas (120-180 sek. vidurkiai).....	59
39 pav. Alternatyvių korpuso variantų charakteristikų palyginimas (120-180 sek. vidurkiai).....	60

TURINYS

IVADAS.....	9
I. DAUGIAKORPUSIAI LAIVAI.....	10
II. LITERATŪROS ANALIZĖ	11
III. LAIVO PASIPRIEŠINIMO TEORIJA	19
3.1 Vandens pasipriešinimo dedamosios	19
3.1.1 Bangų pasipriešinimas.....	20
3.1.2 Trinties pasipriešinimas.....	23
3.1.3 Klampumo slėgio pasipriešinimas	25
3.2 Pasipriešinimo nustatymo būdai	26
IV. SKAIČIUOJAMOJI SKYSČIŲ DINAMIKA	29
4.1 Pagrindinės SSD lygtys	29
4.2 Tinklelio sudarymas	33
4.3 Srauto vizualizavimas	34
V. KATAMARANO VANDENS PASIPRIEŠINIMO SKAIČIAVIMO METODIKA.....	37
5.1 Laivo pasipriešinimo skaičiavimas	41
VI. EKSPERIMENTO SUDARYMAS LAIVUI MINTIS	45
6.1 Preliminarus eksperimento sąlygų nustatymas	48
6.2 Eksperimentas laivui MINTIS	50
6.3 Gauti eksperimento rezultatai	51
6.4 Korpuso sukulto pasipriešinimo palyginimas	55
VII. IŠVADOS	61
LITERATŪRA	64
PRIEDAI	67

IVADAS

Laivo projektavimas – svarbiausias ir daugiausiai dėmesio reikalaujantis etapas laivų statyboje. Siekiant įgyvendinti visus užsakovo pageidavimus ir atitikti aplinkosaugos reikalavimus inžinieriai – laivų projektuotojai ne retai susiduria su problemomis. Didėjančios kuro kainos taipogi priverčia laivų savininkus ir projektuotojus galvoti apie naujus sprendimus ir konstrukcijas, padėsiančias sumažinti eksploatacines sąnaudas. Taip atsiranda sudėtingesnės laivo korpuso konstrukcijos, atliekami sudėtingi tyrimai, kad optimizuoti atskirus laivo elementus. Norint sumažinti sunaudojamos energijos kiekį reikalinga didinti naudojamų įrenginių naudingumo koeficientus t.y. sumažinti laivo pasipriešinimą sunaudojant tokį patį kiekį energijos. Didžiausia suvartojamos energijos kiekį koreguojant laivai sunaudoja plaukdami nustatytu maršrutu, todėl logiška būtų mažinti vandens pasipriešinimą laivo korpusui.

Laivas yra veikiamas įvairiausių pasipriešinimo jėgų, kurios buvo apskaičiuotos ir įvertintos profesionalų projektuojant ir statant tyrimų laivą „Mintis“, tačiau būtų tikslinga įvertinti laivo prailginimą, kas suteiktų daugiau denio vietos, didesnius tankus įrangos sandėliavimui nepakeičiant eigumo charakteristikų.

Šiame darbe tiriamas Klaipėdos Universiteto mokslinių tyrimų laivas „Mintis“. Pagrindinis laivo planuojamas vykdyti tiek mokslinius tyrimus, tiek tenkinti įvairius jūrinio sektoriaus poreikius. Kadangi laivas turi ženkliai didesnę paklausą nei buvo planuota, todėl natūralu, kad optimizavus laivą, būtų galima operatyviau ir kokybiškiau spręsti iškilusias problemas. Laivo korpuso tipas – katamaras, ilgis 38,7 m., su dvisraigčiais varytuvais. Detalus laivo aprašymas yra pateikiamas priede.



1 pav. KU mokslinių tyrimų laivas „Mintis“

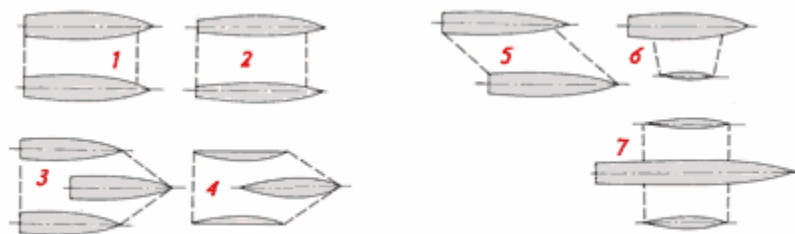
I. DAUGIAKORPUSIAI LAIVAI

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 area twin hull*) konstrukcijos laivuose, kuriuose vaterlinijos plotas yra sumažintas, o didžioji išstumto vandens dalis sukuriančio 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.



2 pav. Tradicinio korpuso formų daugiakorpusiu laivų tipai. 1,2 – katamaranas su simetriniais ir nesimetriniais korpusais, 3,4 – trimaranas su simetriniais ir nesimetriniais korpusais, 5 – katamaranas su prasilenkiančiais korpusais, 6 – laivas su vienu autrigeria (proa) 7 – laivas su dviem autrigeriais.

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 [17].

Tyrimo objektas. Laivo eigumo charakteristikos.

Darbo tikslas. Atlikti pailginto KU mokslinių tyrimų laivo eigumo tyrimą ir nustatyti laivo korpusų pailginimo įtaką laivo eigumo charakteristikoms.

Tiriamąo darbo uždaviniai.

1. Atlikti literatūros šaltinių apžvalgą ir numatyti tinkamą tyrimo metodą.
2. Atlikti laivo konstrukcinių ypatybių analizę ir suformuoti tyrimo atvejus skaitiniam eksperimentui.
3. Atlikti sudarytų tyrimo atvejų eigumo skaitinį eksperimentą.
4. Išanalizuoti eigumo skaitinio eksperimento rezultatus.
5. Pateikti išvadas ir rekomendacijas.

II. LITERATŪROS ANALIZĖ

Kadangi srauto aptekėjimo tyrimai apima daugybę aspektų ir reiškinių. 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 kokią būdą yra tikslinga taikyti. Be to SSD tyrimams reikalinga žinoti ne tik reikalingą taikymo būdą (programą), bet ir tinkamo 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 [5]:

- 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.).

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

Projektuojant daugiakorpusus laivus labai svarbu įvertinti jų bangavimo ir bendrą pasipriešinimą. Bendrą katamarano pasipriešinimą sudaro: trinties pasipriešinimas, liekamasis pasipriešinimas (nagrinėjamas, kai nėra korpusų sąveikos) ir papildomas pasipriešinimas, atsirandantis dėl greičių ir slėgių sąveikos. Papildomą pasipriešinimą sudaro bangavimo pasipriešinimas, atsirandantis dėl korpusų bangų sistemų sąveikos, trinties pasipriešinimas, atsirandantis dėl greičių tarp korpusų padidėjimo, ir formos pasipriešinimas. Pagrindinį vaidmenį papildomam pasipriešinimui turi bangavimo pasipriešinimas ir trinties pasipriešinimas, kurie didėja, didinant greitį (Дубровский, 1968, 12-16 c.) [10].

A. Aubault ir R. W. Yeung pasiūlė matematinį modelį daugiakorpusinių laivų pasipriešinimui skaičiuoti, riboto gylio vandenyse. Autorių pasipriešinimo modelis susideda iš atskirtų korpusų pasipriešinimo, kurį sudaro bangavimo pasipriešinimas, atsirandantis dėl korpusų bangų sistemų sąveikos. Korpusų įtaka vienas kitam įvertinama integruojant pagal bangos kampą. Nagrinėjama pasipriešinimo priklausomybė nuo atstumo tarp korpusų (klirenso ir korpusų prasilenkimo). Skaičiavimui atlikti dviem 60 serijos korpusams (katamaranui), naudojant didelį Frūdo skaičių (0,8 ir 1,3). Autoriai susigrūmė su problema įtraukiant antrinių korpusų parametrus atliekant pasipriešinimo skaičiavimus trimaranui. [2].

Tiriant daugiakorpusių laivų vandens pasipriešinimą yra labai svarbu įvertinti savųjų bangų interferencijos efektą [29]. Straipsnyje nagrinėjami keli atskyrimo atstumai tarp korpusų. Duomenys apie atsparumą, skęstamumą ir aptakumą renkami atliekant eksperimentus bandymų baseino esant Frūdo skaičiams nuo 0,2 iki 0,8. Modelinių bandymų ir matematinių eksperimentų skaičiavimo rezultatai derėjo tarpusavyje. Gauti rezultatai parodė, kad esant Frūdo skaičiui iki 0,45 atstumas tarp korpusų pasireiškia nedidelę bangų interferencijos įtaką. Kai Frūdo skaičius daugiau nei 0,45 bangų interferencijos įtaka didėja, o šią įtaką galima sumažinti didinant atstumą tarp korpusų. Siekiant suprasti bangų interferencijos efektą buvo nuspręsta, kad reikalinga dar atlikti papildomų eksperimentų.

Daugiakorpusiai laivai turi žymiai plonesnius korpusus palyginus su vienkorpusiais laivais, todėl labai dažnai šiems laivams gali būti taikoma plono laivo teorija. [21, 26] Autoriai apžvelgia pagrindinę srauto laisvųjų paviršių potencialo teoriją (angl., „thin ship theory“) Remiantis plono laivo teorija, pateiktas nesudėtingas slėgio ir bangos profilio įvertinimo laivo korpuse metodas

(taip pat atsižvelgiama į bangos pasipriešinimą, hidrodinaminį pakėlimo ir pakilimo momentą, taip pat nusileidimą ir aptekėjimą).

Autoriai siekė atskleisti kaip galima padidinti tanklaivio efektyvumą dešimt procentų modifikuojant laivą. Naudota SSD programa *OpenFOAM* (tirta *RANS* metodu), gauti rezultatai palyginami atliktais tyrimais. Pabrėžiama, kad gauti eksperimento duomenys gali neatitikti realybės arba SSD duomenis, kadangi atliekant bandymą vamzdyje, nėra įvertinamas bangų susidarymas. Analizėje orientuotasi tik į korpuso laivagalį, todėl modelis sutrumpintas, paliekant maždaug pusę laivagalio dalies. Šiuo būdu bandytas didesnio mastelio (1:23), 4 metrų ilgio modelis. Atlikus analizę aptikta, kad reikiamą galią sumažinus vienu procentu paprastas trikampio formos sparnas atsipirktų per maždaug 25 dienas. Patys pirmieji rezultatai parodė, kad laivo naudingumą įmanoma padidinti iki 9 procentų naudojant srautą gerinančias movas [18].

Mokslininkai laivo pasipriešinimą tiria panaudojant skaitmeninės skysčių dinamikos programinę įrangą *Open FOAM* [12]. Taipogi tirtas srauto atsiskyrimas laivagalio trancė. Nustatyta, kad srautas atsiskiria nuo trancės įsibėgėjus iki tam tikro greičio. Atsižvelgiant į simuliacijos bandymus, manoma, kad „sausasis“ trancas susidaro kai Frūdo skaičius lygus arba didesnis už 0,30. Kai Frūdo skaičius didesnis, o laivo galo trancas paniręs, susidaro zona, kuri galimai turi milžinišką įtaką laivo posvyriui ir grimzdimui. Tokiu atveju susidaro stiprios laivagalinės bangos, kurios tarpusavyje sąveikauja [12].

Pirmoje savo darbo dalyje autoriai siekia parodyti kokią įtaką laivo korpuso efektyvumui gali turėti laivo modifikacija. Argumentai grindžiami matematiniais skaičiavimais. Analizuojamas mastelinis efektas tarp tikro laivo ir modelio matmenų. Sekančioje dalyje susitelkiama į klampaus srauto susidarymą. Išvadose pateikiama klampaus srauto analizių nauda, modernizuojant vieno sraigto laivagalį kroviniuose laivuose. Tiriant komplikotos laivo korpuso formos laivus (kaip pvz. žemsiurbė), kad nustatyti srautą yra pasitelkiama SSD [25].

Autorių tirtas SGD laivo prototipo optimizavimas. [27] Laivas gali talpinti 212 000 m³ krovinio ir yra varomas dviejų mažasūkių dyzelinių variklių. Orientuojamasi į sudėtingus srautus susidarantiems 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. Autoriai išvadose teigia, kad sėkmė optimizuojant laivą buvo teisingai atlikti SSD bandymai, modelių bandymai ir kruopščiai atrinkta literatūra, bei atlikta jos analizė.

Darbe buvo koncentruotasi į automatinį tanklaivio korpuso formos optimizavimą. Buvo nustatytos pagrindinės sąlygos tyrimui. Pirmoji – pagindiniai matmenys išlieka fiksuoti, antroji - laivo vandentalpa negali būti mažesnė, trečioji – sraigto vieta nekintanti, Pirma sukurta keletą skirtingų laivo korpuso formų, kurios galėtų išplėsti tyrimo sienas, tada vykdomas jų keitimas ir koregavimas. Pastebima, kad rezultatai parodė vienu procentu sumažėjusią reikiamą galią, o dar papildomai pridėjus ir bangų pasipriešinimo mažėjimą būtina galia mažėja 2,2 procento.[3].

Autoriai sukūrė 32 mlrd. elementų *Large eddy simulation* bandymo modelį, kuriuo tirta bandymo baseinuose. Darbe orientuotasi į turbulentinio srauto sudarytus verpetus pasienio sluoksnyje. Atliekant skaičiavimus naudotas manomai galingiausias Japonijos superkompiuteris. Naudota kompiuterinė programa pavadinimu *FFB - FrontFlow/blue*. Kadangi didesnio nei 100 milijonų dėmenų tinklelio sukurti rankiniu būdu negalima, buvo naudotas būdas, kuris tinklelio elementą padalina į dvi dalis abiem kryptimis. Panaudotas korpuso modelis, be išsikišančių dalių. Taip pat buvo nuspręsta tirti ir su su šiurkštesniu 62 milijonų dalių tinkleliu. Laivo viduryje aptikta grubiai 50 srauto verpetų esant grubiam tinkleliui ir apie 3-4 kartus daugiau verpetų, esant detaliam tinkleliui. Lyginant kompiuterio skaičiuotus pasipriešinimo rezultatus su bandymų baseine gautais rezultatais, pastebėta jog detalaus tinklelio atveju paklaida buvo vos 0,87%, todėl teigiama, kad toks tinklelio detalumas yra tinkamas skaičiuojant *Large eddy simulation* metodu. [20].

Tyrime aprašomi nevienodi laivo korpuso hidrodinaminų savybių įvertinimo būdai. Iškiriamos tokios temos kaip diferento optimizavimas, korpuso optimizavimas, išsikišusių dalių optimizavimas. Išvadose pabrėžiama, jog keičiant laivo korpusą pagal modelinio laivo bandymo rezultatus, gauti rezultatai geresni, lyginant su tikru laivu. Pateikiama SSD privalumai ir potencialas, kuris kaip mano autorius tik didės. SSD yra labai patogus, dėl vis gerėjančių kompiuterių savybių, bei skaitmeninių programų pastovaus tobulinimo. Taipogi yra galimybė nagrinėti ankstesnių tyrimų duomenis arba juos atlikti iš naujo [15].

Tiriant vandens aptekėjimo aplink skirtingus objektus dažnai remiamasi ankstesnių tyrimų rezultatais [7]. Straipsnyje aprašyta 2D SSD simuliacija (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. [7].

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 sukurių 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. [23].

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. [19].

Autoriaus pagrindiniai taikiniai buvo aprašyti vdomumo teoriją, supimosi teoriją, bei eigumo 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 apžvelgiami laiko, kokybės ir kainos privalumai naudojant SSD programą[6].

Knygos autoriai pristato saugumo, bei laivų 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. Knygoje pasitelkiama nemažai skirtingų Azijos specialistų darbų kurie surūšiuoti pagal atitinkamas etmas. [28].

Knygoje „*Basic ship theory*“ antrame leidime orientuotasi į laivų ir kitų jūrinių transporto priemonių savybes ir elgseną sudėtingose sąlygose, kuriuose laivai ar kitokio pobūdžio jūrinės priemonės yra eksploatuojamos. 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 [22].

Autorius atrado nują trinties pasipriešinimo mažinimo būdą katamaranui [17]. Katamarano modelis buvo pagamintas masteliu 1:12. Šiuo bandymu buvo norėta pamatyti: koks oro burbulų efektyvumas kartu su lygiu specialiai trintį mažinančiu paviršiumi padengtu korpusu; ar oro burbulai sumažina pasipriešinimą leidžiant juos katamarano vertikaliuose bortuose; oro debito įtaką pasipriešinimo mažinimo veiksmingumui. Tyrėjai bandė nagrinėti oro burbulų efektyvumą vertikaliam paviršiui, kitaip nei ankstesnių tyrinėtojų pvz. Madavano et al. (1984 m.). Jie keitė tekėjimo srauto greitį baseine palikdami oro debitą tolygų. Pagal gautus rezultatus paaiškėjo, kad katamarano pasipriešinimas sumažėjo nuo 5 iki 8 procentų, o esant lygiam paviršiui nuo 8 iki 11 procentų. .

SSD programos taip pat panaudojamos laivo pasipriešinimo mažinimo oro pagalba modeliavimui [Kitagava (2004)]. Autorius pasiūlė oro burbulus naudojamus pasipriešinimui sumažinti paduoti kartu su vandens srautu.

Murakami et al. imitavo tekėjimą aplink cementą gabenantį laivą, kuris buvo panaudotas Kodama et al. (2008 m.) eksperimente ir įvertino laivo laikysenos pasikeitimus, oro išpūtimo vietas pagal pasipriešinimo mažinimo koeficientą ir oro burbulų įtaką sraigto diskui darbiui.

Kavabuchi (2011 m.) nusprendė palyginti SSD programos pagalba sukurto srauto aplink korpusą vaizdą su eksperimentiniu būdu gautu rezultatu. Taip pat buvo norima patikrinti oro burbulų srauto poveikį sraigto darbiui. Rezultatai patvirtino, kad oro burbulų pasiskirstymas laivo korpuso apačioje mažai kito keičiant oro burbulų diametrą. Eksperimentiniu būdu gauti rezultatai buvo panašūs į rezultatus gautus panaudojus SSD programą. Buvo patvirtinta kad oro burbulų diametro pasikeitimai neturėjo poveikio sraigtui, nors oro burbulų srautas į sraigą didėjo mažėjant oro burbulų diametrui. Suskaičiuotų ir eksperimentinių rezultatų palyginimas patvirtino, kad varomosios jėgos naudingumo praradimas nežymus, kadangi oro burbulai tekėjo palei laivo apačia link vietos virš sraigto [16].

H. Sayyaadi (2013 m.) 70 cm ilgio katamarano modelio bandymo rezultatai buvo panaudoti nustatyti oro tiekimo debito poveikį pasipriešinimo mažinimui ir nustatyti paprastą formuluotę apskaičiuoti optimalų oro tiekimo debitą pagal pagrindinius laivo parametrus, tokius kaip: ilgį, plotį ir greitį. Rezultatai parodė, kad didžiausias trinties pasipriešinimo mažinimo rodiklis mažėjo, greičiui didėjant. Kitaip tariant, pasipriešinimo mažinimo poveikis mažėja esant dideliems greičiams, tad šį metodą veiksmingiau naudoti mažesniu greičiu plaukiančiuose laivuose. Eksperimentas parodė, kad norint pasiekti maksimalų trinties pasipriešinimo mažinimą, įleidimo koeficientas turi būti tarp 0,4 ir 0,6, kas apytikriai panašūs rezultatai eksperimento, kurį atliko Lattore [22].

Knygos autorius aprašė laivo eigumo teoriją. Laivo eigumas susideda iš vandens pasipriešinimo 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 bakalauro, magistrantūros bei doktorantūros studijų klausytojams. [8].

Knygoje tiriamos laivo jūrinės savybės. Aptarinėjami laivo plūdrumas ir stovumas, pateikiama anksčiau minėtų plūdrumo ir stovumo skaičiavimo pavyzdžių, bei įvardijama informacija apie plūdrumo, stovumo priklausomybę nuo krovinio tipo ir jo išsidėstymo laive. 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. [24].

J. Čerkos, R. Mickevičienės, Ž. Ašmonto, L. Norkevičiaus, T. Žapnicko, V. Djačkov ir P. Zhou straipsnyje pateikiami tiriamojo laivo korpuso formos optimizavimo rezultatai naudojant skaitmeninį modeliavimą. Tyrimo dalies objektas yra naujai pastatytas universalus katamarano tipo tyrimų laivas, skirtas geologiniams ir biologiniams tyrimams. Laivas pasiekia maksimalų greitį naudodamas tik 70% visos variklio galios. Toliau didinant galią galima matyti sunkiai pastebimą greičio padidėjimą. Vibracija papildomai pasireiškia vairinės srityje. Tai veda prie tyrimo, galimai neigiamai veikiančio propulsinio komplekso. Korpuso formos tyrimas ir jo optimizavimas buvo laikomi vienu iš galimų sprendimų. Kiti tradiciniai ir standartiniai atsparumo evoliucijos analizės metodai nebuvo tinkami. Buvo išanalizuotos srauto linijos aplink laivo korpusą ir pasirinktas optimalus sprendimas. Siekiant įrodyti pasirinktos optimizacijos efektyvumą, buvo atlikta vandens pasipriešinimo analizė [9]. Šiuo tyrimo sąlygos ir gauti rezultatai gali būti naudojami kaip pagrindas mūsų matematinio eksperimento sąlygų formavimui.

V. Djačkov, T. Žapnicko, J. Čerkos, R. Mickevičienės, Ž. Ašmonto, L. Norkevičiaus, I. Ronkaitytės, P. Zhou, E. Blanco-Davis straipsnyje „Numerical simulation of a research vessel's aftpart hull form“ pateikiami tyrimo laivo „Mintis“ laivagalio dalies korpuso formos skaitmeninio modeliavimo rezultatai. Bangų besiridenančių ant skego sukurtą papildomą pasipriešinimą laivo judėjimui. Norėdami išspręsti susidariusią situaciją autoriai atliko tyrimą su tikslu nustatyto optimalią skego formą. Buvo analizuojamos vandens srauto linijos aplink laivo korpusą ir bangų struktūra už laivagalio. Papildomai atlikta vandens pasipriešinimas analizė, siekiant įrodyti pasirinkto sprendimo efektyvumą [10]. Šiuo tyrimo sąlygos yra labai artimos mūsų formuojamam matematiniam eksperimentui, o naudojami rezultatų analizės metodai gali būti naudojami mūsų matematinio eksperimento rezultatų analizei.

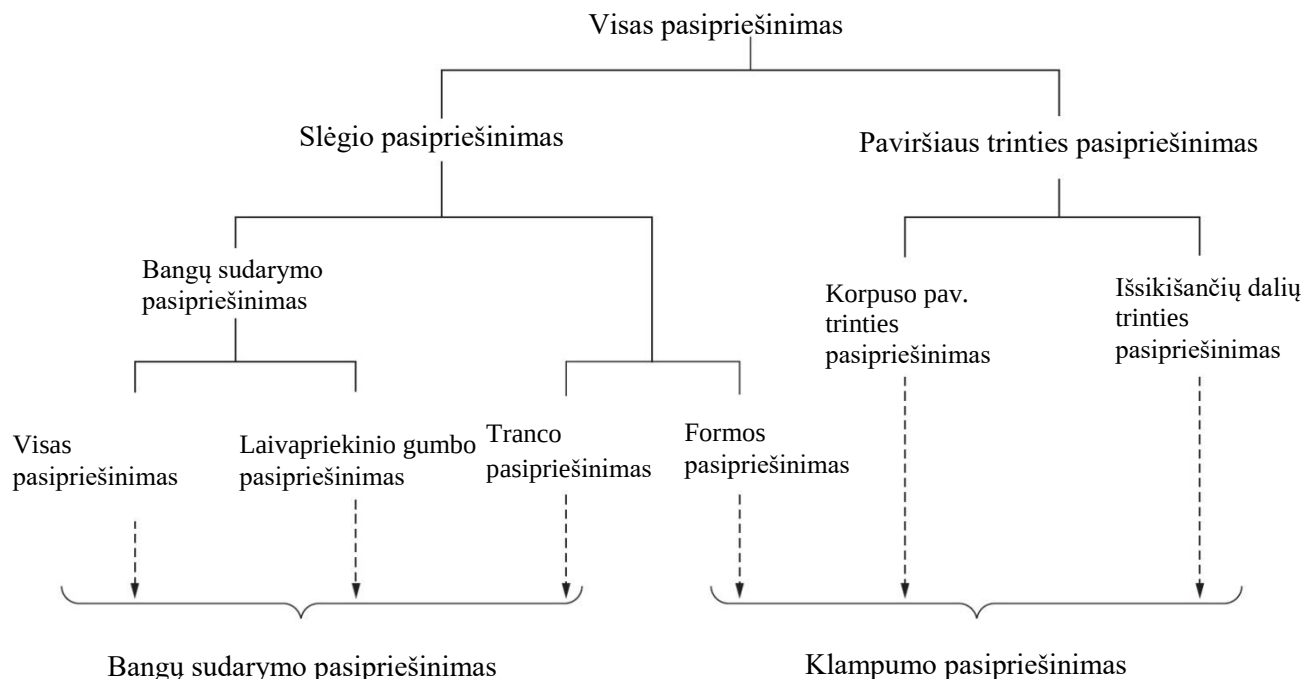
Išanalizavus mokslines literatūros šaltinius matome, kad pasaulyje vandens pasipriešinimo įvertinimui pagrinde naudojami tyrimai bandymų baseinuose, matematiniai

eksperimentai ir skaičiavimo metodikos naudojant FLOW-3D SSD programas, taip pat skaičiavimo metodikos, sudarytos pagal serijinių bandymų baseinuose rezultatus. Mes galimybės atlikti bandymų baseinuose neturime, todėl tyrimams atlikti pasinaudosime vandens pasipriešinimo skaičiavimo metodiką bei SSD programinę įrangą.

III. LAIVO PASIPRIEŠINIMO TEORIJA

Eigumas – laivo savybė išvystyti reikiamą greitį tam naudojant kuo mažiau galios [7].

Visas pasipriešinimas laivo judančio ramiame vandenyje susideda iš kelių komponentių.



3 pav. Laivo pasipriešinimo komponentės [atkurta iš 17]

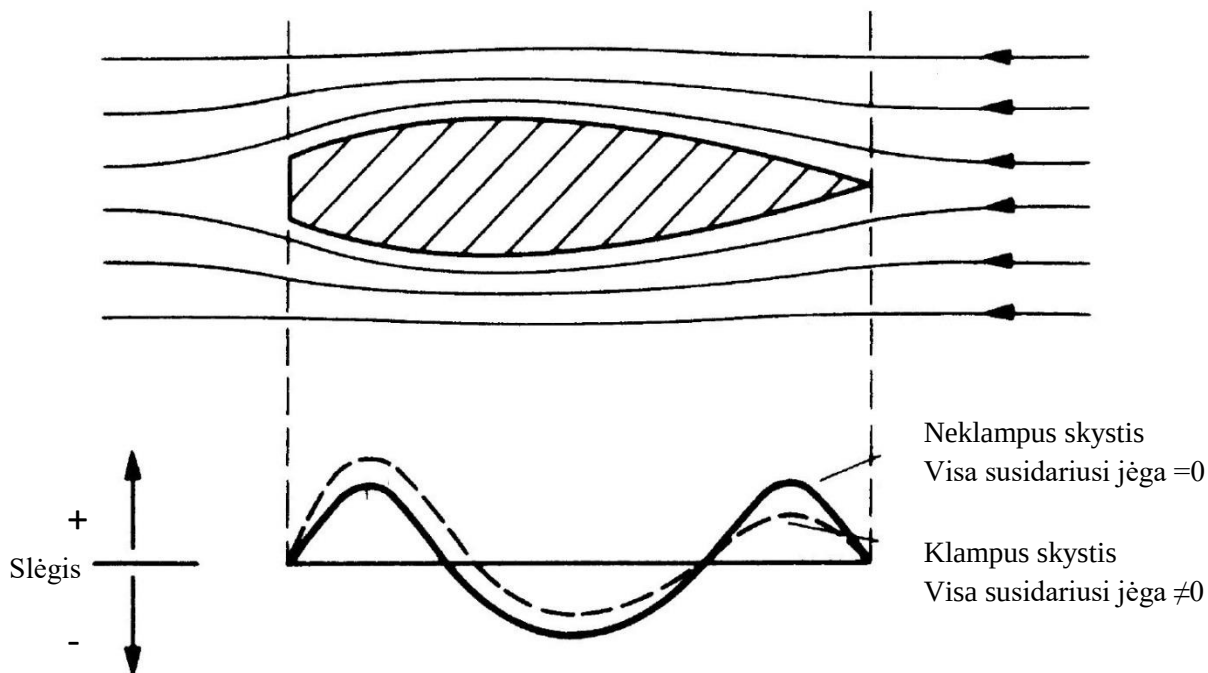
Tai bangų susidarymo pasipriešinimas RW, paviršiaus trinties pasipriešinimas RF, klampumo sudaryto slėgio pasipriešinimas (arba formos pasipriešinimas) RVP, oro pasipriešinimas RAA, išsikišančių dalių pasipriešinimas RAP. Kiekviena komponentė gali būti nagrinėjama atskirai, tačiau reikia nepamiršti kad kiekviena iš jų sąveikauja tarpusavyje. Detaliau panagrinėsime pagrindines pasipriešinimo komponentes.

3.1 Vandens pasipriešinimo dedamosios

Klasikinė hidrodinamikos teorija parodė, kad neklampiamame skystyje giliai paniręs kūnas nepatirs pasipriešinimo. Skystyje susidaro skirtingo slėgio zonos, kai srautas iškreipiamas ir dalelių 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).

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, kurių dydis priklausys nuo laivo generuojamos bangų sistemos energijos.



4 pav. Skystyje judančio kūno sukeltas slėgis [atkurta iš 22]

3.1.1 Bangų pasipriešinimas

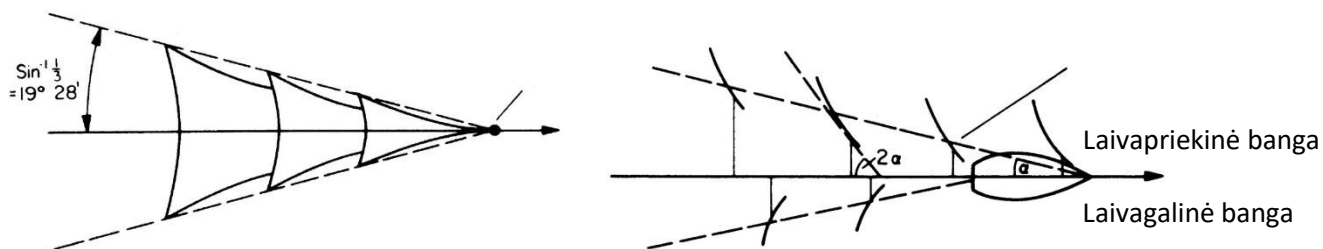
Įprasta, kad kūnas judantis ramiaame vandens paviršiuje sukelia bangas. Bangos (bangų sistema) atsiranda dėl susidariusio slėgio lauko aplink laivo korpusą, kurį sukelia judantis kūnas. Kadangi jis laikomas energijos transportuotojas (sukelėjas) jį veiks jėga priešinga judėjimui pirmyn. Ši susidariusi jėga vadinama **bangų sukeliamu 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 [22]:

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

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.



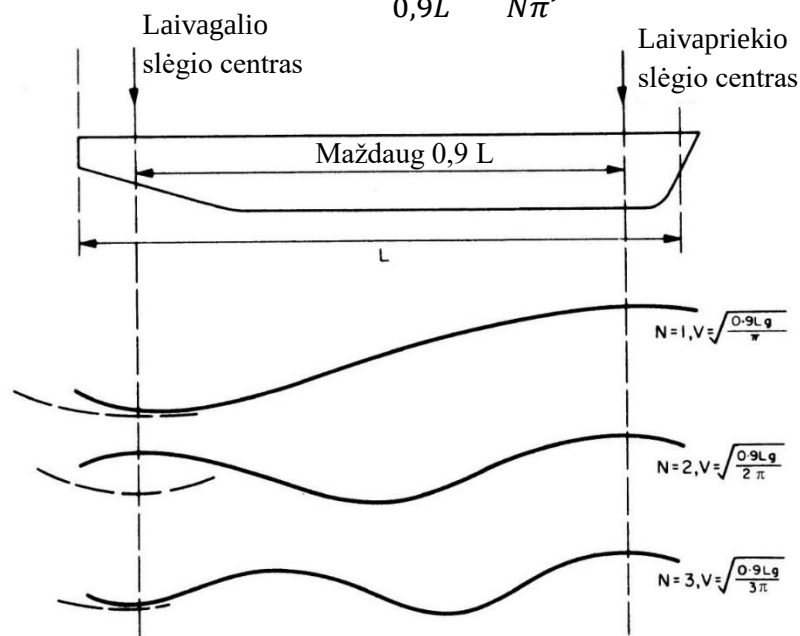
5 pav. Judančio slėgio taško ir laivo sukeltos bangų sistemos [atkurta iš 22]

Laivo korpusų formos sukurta bangų sistema yra sudėtingesnė laivapriekyje, prieš laivą vanduo pakyla formuojant bangos viršūnę, o laivagalyje susidaro laivo savosios bangos įduba. Susidariusi savųjų bangų sistema paprastai sudėtingėja dėl laivo formos išsikišusių dalių..

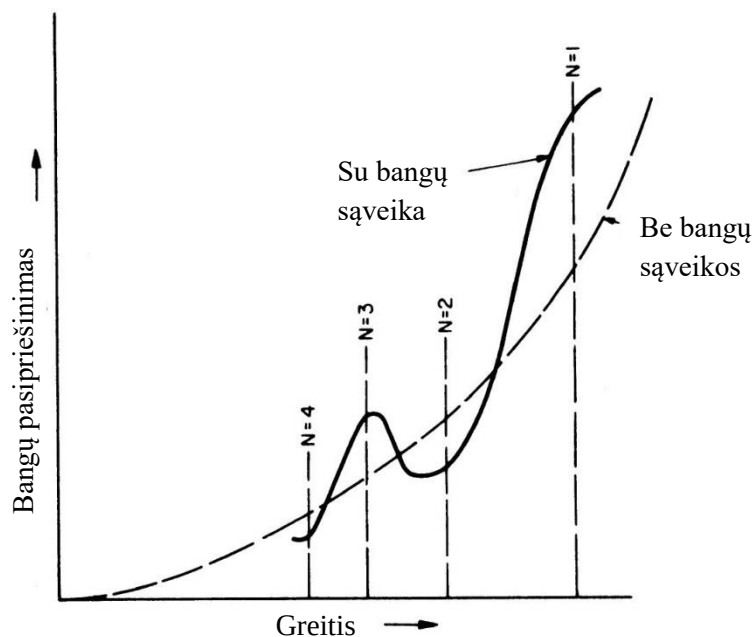
Laivapriekinė banga judant išilgai laivo susidūria su laivagaline banga. Priklausomai nuo laivagalinės ir laivapriekinės bangos šios bangos sudaro savo bangų sistemas kurios susidūrus padidėja arba sumažėja priklausomai nuo bangų sistemų plitimo fazių. Šis efektas priklauso nuo atstumo tarp laivapriekinės ir laivagalinės bangos ir nuo laivo judėjimo greičio.

Atstumas tarp laivapriekio ir laivagalio slėgio sistemų paprastai yra $0,9 L$. Sąlyga, kad laivapriekio bangos keteros arba įdubos sutaps su pirma laivagalio įduba yra [22]:

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



6 pav. Laivapriekio ir laivagalio bangų sistemų sąveika [atkurta iš 22]



7 pav. Laivo bangų sukulto pasipriešinimo priklausomybė nuo greičio
 $N=1,3,5,7$ ir t.t. [atkurta iš 22]

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

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

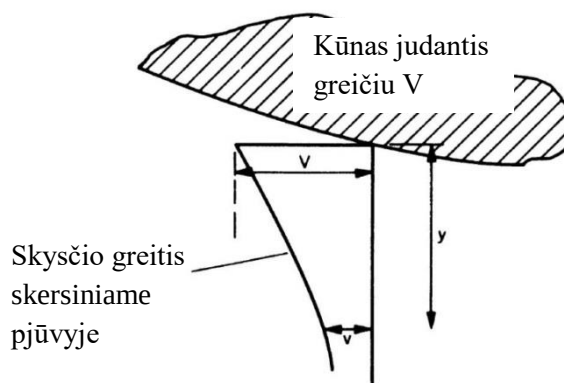
Kadangi Frūdo skaičius $F_r = V/\sqrt{gL}$, F_r reikšmės atitinkančios kauburiui ir įduboms yra tokios [20]:

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 ramiaame 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 [22].



8 pav. Pasisienio sluoksnis [atkurta iš 22]

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 (8 pav.), tada šlyties jėgos/įtempimai yra [22]:

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

čia μ – dinaminio klampumo koeficientas.

Tai taikoma laminariniam tekėjimui, kuriame kiekviena skysčio dalelė seka savo tėkme be masės perdavimo gretimams 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 [22]. 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 supastas, tačiau žinoma, kad jis seka greičio pasiskirstymo kreivę (7 pav.), tačiau ji žymi tik vidutinę greičio kreivę.

Vandens srautas yra pastovus kai esant mažiems Reynoldso skysčiams vanduo teka laminariniam srauto režime. Padidėjus Reynoldso skaičiui laminarinis srautas virsta turbulentiniu. Kritinis Re plokščiam paviršiui yra l funkcija (l - atstumas nuo priekinės briaunos/krašto). Priekyje, už l , apibrėžiama taip [22]:

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

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

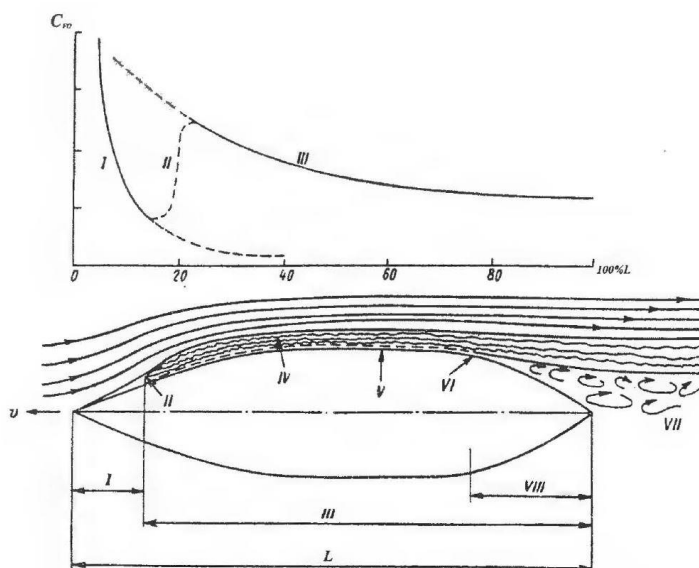
Plokščiam paviršiui kritinis Reynoldso skaičius yra maždaug 10^6 . Kreivam paviršiui, slėgio gradientas išilgai paviršiaus turi įtakos tekėjimo režimo perėjimui. Perėjimas yra atitolinamas vietose, kur slėgis mažesnis, pavyzdžiui ten, kur padidėjęs greitis. Šis reiškinys panaudotas kuriant kai kurias 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 [22].

Turbulentinio tekėjimo pasienio sluoksnio storis yra apytiksliai [22]:

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

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

Esant šiurkščiam paviršiui, pasipriešinimo kreivė kinta švelniai, kol pasiekiami 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 posluksnis; VI - pasieninio sluoksnio atitrūkimas; VII - hidrodinaminis pėdsakas; VIII - sukurių zona [8].

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.

Laivo eksploatacijos metu korpuso šiurkštumas tik didėja dėl apaugimo mikroorganizmais ir atsiradusios korozijos.

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 susidarymą laivagalyje, kuris būtų esant idealiems skysčiams. Dalis šio pasipriešinimo yra dėl sukurių, 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**. Pilnų apvadų laivai turi didžiausią formos pasipriešinimą.

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

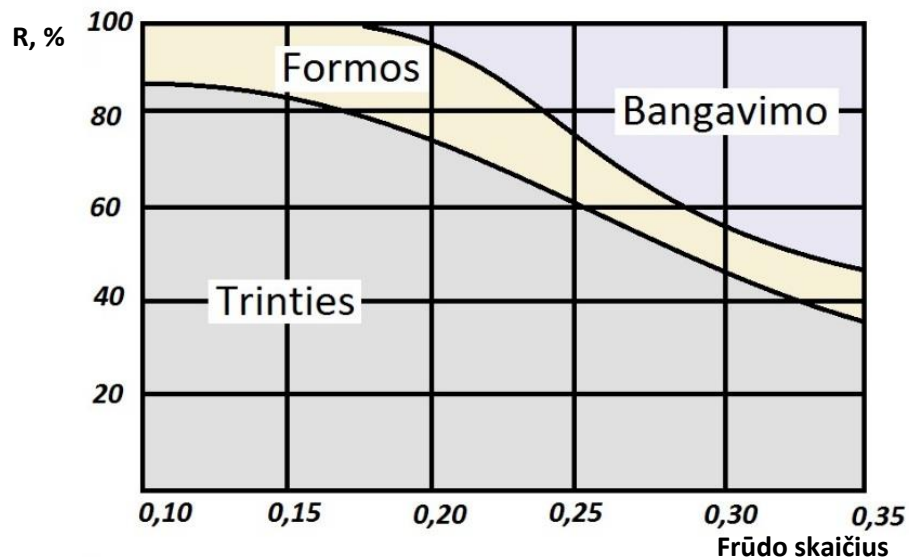
$$R_T = R_R + R_F, \quad (6)$$

čia R_R – Likęs pasipriešinimas;

R_F – Lygios ekvivalentinės plokštės trinties pasipriešinimas;

R_T – Visas pasipriešinimas.

Vandens pasipriešinimo dedamųjų priklausomybė yra parodyta 11 paveiksle.



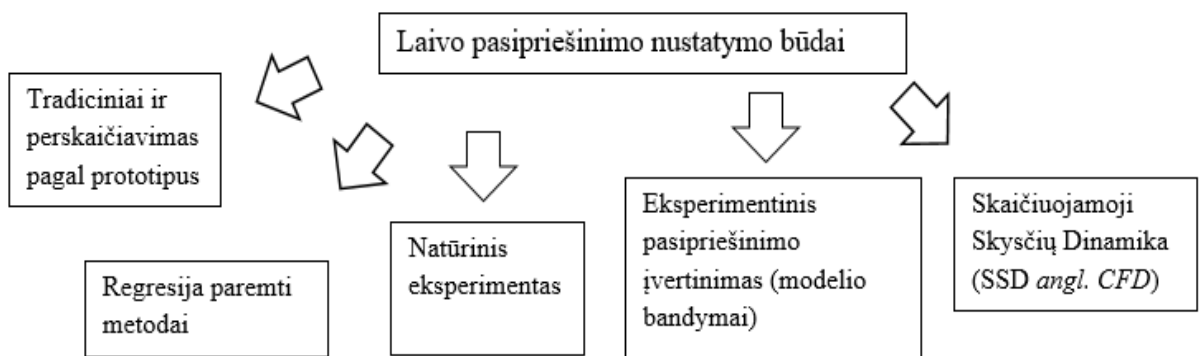
10 pav. Vandens pasipriešinimo dedamųjų pasiskirstymas priklausomai nuo Frūdo skaičiaus
[atkurta iš 8]

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

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 kokiame 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 tarpusiuojo rezultatai gali skirtis, todėl kiekvienu atveju reikėtų žinoti, kokį būdą tikslingiausia taikyti [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.



11 pav. Pasipriešinimo nustatymo metodai [atkurta iš 19]

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 sukeliantys 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 vandeniu naudojama kamera, kuri fiksuoją siūlelių padėtį. Tokiu būdų taip pat galima tirti korpuso ir sraigto sąveiką, 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 detalčiai nustatyti ir vizualiai pateikti vandens tėkmę aplink laivą ir jo elementus, bei jų sąveiką 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.

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.

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

Kaip buvo nustatyta išanalizavus literatūros šaltinius laivo korpuso hidrodinaminės charakteristikos galima įvertinti sekančiais būdais [15]:

- Skaičiavimai naudojant pasipriešinimo vertinimo metodiką, paremtą modelinių bandymų rezultatais;
- SSD matematinis eksperimentas;
- Modeliniai bandymai bandymų baseine;
- Natūriniai bandymai.

Mūsų darbe naudosime pirmus du hidrodinaminių charakteristikų įvertinimo būdus: skaičiavimai naudojant pasipriešinimo vertinimo metodiką, paremtą modelinių bandymų rezultatais [1], bei SSD matematinį eksperimentą naudojant *RANSE (Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations)* metodą [15].

IV. 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 klampiams 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.

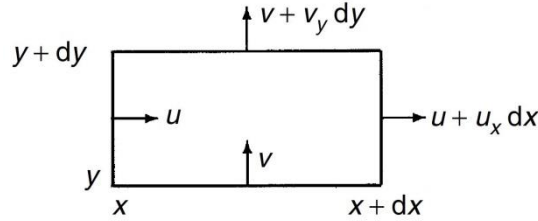
4.1 Pagrindinės SSD lygtys

Greičiuose, pasireiškiančiuose laivo sraute, vanduo gali būti priimamas kaip nespūdas, t.y. jo tankis ρ yra pastovus. Šiuo atveju apsiribosime nespūdziais skysčiais. Visos lygtys pateikiamos stačiakampėje koordinatinių sistemoje, kurioje z ašis nukreipta žemyn. Lygtys nenumerojamos, 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 13 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:

$$-\rho dy u + \rho dy(u + u_x dx) - \rho dx v + \rho dx(v + v_y dy) = 0 \quad (7)$$

$$u_x + v_y = 0$$



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

Tęstinumo lygtis trimatėje erdvėje gaunama atitinkamai [6]:

$$u_x + v_y + w_z = 0 \quad (8)$$

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:

$$\rho(u_t + uu_x + vv_y + ww_z) = \rho f_1 - p_x + \mu(u_{xx} + u_{yy} + u_{zz}) \quad (9)$$

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

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

čia f_i – pagreitis dėl tūrinės jėgos;

p – slėgis;

μ - klampumas;

t – laikas.

Dažnai tūrinės jėgos yra nepaisomos, tačiau trauka gali būti įtraukiama nustatant $f_3 = g$ ($g=9,81 \text{ m/s}^2$) arba sraigto veikimas gali būti modeliuojamas tūriniu jėgų pasiskirstymu f_1 .

$$\rho(u_t + uu_x + vv_y + ww_z) = \rho f_1 - p_x + \mu(u_{xx} + u_{yy} + u_{zz}) - \rho((\overline{u\dot{u}})_x + (\overline{u\dot{v}})_y + (\overline{u\dot{w}})_z) \quad (10)$$

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

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

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

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

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

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

Didelio masto sukurių simuliacijos *LES (LES angl. Large eddy simulations)* yra tarp *Navier Stroke* lygčių ir tarp *RANSE*. *LES* leidžia tinklėliui išspręsti didelius sukurius turbulencijoje tiesiogiai ir modeliuoja tik mažesnes turbulentines struktūras. Priklausomai nuo to kokio detalumo (smulkumo) minėtieji turbulentiniai sukuriai, šis metodas krypta arčiau *RANSE* arba *Navier-Stokes* metodo. Kol kas tik keletas tyrimų atlikta siekiant ištirti laivo sukeliamus srautus *LES* metodu, tačiau tinklėlis dažniausiai būna pernelyg grubus palyginus su *RANSE* sprendimais.

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

$$\rho(u_t + uu_x + vu_y + wu_z) = \rho f_1 - p_x \quad (11)$$

$$\rho(v_t + uv_x + vv_y + wv_z) = \rho f_2 - p_y$$

$$\rho(w_t + uw_x + vw_y + ww_z) = \rho f_3 - p_z$$

Eulerio metodas leidžia naudoti grubesnius tinklėlius ir yra patvaresnis nei *RANSE* metodas. Šie metodai tinkami spręsti srautus aplink keliamąją jėga sukeliančius 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*):

$$\nabla \times \vec{v} = \begin{pmatrix} \partial/\partial y \\ \partial/\partial z \end{pmatrix} \times \vec{v} = 0 \quad (12)$$

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:

$$\vec{v} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \nabla \phi \quad (13)$$

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

$$\Delta \phi = \phi_{xx} + \phi_{yy} + \phi_{zz} = 0 \quad (14)$$

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

$$\nabla \left(\phi_t + \frac{1}{2} (\nabla \phi)^2 - gz + \frac{1}{\rho} p \right) = 0 \quad (15)$$

Integruojant gauname Bernulio lygtį:

$$\phi_t + \frac{1}{2}(\nabla\phi)^2 - gz + \frac{1}{\rho}p = \text{const.} \quad (16)$$

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.

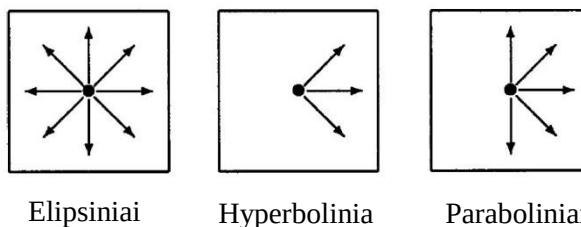
Pasienio sluoksnio lygtys įveda supaprastinimus fiziniame modelyje: difuzija (atsiskyrimas) dominuojančiame sraute yra nepaisoma, pasienio sluoksnio storis yra mažas, o slėgis sluoksnyje yra pastovus. Šios prielaidos yra sulaužomos greta atsiskiriančio pasienio sluoksnio. Todėl atsiskyrimas negali būti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

$$A \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + 2B \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} + C \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} + a \frac{\partial f}{\partial x} + b \frac{\partial f}{\partial y} + cf + d = 0 \quad (17)$$

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 13 pav.



13 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.

4.2 Tinklelio sudarymas

Dauguma SSD skaičiavimo metodikų remiasi į tam tikros erdvės (ploto) suskaidymo į mažesnius elementus/daleles, kuriuose nustatomi vidutiniai srauto kintamieji. Ši suskaidyta erdvė (plokštuma, paviršius arba tūris) vadinama tinkleliu. Tinklelis turi didelės įtakos konvergencijos (susiliejo) 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*).

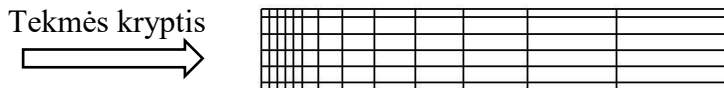
Svarbios tinklelio savybės į kurias reikia atsižvelgti norint gauti tikslius rezultatus:

- Tinklelio tankumas.
- Gretutinių elementų ilgio ir tūrio santykis.
- Asimterija.
- Šešiakampis ar keturkampis elementas.
- Pasielino 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.
- Šešiabriauniai elementai (*angl. cell*) duos tikslesnius rezultatus esant tam pačiam elementų skaičiui, ypač jei tinklelio linijos yra išdėstytos atsižvelgiant į srautą.
- Tinklelio tankumas turi būti pakankamai didelis, kad užfiksuotų visus reikiamus srauto reiškinis ir savybes.
- 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, keturkampiai, šešiakampiai, ar kiti geometriškai sudėtingesni elementai.
- Kraštinių santykis tai santykis tarp ilgiausios ir trumpiausios kraštinės ilgių. 1 santykis idealus lygiakraščiams trikampiams ir kvadratai.
- Tinklelio dalelių dydžio pasikeitimas turi būti laipsniškas, švelnus ir sklandus. Gretimų elementų dydžio skirtumas neturėtų būti didesnis nei 20%.
- Rekomenduojama maža lygiakampių asimetrija, ji neturėtų viršyti 0,85-0,9 reikšmės.
- Atitinkamui srautui turėtų būti sukurtas atitinkamas tinklėlis. 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 (15 pav.).
- Tam kad dalelių (elementų) kiekis nebūtų perdidelis, o rezultatai būtų pakankamai tikslūs reikia naudoti nevienodą (kintantį) tinklėlį, sutelkiant tinklėlio elementus tik ten, kur jie reikalingi arba panaudojant preliminarinius rezultatus esant grubiam tinklėliui tobulintį tinklėlį atsižvelgiant į gautus srauto rezultatus. Hibridinis tinklėlis suteikia lanksčiausias galimybes.



14 pav. Teisingas kintančio tinklėlio sudarymas srauto tekės kryptimi

4.3 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. Galima išskirti du pagrindinius vizualizavimo modelius/būdus:

- **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 tinklėlio 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/tekumą pateikti vizualiai suprantama forma. Tyrimieji objektai, reiškiniai ir aplinka gali būti pateikiama paveikslukų arba animacijos pavidalu.

Pagrindiniai srauto/tekumos atvaizdavimo elementai:

- **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 tekumos ir laiko tekumos 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 tekumos 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 tekumos kitumus kaip susisukimus ir vingius.
- **Dalelės ir kiti elementai.**

Atvaizduojant srauto tekumą, 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:

- **Tekumos krypties kreivė** (*angl. Streamline*). Tai tekumos kreivė kurią nubrėžia judanti dalelė. Tekumos 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 tekumos kryptį. Kadangi atvaizduota tekumos kryptis (kelias) yra dalelės kiekvieno laiko momento projekcija, negalime numatyti kokiu 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 tėkmės kreivė, suformuota iš keletos dalelių “įleistų” į srautą tuo pačiu laiko momentu ir sujungtų kreive. Laiko juostos neparodo judėjimo trajektorijos, tačiau parodo daleles tam tikru laiko momentu. Pagal laiko juostą galime numatyti koku greičiu juda dalelės (srautas), kaip jos pasiskirsto po tam tikro laiko tarpo.
- **Srauto dryželiai** (*angl. Streak lines*.) tai dalelių eilė, palaipsniui paleidžiamos į srautą. Panaši į laiko juostos kreivę, tačiau skirtumas toks, kad visos dalelės paleidžiamos į srautą ne iškart, 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.

Reikia pabrėžti, kad perdaug 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:

- Perspektuva. Lygiagretūs kraštai susilieja toluomoje, 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 toluomoje.
- Optiniai efektai. Tokie kaip lauko/ryškumo gylis (*angl. DOF*).
- Interaktyvus ekspserimento atvaizdavimas. Kai naudotojas gali valdyti vizualizaciją trimatėje ardvėje (sukioti, keisti matymo padėtį ir pan.).

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

V. KATAMARANO VANDENS PASIPRIEŠINIMO SKAIČIAVIMO METODIKA

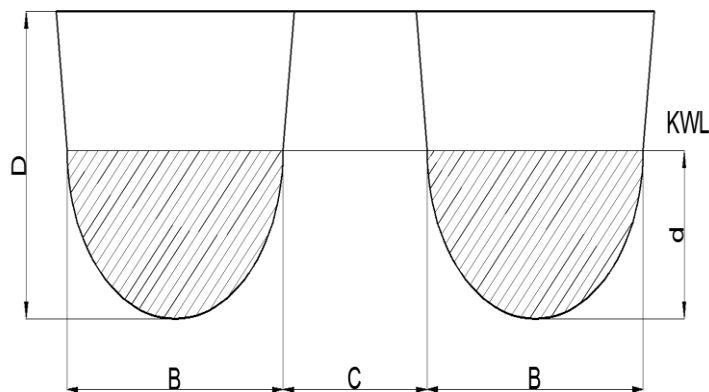
Pakankamai patikimai buksyravimo pasipriešinimą galima apskaičiuoti atliekant modelinius bandymus bandymų baseine ir gautus rezultatus perskaičiuoti natūrai. Pradinio projektavimo stadijoje labai aktualu įvertinti įvairių matmenų ir išdėstymų daugiakorpusių laivų pasipriešinimą. Taipogi preliminarus vandens pasipriešinimo įvertinimas neišvengiamai reikalingas norint įvertinti ekonominį faktorių (eksploatacijos sąnaudas), todėl reikalinga metodika galinti įvertinti plaukiančio daugiakorpusio laivo vandens pasipriešinimą ankstyvojoje projektavimo stadijoje. Toks metodas gali būti pagrįstas atliekant katamaranų eksperimentinius tyrimus įvertinant likusį pasipriešinimą ir suskirstant juos į grupes, pagal pagrindinius korpuso parametrus, klirensą ir greitaeigiškumą.

Analizuojant katamaranų likusį pasipriešinimą be korpuso formos parametrų L/B , B/d , δ būtina papildomas dedamasi įvertinantis korpusų tarpusavio išsidėstymą skersine laivo kryptimi. Tokia bedimensinė charakteristika priimamas santykinis klirensas tarp korpusų (16 pav.):

$$\bar{C} = \frac{C}{2B}, \quad (18)$$

čia C – atstumas tarp vidinių korpuso bortų midelinio špaunhauto zonoje (klirensas), kai grimzlė d , m ;

B – atskirų korpusų plotis ties midelinio špaunhauto kai grimzle d , m .



15 pav. Simetrinis katamarano vienodų korpusų išdėstymas

Pilną vandens pasipriešinimą katamaranams, apskaičiuoti galima panaudojant formulę:

$$R_p = \frac{1}{2} \rho \Omega (C_{FO} + C_A) v^2 + R_{liek} + R_{AP}, \quad (19)$$

čia: ρ – vandens masės tankis;

v – laivo greitis;

Ω – suvilgyto paviršiaus plotas;

C_{FO} – techniškai lygios plokštės trinties pasipriešinimo koeficientas;

C_A – koeficientas įvertinantis laivo korpuso paviršiaus šiurkštumą;

R_{liek} – likęs pasipriešinimas;

R_{AP} – papildomas pasipriešinimas nuo išsikišančių dalių.

Į šią formulę įeinantis likęs pasipriešinimas randama iš išraiškos:

$$R_{liek} = \frac{1}{2} \rho \Omega C_R v^2 ; \quad (20)$$

čia: C_R – likusio pasipriešinimo koeficientas.

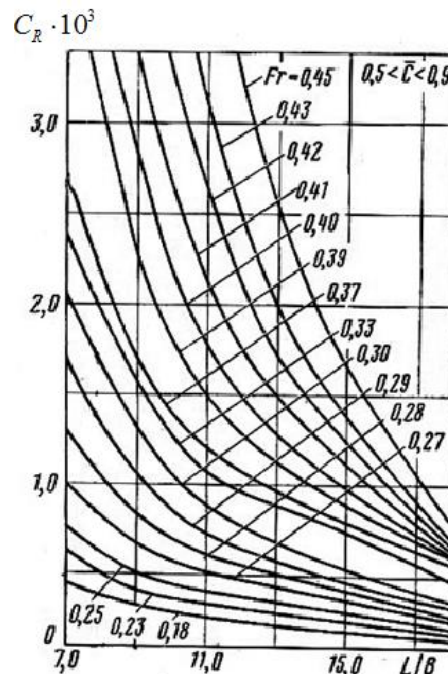
Likusiojo pasipriešinimo koeficientui C_R laivui plaukiant iki kritinių greičių zonoje apskaičiuoti naudojama formulė:

$$C_R = C_R^{L/B} \cdot \chi_{B/T} \cdot \chi_{\delta} , \quad (21)$$

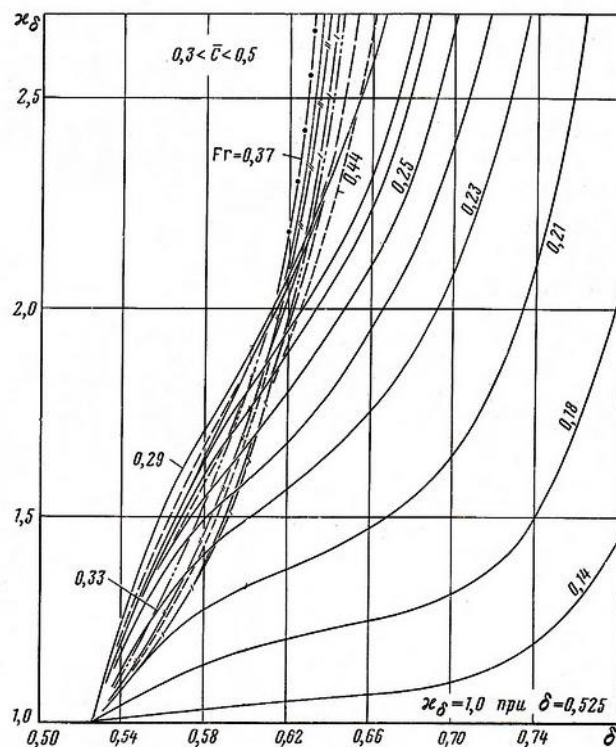
čia: $C_R^{L/B}$ – likusio pasipriešinimo koeficientas;

$\chi_{B/T}$ – santykio B/T įtaka likusio pasipriešinimo įvertinimui;

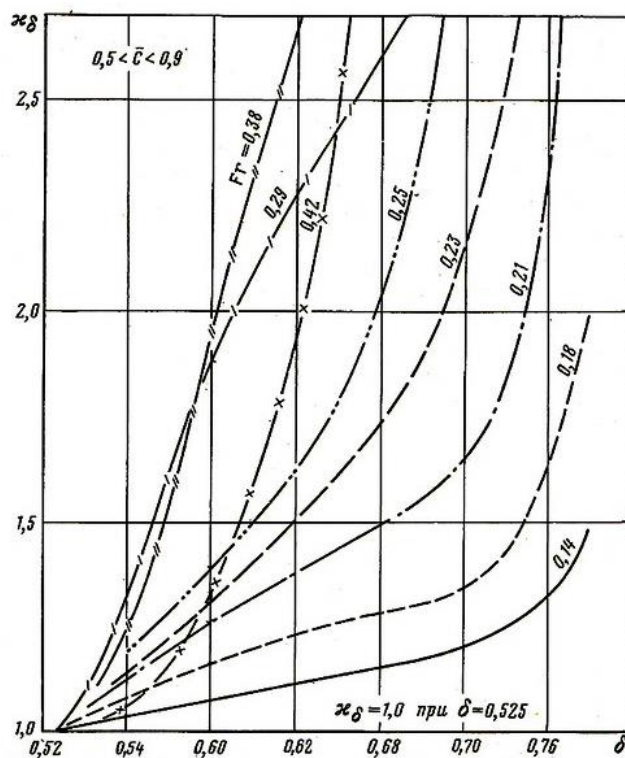
χ_{δ} – vandentalpos pilnumo koeficiento δ įtaka likusio pasipriešinimo įvertinimui.



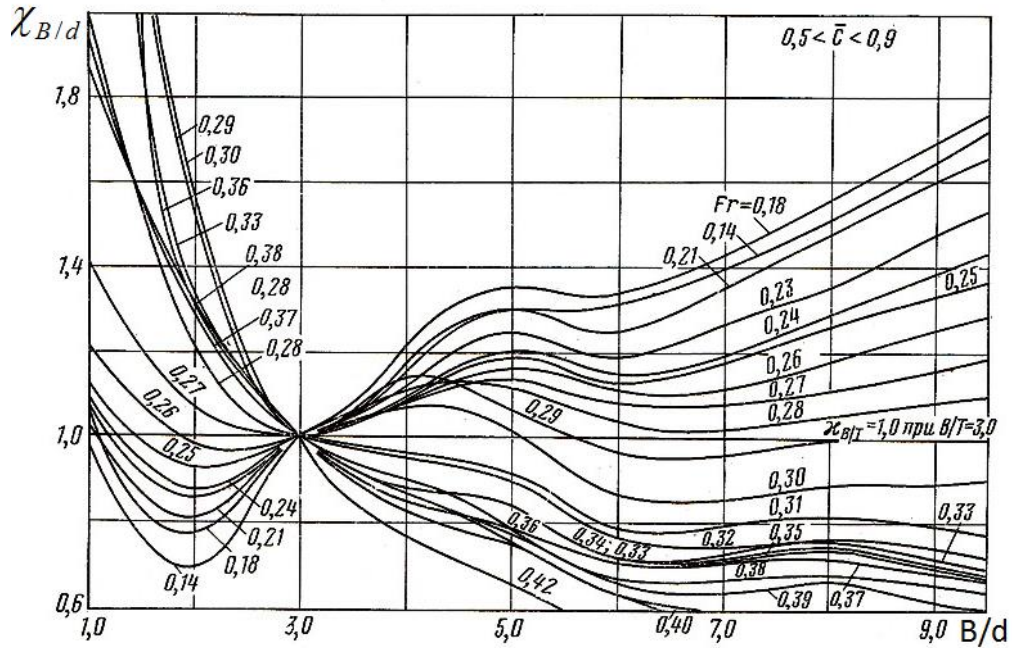
16 pav. Parametro L/B įtaka katamarano likusio pasipriešinimo koeficientui, kai laivas juda iki kritinių greičių zonoje giliame vandenyje, kai $0,5 < \overline{C} < 0,9$. [atkurta iš 1]



17 pav. Parametro δ įtakos likusio pasipriešinimo pasikeitimui, katamaranui plaukiant iki kritinių greičių zonoje, kai $0,3 < \bar{C} < 0,5$ ir $L/B < 15$ grafikas. [atkurta iš 1]



18 pav. Parametro δ įtakos likusio pasipriešinimo pasikeitimui, katamaranui plaukiant iki kritinių greičių zonoje, kai $0,5 < \bar{C} < 0,9$ ir $L/B < 15$ grafikas. [atkurta iš 1]



19 pav. Parametro B/d įtakos likusio pasipriešinimo pasikeitimui katamaranui, plaukiant iki kritinių greičių zonoje, kai $0,5 < \bar{C} < 0,9$ grafikas. [atkurta iš 1]

Įvertinant papildomą pasipriešinimą skaičiuojama pagal formulę:

$$R_{AP} = \frac{1}{2} \rho \Omega C_{AP} v^2, \quad (22)$$

kur C_{AP} – koeficientas įvertinantis išsikišančių dalių pasipriešinimą.

Galima rasti vandens pasipriešinimą laivo judėjimui giliame ir ramiame vandenyje pagal formulę:

$$R_p = \frac{1}{2} \rho \Omega C_p v^2 \quad (23)$$

iš šios formulės visas vandens pasipriešinimo koeficientas yra lygus:

$$C_p = C_{FO} + C_A + C_R + C_{AP} \quad (24)$$

Skaičiuojant likusį pasipriešinimą naudojama: grupė diagramų L/B (17 pav.), B/d įtakos grafikas (20, 21 pav.) ir δ įtakos likusiam pasipriešinimui grafikas pateiktas (18, 19 pav.).

Atitinkamiems Frudo skaičiams Reinoldso skaičius randamas pagal formulę:

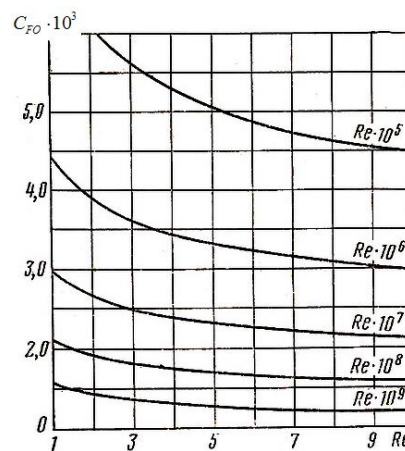
$$Re = Fr \frac{\sqrt{gL^3}}{\nu}, \quad (25)$$

čia $\nu = 1,57 \cdot 10^{-6}$ – vandens kinematinio klampumo koeficientas kai vandens temperatūra $4^\circ C$.

Pagal Reinoldso skaičių iš grafiko (22 pav.) randamos trinties pasipriešinimo koeficiento C_{FO} reikšmės. Papildomas koeficientas įvertinantis laivo korpuso paviršiaus šiurkštumą keltams, krovininio tipo katamaranams lygus $C_A = 0,5 \cdot 10^{-3}$. Panaudojant šiuo duomenis trinties pasipriešinimas randamas iš formulės:

$$R_{tr} = \frac{1}{2} \rho \Omega (C_{FO} + C_A) v^2. \quad (26)$$

Įvertinus papildomą pasipriešinimą nuo išsikišančių dalių $C_{AP} = 0,1 \cdot 10^{-3}$, galima apskaičiuoti suminį pasipriešinimo koeficientą pagal formulę (24). Priklausomai nuo Frudo skaičiaus visas vandens pasipriešinimas skaičiuojamas pagal formulę (23). [1]



20 pav. Trinties pasipriešinimo koeficiento C_{FO} grafikas pagal Prandtlį ir Šlichtingą.

[atkurta iš 1]

5.1 Laivo pasipriešinimo skaičiavimas

Atsižvelgiant į skyriaus „Katamarano vandens pasipriešinimo skaičiavimo metodika“, teorinę dalį ir formules, skaičiuosime katamarano korpuso vandens pasipriešinimą. Rankiniu būdu apskaičiuosime vandens pasipriešinimą vienam katamarano pusės korpusui. Tam, kad pradėtume rankinius skaičiavimus, naudosime laivo teorinio brėžinio duomenis, gautus iš Delftship programos žr. priedą 2, kuriuo remiantis įvertinsime laivo santykinus koeficientus bei reikiamus dydžius pasipriešinimui apskaičiuoti.

čia: B – vieno katamarano korpuso plotis ties grimzle, m;

L – vieno katamarano korpuso ilgis, m;

d – grimzlė, m;

δ – pilnumo koeficientas;

C – atstumas tarp korpusų vaterlinijos lygyje ties mideliu, m;

Ilgio ir pločio santykis:

$$\frac{L}{B} = \frac{38.4}{3.65} = 10.52 \quad (27)$$

Pločio ir grimzlės santykis:

$$\frac{B}{d} = \frac{12}{2.8} = 4.28 \quad (28)$$

Pagal (18) formulę įvertiname katamarano santykinį klirensą:

$$\bar{C} = \frac{4.7}{3.65 \cdot 2} = 0.64 \quad (29)$$

Likusiam pasipriešinimui skaičiuoti koeficiento C_R reikšmės skaičiuojamos naudojant formulę. Koeficientai $C_R^{L/B}$, χ_δ , $\chi_{B/d}$ paimami iš pateiktų (17, 18, 19, 20, 21 pav.), kai santykinis klirensas $\bar{C}=0.64$.

Pagal Reinoldso skaičių iš grafiko (21 pav.) randame C_{FO} reikšmes. Taip pat koeficientas, kuris įvertina laivo korpuso šiurkštumą, priimamas šiuo dydžiu $C_A = 0.5 \cdot 10^{-3}$, koeficientas dėl išsikišančių dalių priimamas dydžiu $C_{AP} = 0.1 \cdot 10^{-3}$. Visos gautos reikšmės iš formulių pilno pasipriešinimo skaičiavimui pateikiamos 1 lentelėje.

1 lentelė. Vandens pasipriešinimo skaičiavimo rezultatai skirtingiems greičiams

Dydis	Dimensija	Skaitinė reikšmė				
v	mazgai	6,48	8,1	9,72	11,34	12,96
v_0	km/h	12,00	15,00	18,00	21,00	24,00
v	m/s	3,33	4,17	5,00	5,83	6,67
Fr	-	0,172	0,215	0,258	0,301	0,343
	-	0,25	0,30	0,52	1,07	1,30
$\chi(B/T)$	-	0,90	0,95	1,10	2,00	2,40
$\chi\delta$	-	1,70	2,60	3,20	3,60	4,00
C_R	-	0,383	0,741	1,830	7,704	12,480
R_{liek}	kN	1,340	4,055	14,425	82,640	174,852
$Re \cdot 10^{-8}$	-	0,82	1,02	1,22	1,43	1,63
$C_A \cdot 10^3$	-	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
$C_{FO} \cdot 10^3$	-	2,20	2,12	2,06	2,02	1,99
$(C_{FO} + C_A) \cdot 10^3$	-	2,70	2,62	2,56	2,52	2,49
R_{tr}	kN	9,457	14,339	20,175	27,032	34,886
$C_{AP} \cdot 10^3$	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
C_P	-	3,183	3,461	4,490	10,324	15,070
R	kN	11,147	18,942	35,389	110,744	211,140
P_E	kW	37,16	78,92	176,94	646,01	1407,60
P_S	kW	57,17	121,42	272,22	993,86	2165,54

Ilgio ir pločio santykis:

$$L/B = \frac{L}{B} = \frac{38.4}{3.65} = 10.52 \quad (30)$$

Pločio ir santykis:

$$B/T = \frac{B}{T} = \frac{3.65}{2.8} = 1.30 \quad (31)$$

Greitis:

$$v = \frac{v_0}{3.6} = \frac{12}{3.6} = 3.33 \quad (32)$$

Frūdo skaičius:

$$Fr = \frac{v}{\sqrt[3]{9.81 \cdot L}} = \frac{3.33}{\sqrt[3]{9.81 \cdot 38.4}} = 0.172 \quad (33)$$

Likusio pasipriešinimo koeficientas:

$$C_R = C_R^{L/B} \cdot \chi(B/T) \cdot \chi\delta = 0.25 \cdot 0.9 \cdot 1.7 = 0.383 \quad (34)$$

Pasipriešinimas:

$$R_{liek} = \frac{0.5 \cdot r \cdot S \cdot C_R \cdot v^2}{1000} = \frac{0.5 \cdot 1.025 \cdot 615.1 \cdot 0.383 \cdot 3.33^2}{1000} = 1.340 \quad (35)$$

Reinoldso skaičius:

$$Re \cdot 10^{-8} = \frac{Fr \pm \sqrt{9.81 \cdot L^2}}{v} = 0.82 \quad (36)$$

Koeficientas, įvertinantis laivo korpuso paviršiaus šiurkštumą ir išsikišusių dalių pasipriešinimą:

$$(C_A + C_{AP}) \cdot 10^3 = C_A + C_{AP} = 2.2 + 0.5 = 2.7 \quad (37)$$

Trinties pasipriešinimo koeficientas:

$$R_{TR} = \frac{0.5 \cdot S \cdot r \cdot ((C_A + C_{AP}) \cdot 10^3) \cdot v^2}{1000} = \frac{0.5 \cdot 615.1 \cdot 1.025 \cdot 2.7 \cdot 3.33^2}{1000} = 9.457 \quad (38)$$

Bendras pasipriešinimo koeficientas:

$$R = C_R + (C_A + C_{AP}) \cdot 10^3 + zid = 0.383 + 2.7 + 0.1 = 3.183 \quad (39)$$

Trinties pasipriešinimas:

$$R_{TR} = \frac{0.5 \cdot S \cdot r \cdot C_p \cdot 10^3 \cdot v^2}{1000} = \frac{0.5 \cdot 615.1 \cdot 1.025 \cdot 3.183 \cdot 3.33^2}{1000} = 11.147 \quad (40)$$

Buksyravimo galia:

$$P_E = R \cdot v = 11,147 \cdot 3,33 = 37,16 \quad (41)$$

Variklio galia:

$$P_S = \frac{P_E}{\eta_D} = \frac{37,16}{0,65} = 57,17 \quad (42)$$

čia: η – propulsinio komplekso naudingumo koeficientas (0,65);

Atlikus visus pasipriešinimo skaičiavimus sudarome pasipriešinimo jėgos nuo greičio priklausomybės grafiką (22 pav.).



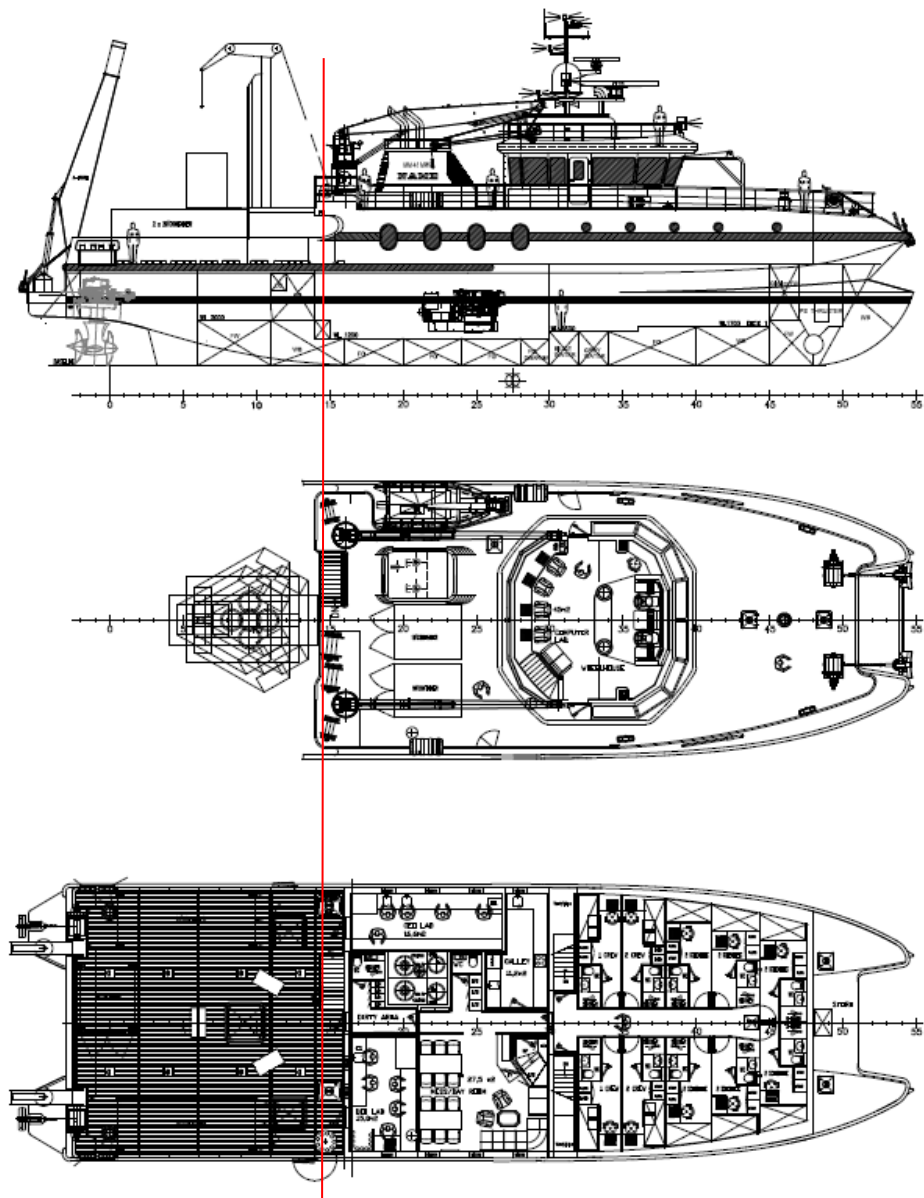
21 pav. Katamarano vandens pasipriešinimo priklausomybė nuo greičio grafikas

Atlikus matematinius skaičiavimus, naudojant Alferiev metodą, matome, kad gauti rezultatai skaičiuojant originaliam laivui „Mintis“ gerai dera realaus laivo eksploataciniais parametrais. Laivas „Mintis“ išvysto 11 mazgų greitį panaudojant apie 70% propulsinės sistemos galingumą, kas sudaro apie 1000 kW. Todėl vėliau bus atlikti matematiniai skaičiavimai 4 laivo ilginimo variantams.

VI. EKSPERIMENTO SUDARYMAS LAIVUI MINTIS

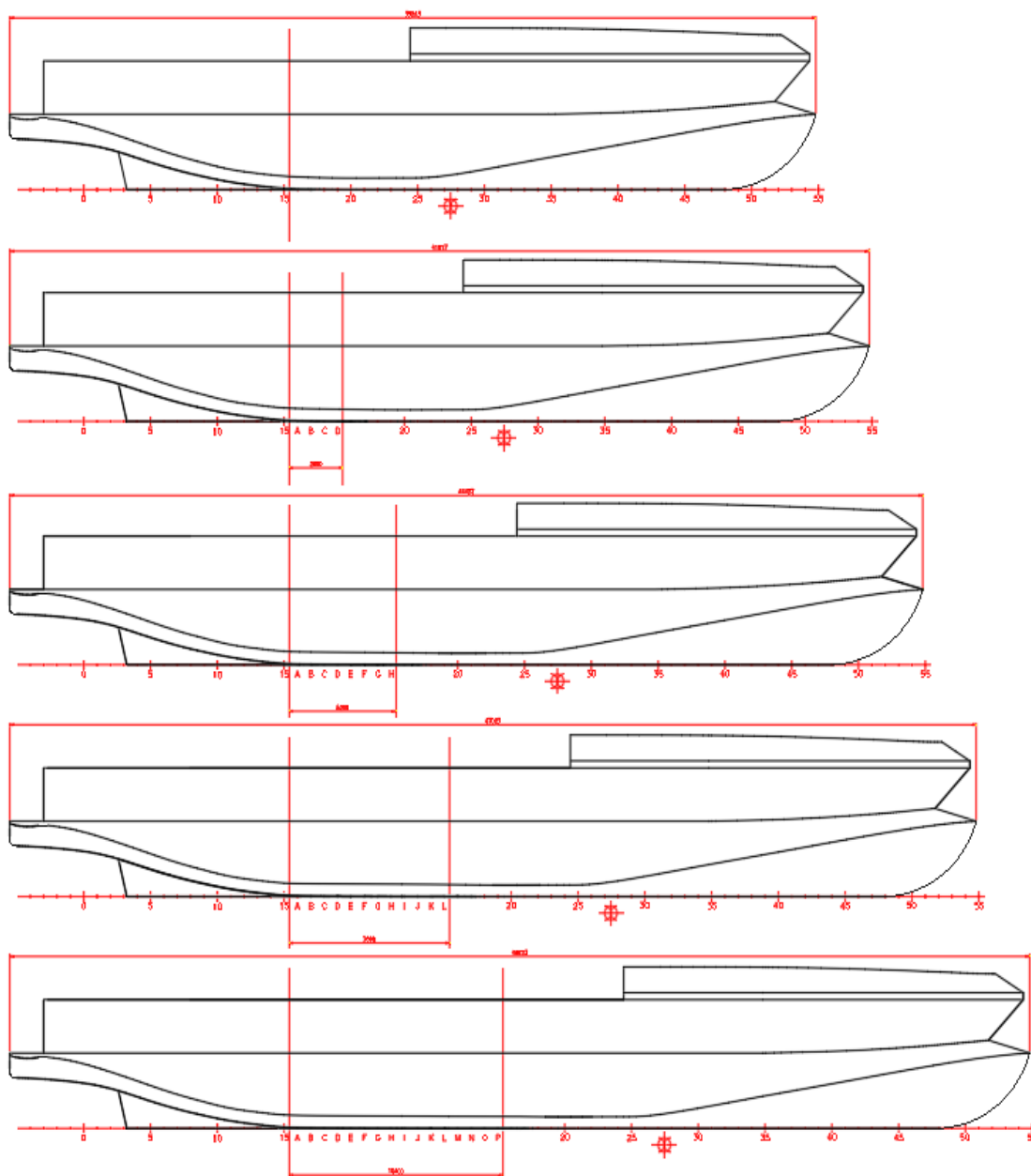
Sėkmingam eksperimento sudarymui reikia nustatyti tinkamiausią vietą laivo skerspjūviui daryti, kad naudojantis DELFTship programa būtų galima pailginti laivą. (23 pav.)

Atlikus bendrą laivo išdėstymo analizę nustatyta, kad tinkamas variantas skerspjūviui yra ties 15 španhoutu. Tokiu atveju būtų daroma mažiausia žala laivo korpusui, pagalbinėms patalpoms, bei jau esamai sumontuotai įrangai. Daryti skerspjūvį per anstatą būtų labai technologiškai sudėtinga, nes reikėtų ardyti laive sumontuotą apdailą, izoliacines medžiagas ir sistemas, demontuoti brangią tyriamąją įrangą, kas pabrangins planuojamus modernizavimo darbus. Pjūvio vietos pailginimui pasirinkimą lėmė mažiausiai sąnaudų reikalaujantis sprendimas.



22 pav. Laivo „Mintis“ bendras išdėstymas ir planuojamo skerspjūvio vieta.

Naudojantis programa DELFTSHIP pasirinktoje vietoje bus įkeliami 4 blokai po 2,6 metrų ilgio. Viso laivo korpusas pailgintas 10,4 m. (24 pav.)

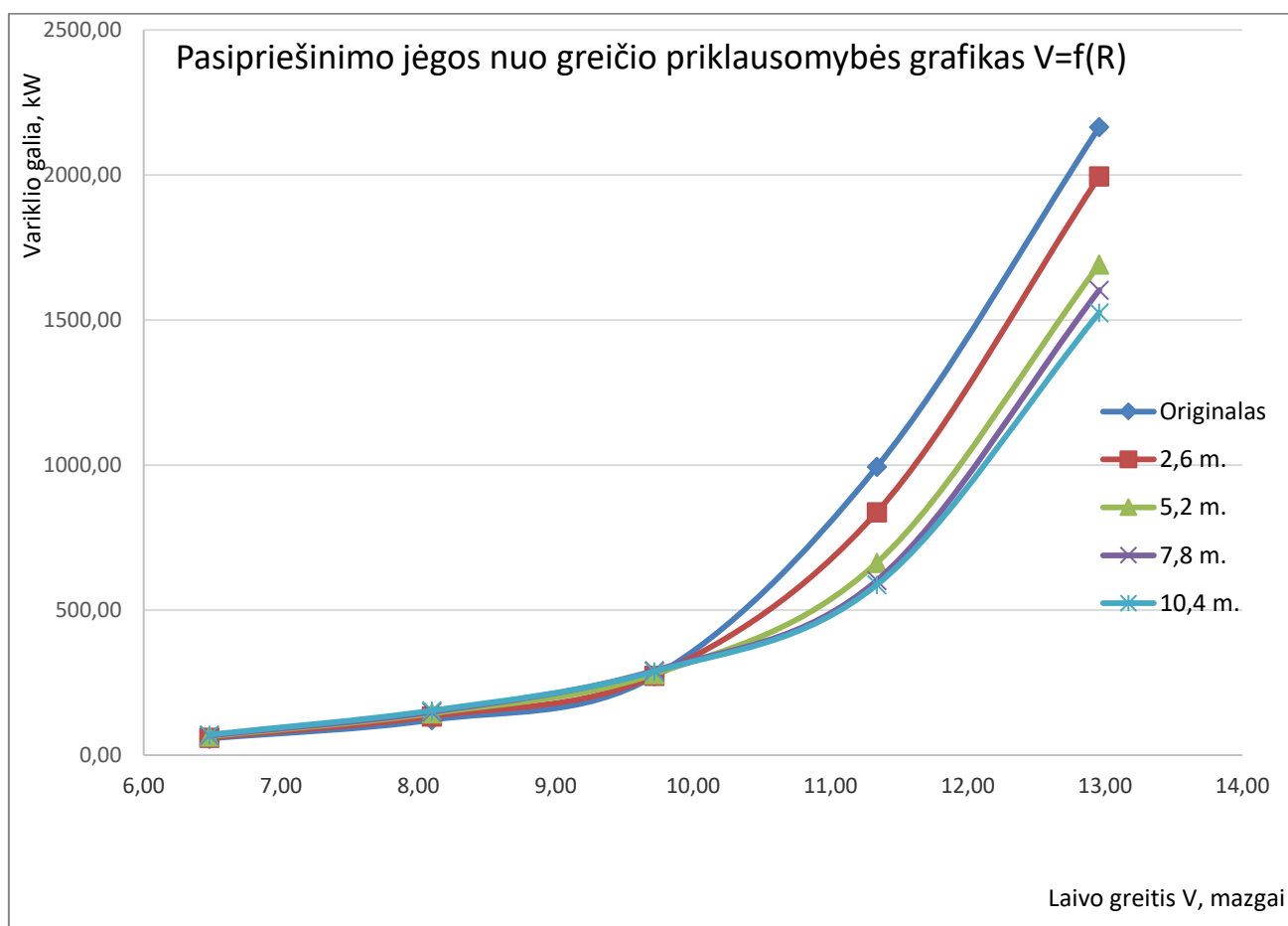


23 pav. Laivo „Mintis“ korpuso ilginimas.

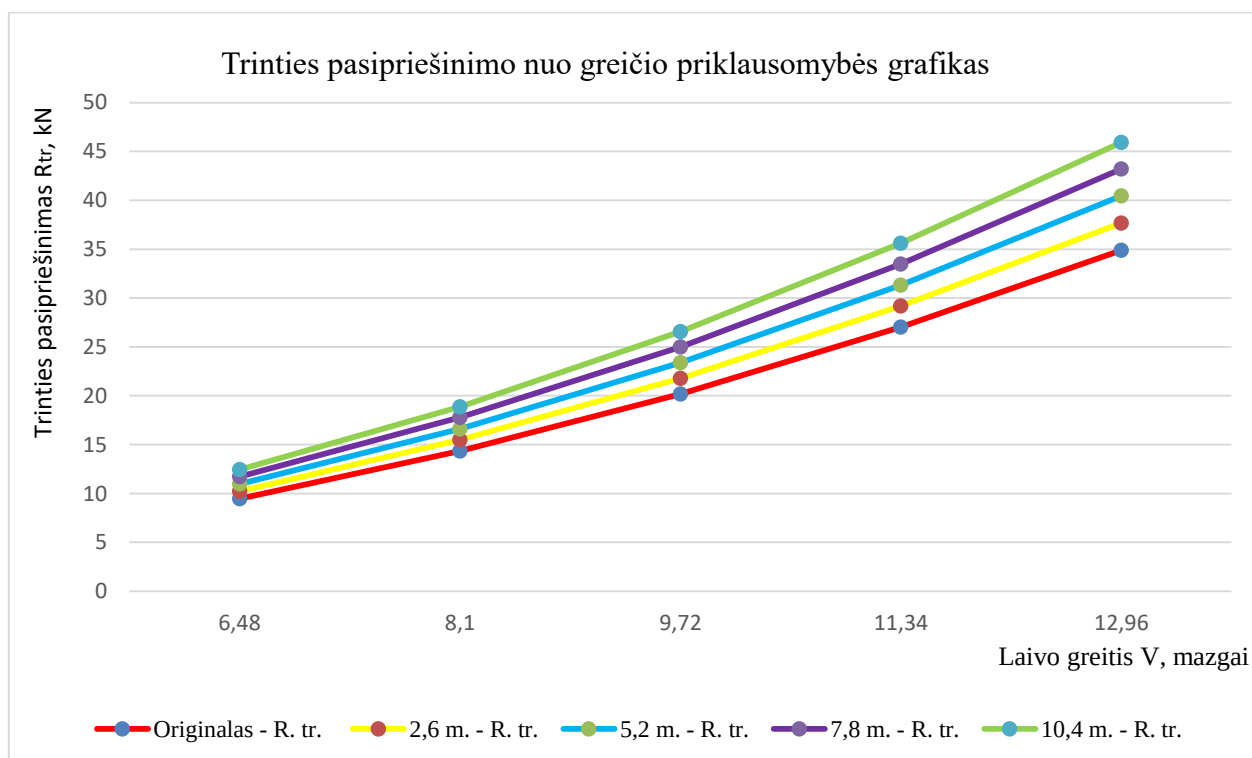
Atlikus 4 papildomus matematinius skaičiavimus kiekvienam laivo ilginimui pagal Alferiev skaičiavimo metodą, sudarėme vandens priklausomybės nuo greičio grafiką (25 pav.). Pagal grafiką matome, kad iki 9,72 mazgų greičio rezultatai yra labai panašūs, tačiau didėjant greičiui pasipriešinimas mažėja su kiekvienu laivo ilginimu.

Atliekant matematinius skaičiavimus (rezultatai pateikti priede nr. 3) kai kurios koeficientų reikšmės viršijo metodikoje naudojamų grafikų ribas, todėl reikšmės buvo nustatytos

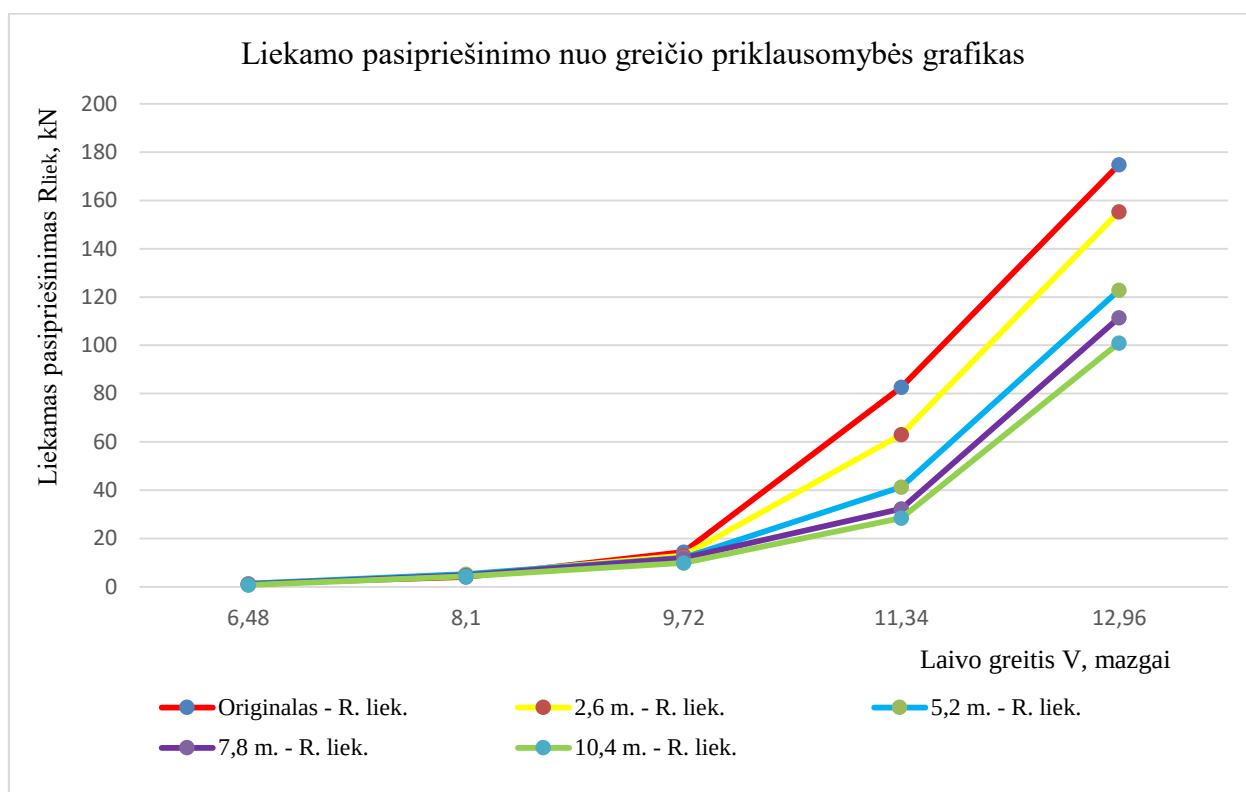
ekstrapoliacijos metodu. Toks koeficientų reikšmų gavimo būdas gali įtakoti rezultatų tikslumą ir viso skaičiavimo patikimumą.



24 pav. Katamarano vandens pasipriešinimo priklausomybė nuo greičio grafikas (originalas ir 4 pailginti variantai)



25 pav. Katamarano vandens pasipriešinimo priklausomybė nuo greičio grafikas (Trinties pasipriešinimas)



26 pav. Katamarano vandens pasipriešinimo priklausomybė nuo greičio grafikas (Trinties pasipriešinimas)

Iš pateikto 26 paveikslo matome, kad trinties pasipriešinimas tolygiai didėja su kiekvienu laivo ilginimo variantu, kas turėtų būti natūralu dėl didėjančio suvilgyto paviršiaus ploto ir didėjančios vandentalpos. Tačiau liekamas pasipriešinimas (27 pav.) iki 9,72 mazgų greičio ženkliai nesiskiria, bet peržengus 9,72 mazgų ribą su kiekvienu ilginimo variantu mažėja.

Siekiant padaryti teisingas išvadas papildomai bus atliekami SSD bandymai ir gauti rezultatai bus lyginami su atliktais matematiniais skaičiavimais pagal Alferjevo metodą.

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.

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

- Tirama tik vienas katamarano korpusas (pusė laivo). Ties Diametraline plokštuma nustatoma simetriška krašto ribos sąlyga (*boundary conditions>symmetry*). Tiriant klampus 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 sūkuriams, kurie cilindro be plokštės atveju gali chaotiškai judėti į abi cilindro puses t.y. gali kirsti diametralinę plokštumą [7]. 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 tinkelio bloko x plokštumose nustatome skysčio greičio sąlygą (*Specified Velocity*), kurios greitis $-6,43 \text{ m/s}$ ($12,5 \text{ mazgo}$) 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 tinkelio bloke (*Fluid elevation ir velocities*). Skysčio lygis $2,8$ metrai, o greitis $-6,43 \text{ m/s}$ 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) $-9,81 \text{ m/s}^2$ 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 savybės (vandenį) pasirenkame iš programoje pateikiamos skysčių bibliotekos. Joje vanduo pateikiamas 293 kelvinų temperatūros ($19,9\text{C}^0$), o jo tankis 1000 kg/m^3 .

- Pasirenkame, kad programa skaičiuotų objektą veikiančias skysčio jėgas (*pressure 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 sukeliamą pasipriešinimą.

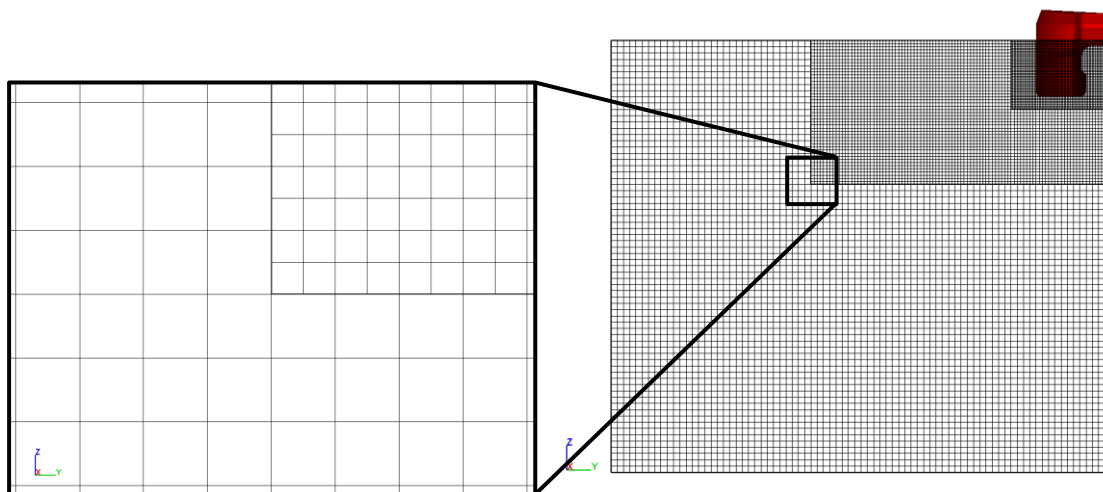
6.2 Eksperimentas laivui MINTIS

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

Atlikę keletą preliminarinių 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 tinklėlį, 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 tinklėlį bus naudojami vienodi elementai, jų tūriai vienodi, todėl energijos perėjimas yra pastovus, kai naudojami nepastovaus dydžio elementai reikalingos sudėtingesnės lygtys norint gauti pakankamai tikslius duomenis. Darant tinklėlį iš kelių blokų, galime išlaikyti vienodo dydžio (kraštinių santykio) tinklelio elementus. Dėl to sudarysime tinklėlį iš keleto skirtingų tinklelio blokų. Mažesni blokai esantys didesniuose nustatomi su *grid overlay* krašto ribos sąlyga. Sudarant tinklėlį atsižvelgsime į 4.2 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. Sudaryto tinklelio schema pavaizduota 29 pav. Tinklelio elementų kiekis 4 305 070.



27 pav. Tinklelis sudarytas iš trijų skirtingo detalumo blokų

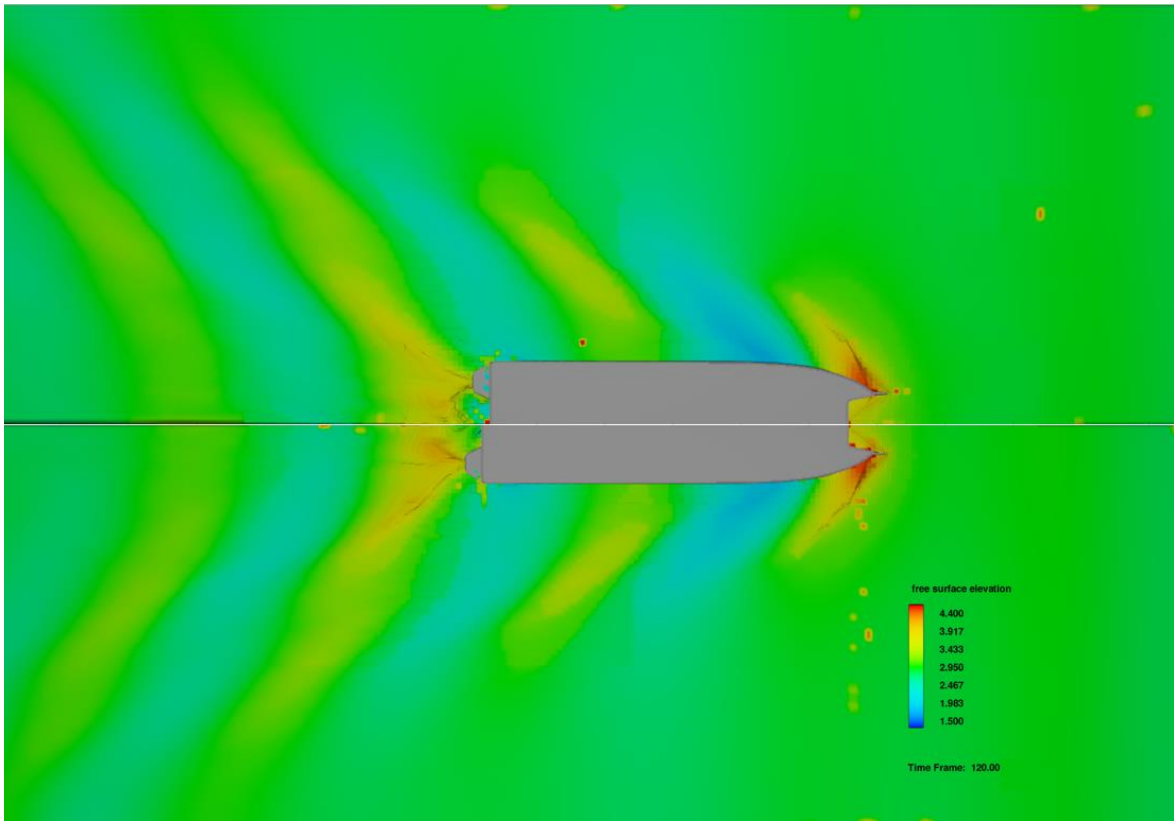
Kadangi preliminariniuose bandymuose 60 sekundžių eksperimento trukmė parodė, kad po tokio laiko tarpo, skysčio srautas aplink laivo korpusą nusistovi, tačiau vis tiek lieka nedideli srauto svyravimai, todėl eksperimento trukmę pailginsime iki 120 sekundžių. Srautas ir šiuo atveju gali nusistovėti neviseškai,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

6.3 Gauti eksperimento rezultatai

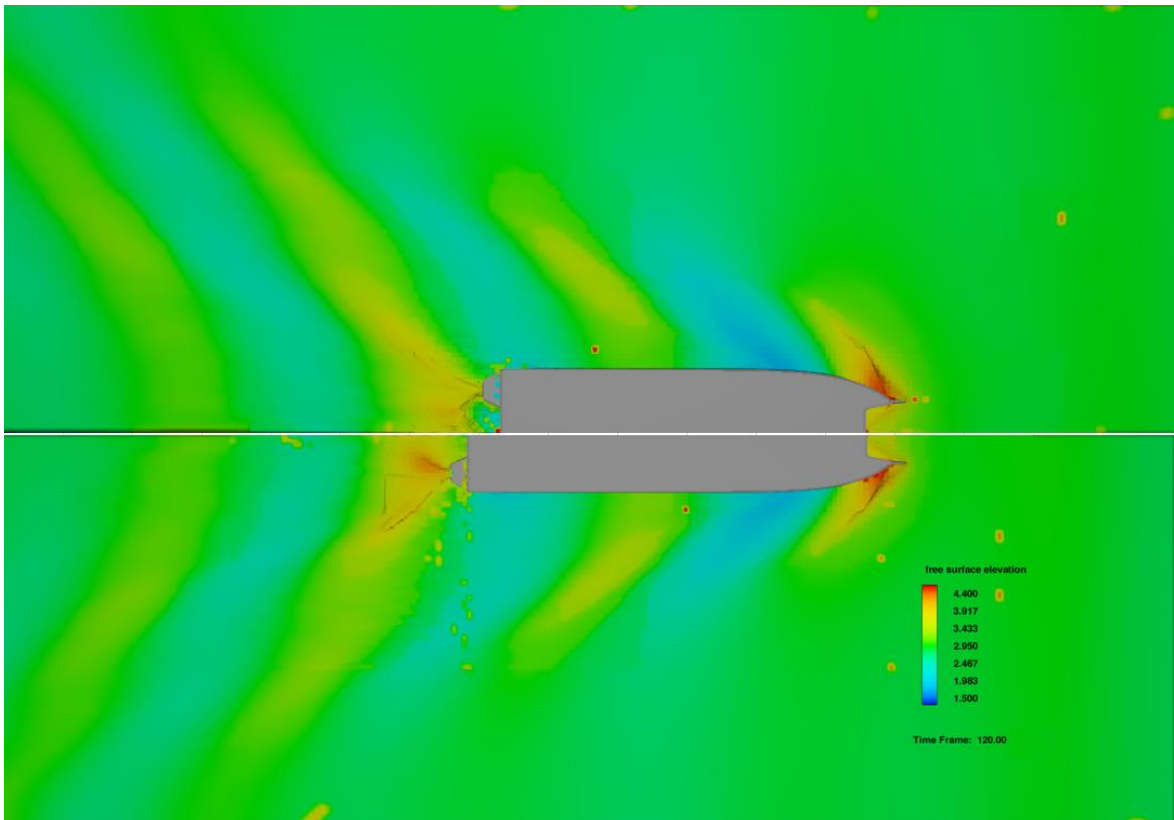
Pagal gautus simuliacijos/eksperimento duomenis bandysime nustatyti ir numatyti laivo korpuso ilginimo įtaką eigumui. Taip pat bandysime nustatyti dėl kokių priežasčių vienokie ar kitokie reiškiniai susidarė ir kokia laivo konstrukcijos įtaką jiems. Gautų duomenų analizei naudosime vizualines FLOW-3D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

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

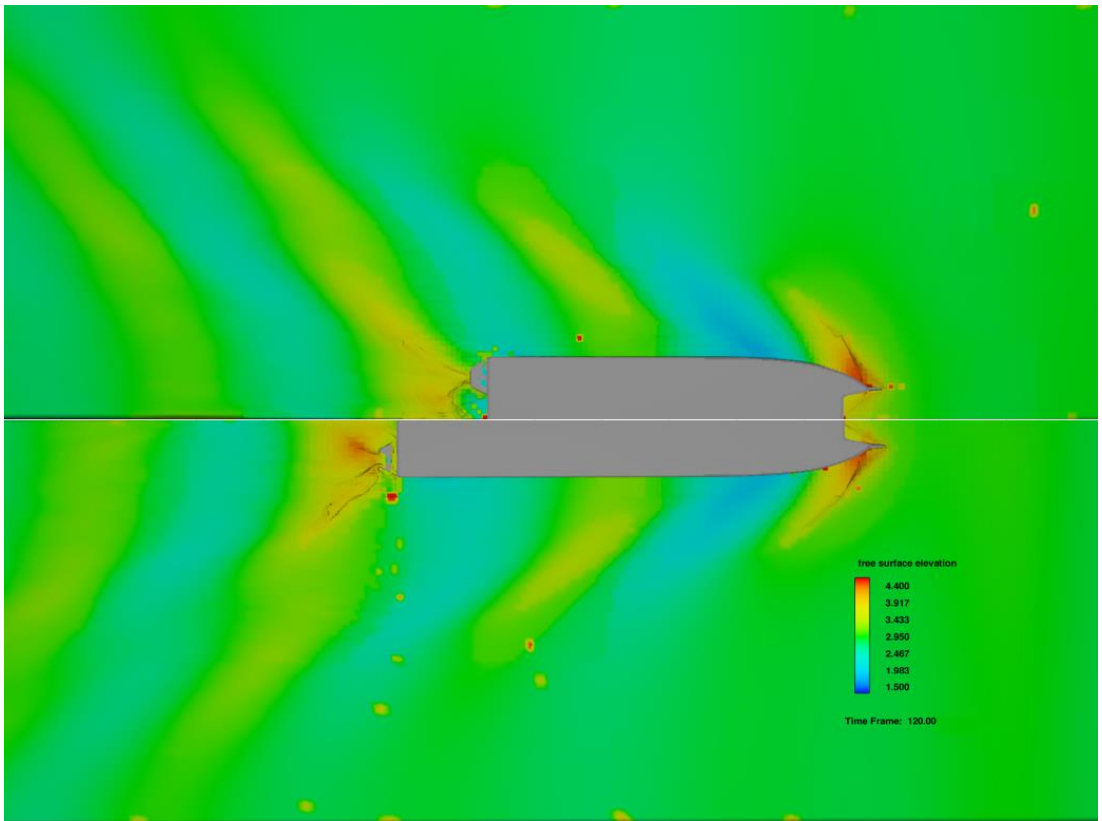
- Keliuose ilginimo variantuose laivagalyje susidaro hidrodinaminis pėdsakas, laivagalinė banga lūžta, srautas atsiskiria netvarkingai.
- Laivapriekinė banga dalinai sutampa su laivagaline.



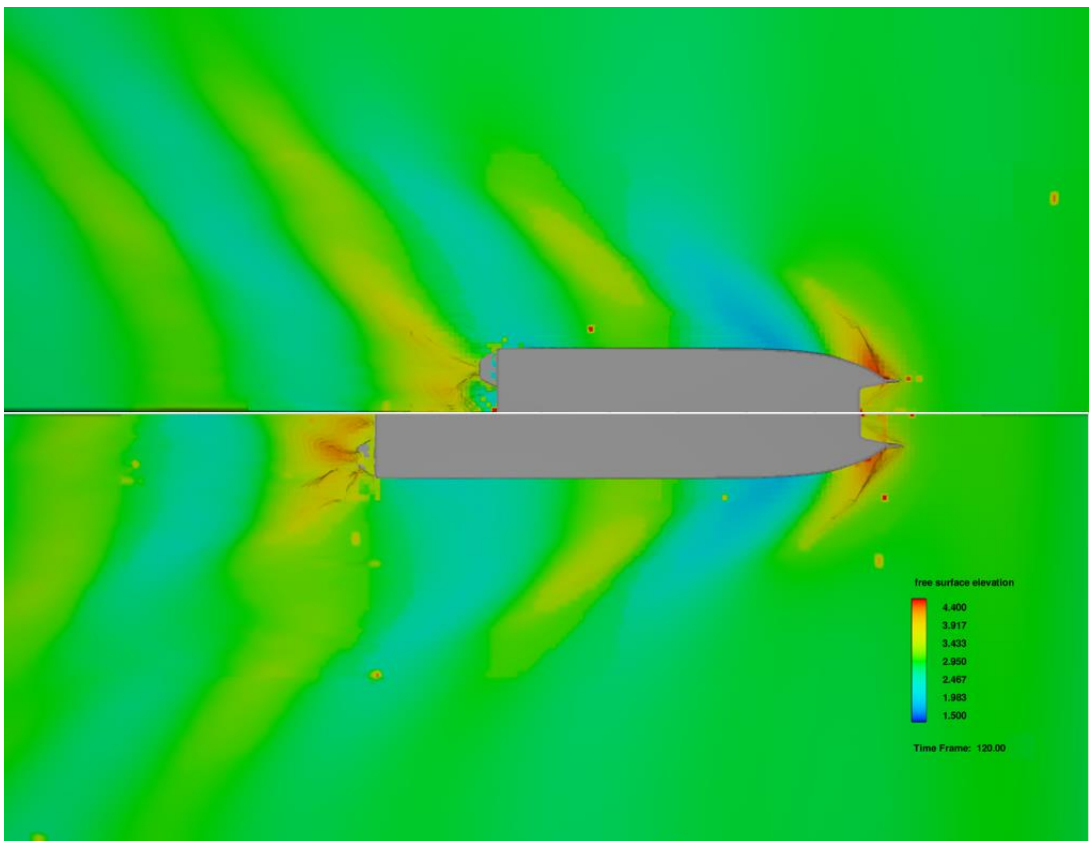
28 pav. Srauto greičių pasiskirstymas ant korpuso (Originalus „Mintis“ korpusas – ilgintas 2,6 m.)



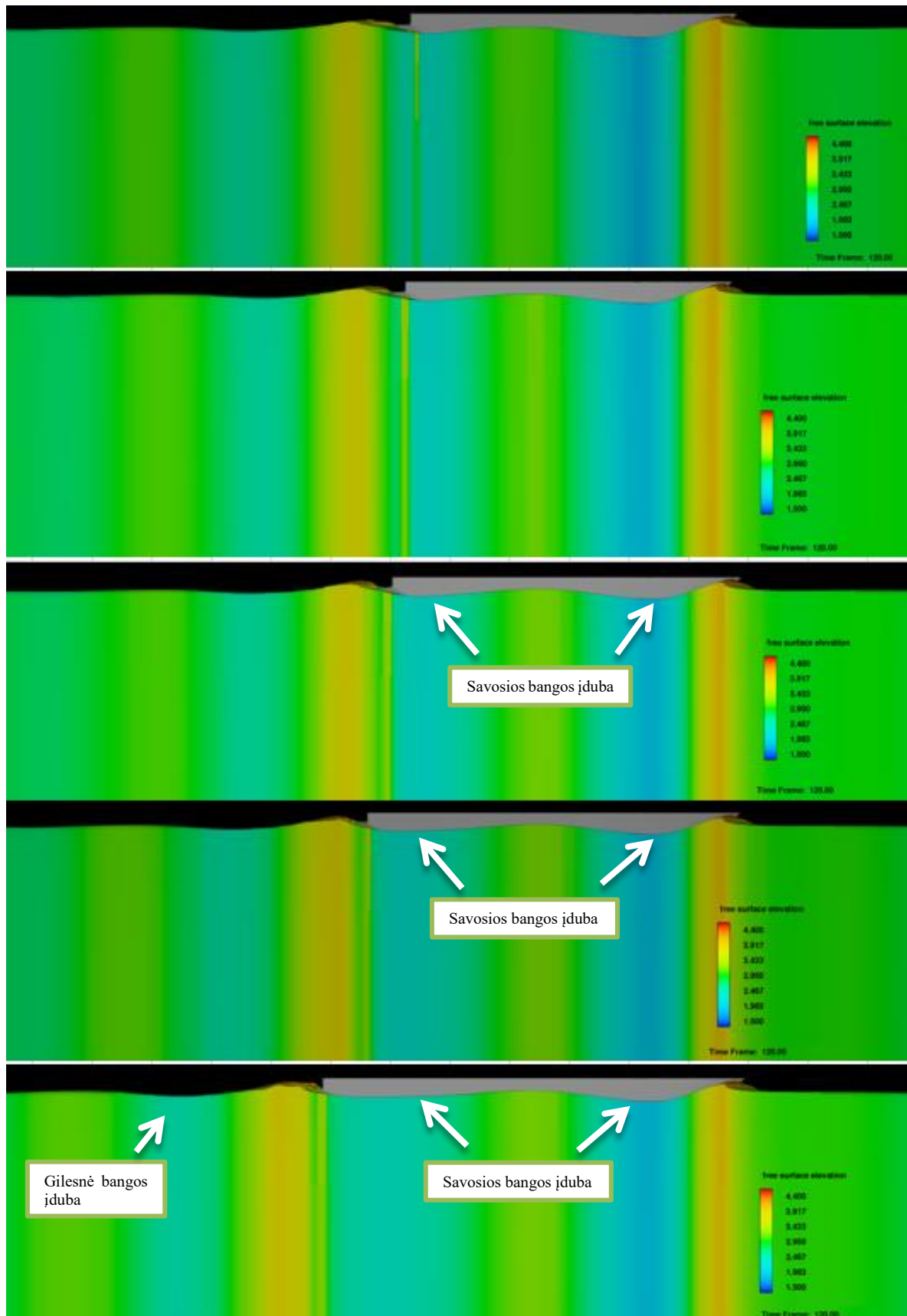
29 pav. Srauto greičių pasiskirstymas ant korpuso (Originalus „Mintis“ korpusas – ilgintas 5,2 m.)



30 pav. Srauto greičių pasiskirstymas ant korpuso (Originalus „Mintis“ korpusas – ilgintas 7,8 m.)



31 pav. Srauto greičių pasiskirstymas ant korpuso (Originalus „Mintis“ korpusas – ilgintas 10,4 m.)



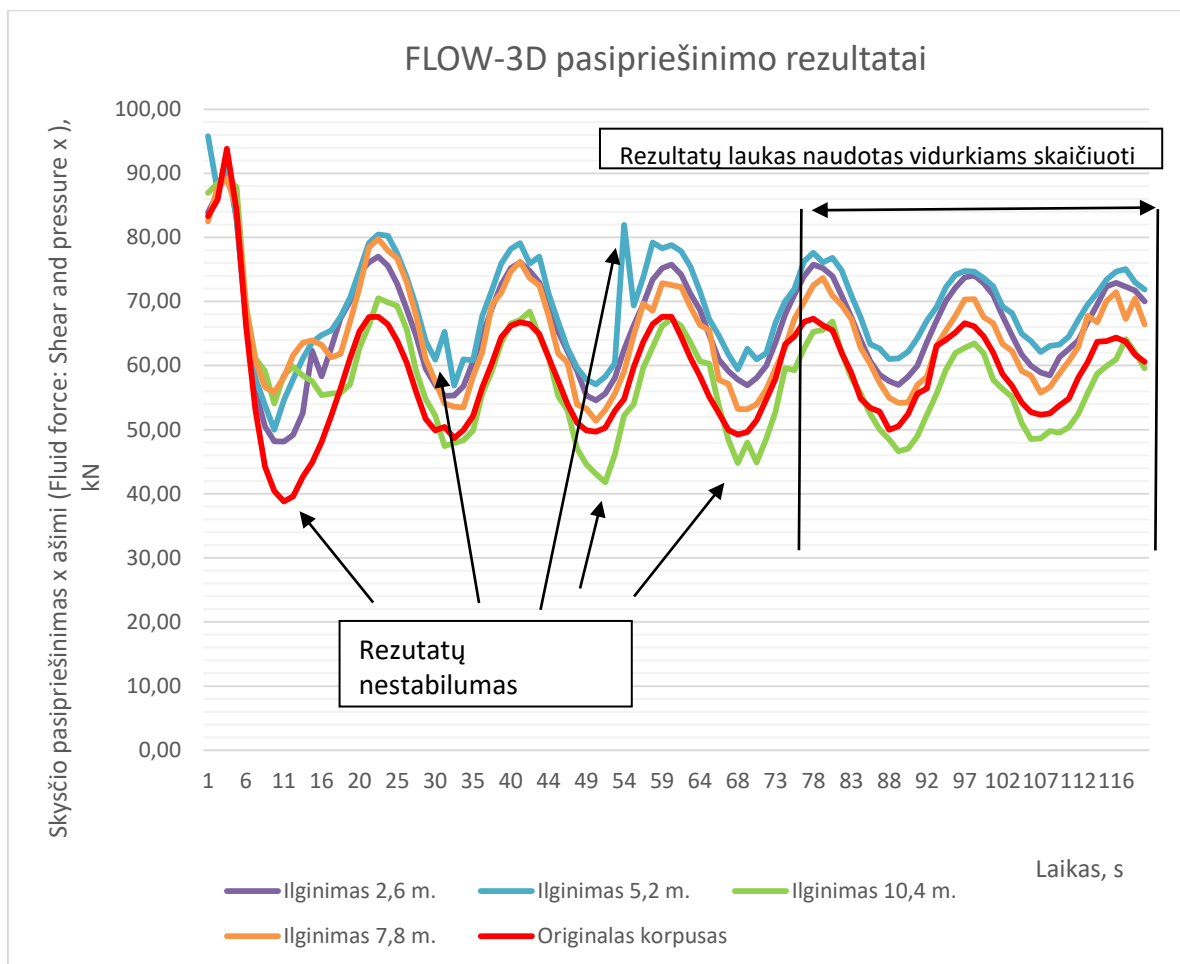
32 pav. Srauto greičių pasiskirstymas ant korpuso (iš šono). Nuo viršaus: 1. Originalus laivo „Mintis“ korpusas. 2. Ilgintas laivo korpusas 2,6 m. 3. Ilgintas laivo korpusas 5,2 m. 4. Ilgintas laivo korpusas 7,8 m. 5. Ilgintas laivo korpusas 10,4 m.

Bendras bangų profilis esantis už laivo korpuso keičiasi ir ritasi į trančą. Iš visų vienas šalia kito sudėtų paveikslų matome, kad laivinė banga išsitiesia per visą laivo korpusą, neipriklausomai nuo jo pailgėjimo, kas galėtų įtakoti pasipriešinimo mažėjimą, kurį gavome atliekant skaičiavimus pagal Alferiev metodą. Pasipriešinimas mažėja dėl laivo savosios bangos įdubos pailgėjimo. Iš 34 pav. galime matyti, kad savosios bangos pakilimas per laivo korpuso vidurį maždaug išlaiko savo matmemis, o suminis laivagalinės ir laivapriekinės įdubos ilgis didėja, kiekvieną kartą ilginant korpusą. Bet tam, kad įsitikinti turime palyginti vandens pasipriešinimo rezultatus.

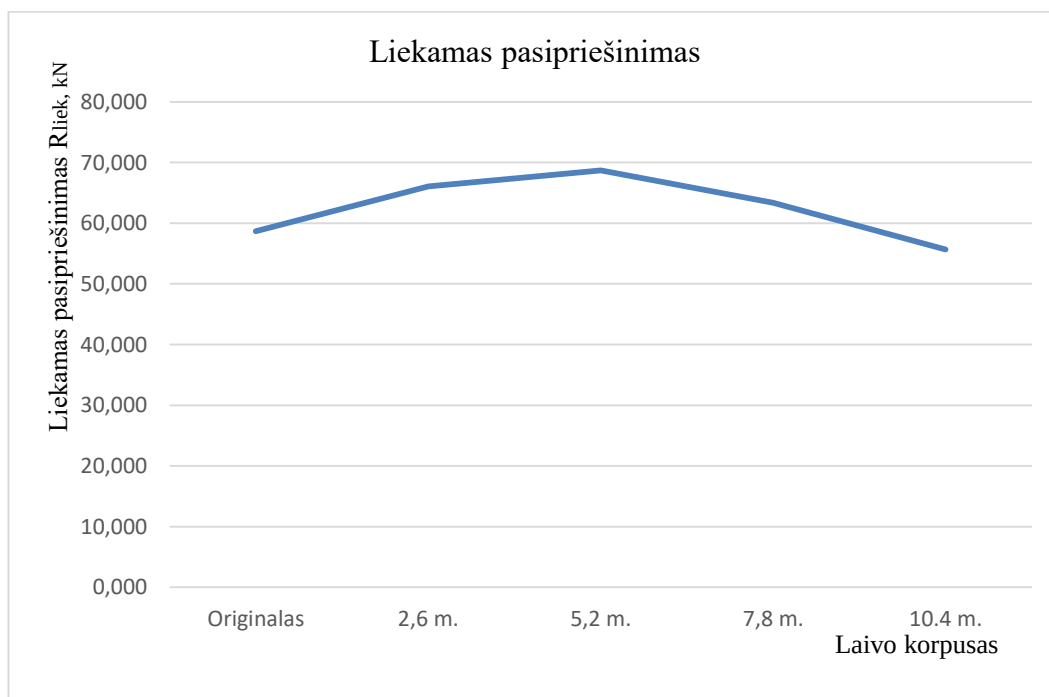
6.4 Korpuso sukulto pasipriešinimo palyginimas

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* parametą. Ši duomenų išeiga 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 sukiamo slėgio priklausomai nuo laiko grafiką. Gautas grafikas pavaizduotas 34 pav. Visiems korpuso ilginimo variantas eksperimento rezultatai imami 80-120 sekundę.

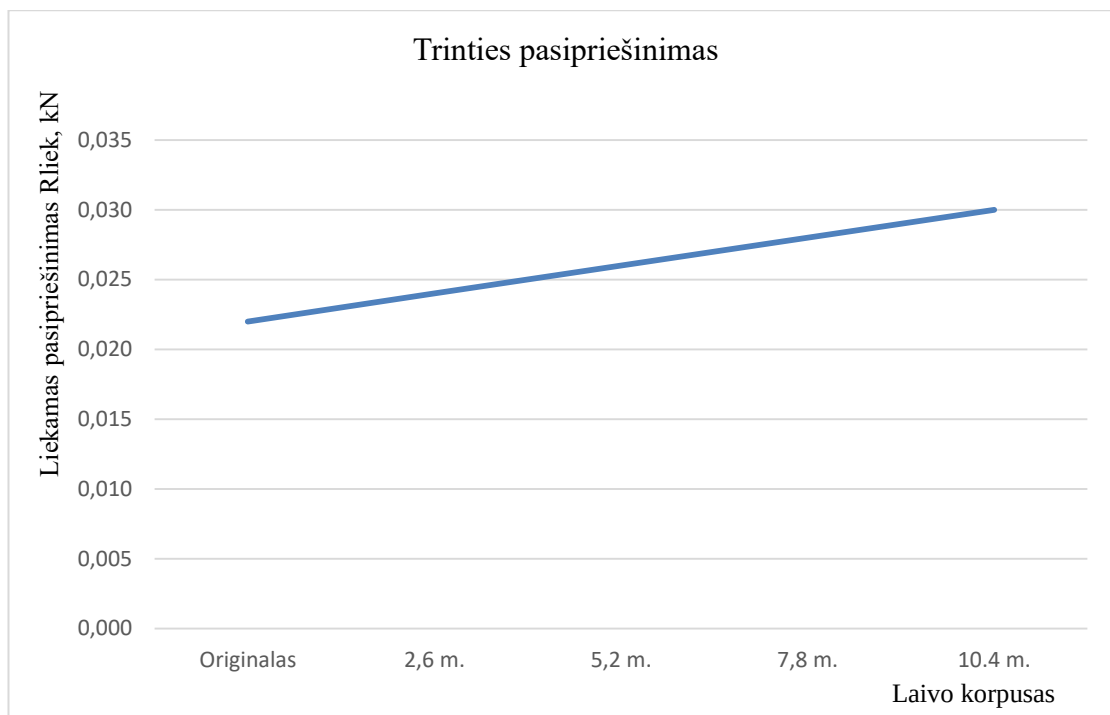
Iš grafiko matome, kad prasidėjus simuliacijai pasipriešinimas (slėgis) smarkiai pakyla, o vėliau šiek tiek nusistovi, tačiau išlieka stiprūs svyravimai iki pat simuliacijos laiko pabaigos. Tikėtina, kad šie svyravimai nusistovės po tam tikro laiko tarpo, tačiau iš grafiko matyti, kad tai truktų labai 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.



33 pav. FLOW-3D pasipriešinimo rezultatai

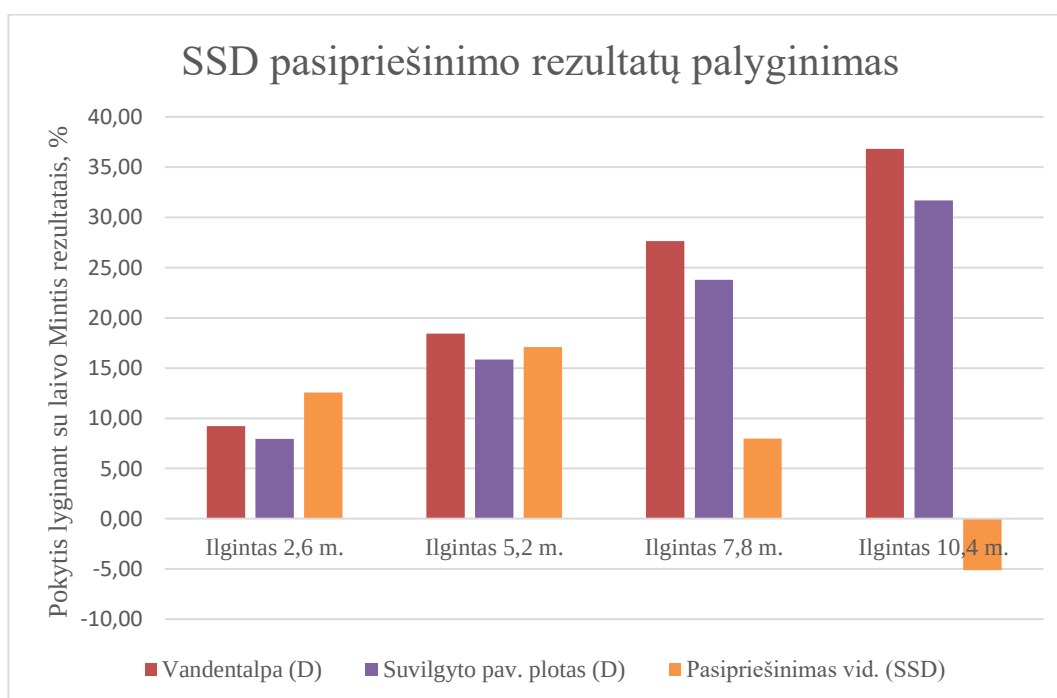


34 pav. FLOW-3D Liekamas pasipriešinimas (80-120 sek. vidurkiai).



35 pav. FLOW-3D Liekamas pasipriešinimas (80-120 sek. vidurkiai).

Iš gautų FLOW-3D rezultatų vidurkių rezultatų (80-120 sek.) matosi, kad trinties pasipriešinimas (37 pav.) tolygiai didėja su kiekvienu ilginimo variantu, tačiau liekamas pasipriešinimas su pirmais ilginimo variantais didėja, nuo 7,8 m. mažėja, o 10,4 m. ilgintas variantas turi mažesnę pasipriešinimą nei originalus laivo korpusas. Įvertinus trinties pasipriešinimą matome, kad reikšmės neatitinka realybės ir yra labai žemos. Papildomai bus atliktos korekcijos nustatymuose, ir pradėti nauji skaičiavimai.



36 pav. Alternatyvių korpuso variantų charakteristikų palyginimas (nuo 80 iki 120 sekundės)

2 lentelė. Gauti tyrimo duomenys (nuo 80 iki 120 sekundės)

	Dim.	Originalas	Ilgintas 2,6 m.	Ilgintas 5,2 m.	Ilgintas 7,8 m.	Ilgintas 10,4 m.
Vandentalpa (D)	m ³	623,08	680,62	737,96	795,30	852,63
Vandentalpa (D)	%	-	9,23	18,44	27,64	36,84
Suvilgyto pav. plotas (D)	m ²	615,10	663,89	712,62	761,36	810,09
Suvilgyto pav. plotas (D)	%	-	7,93	15,85	23,78	31,70
Liekamas pasipriešinimas vid. (SSD)	kN	58,70	66,09	68,73	63,376	55,68
Trinties pasipriešinimas vid. (SSD)	kN	0,022	0,024	0,026	0,028	0,030
Pasipriešinimas vid. (SSD)	kN	58,72	66,11	68,75	63,40	55,71
Pasipriešinimas vid. (SSD)	%	-	12,59	17,08	7,97	-5,13

Pastabos: D – žymi DELFTship rezultatus.

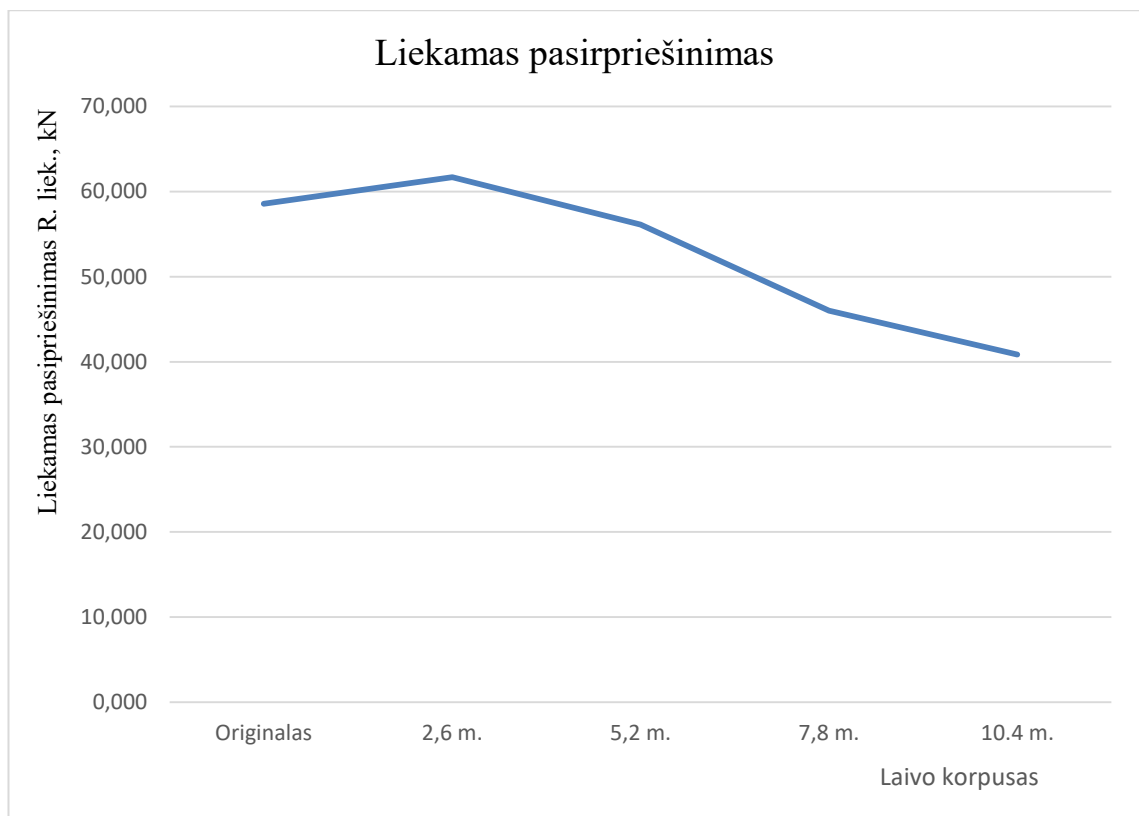
SSD – žymi FLOW-3D eksperimentų rezultatus.

0 – pradinis, nepakeistas laivo MINTIS korpusas.

SSD eksperimentui pakeičiame fizikinių procesų nustatymus (*Model setup – Physics – Viscosity and Turbulence, Turbulence options – Turbulence models – Renormalized group (RNG) model, Maximum turbulent mixing length – Dynamically computed*). Taip pat nustatome tyrimo modelio paviršiaus šiurkštumą (*Model setup – Meshing&Geometry – Geometry – Component 1: Korpusas – Subcomponents – Subcomponent 1 – Surface roughness properties – Surface roughness – 0,00012 m*) [1].

3 lentelė. Gauti tyrimo duomenys (nuo 120 iki 180 sekundės)

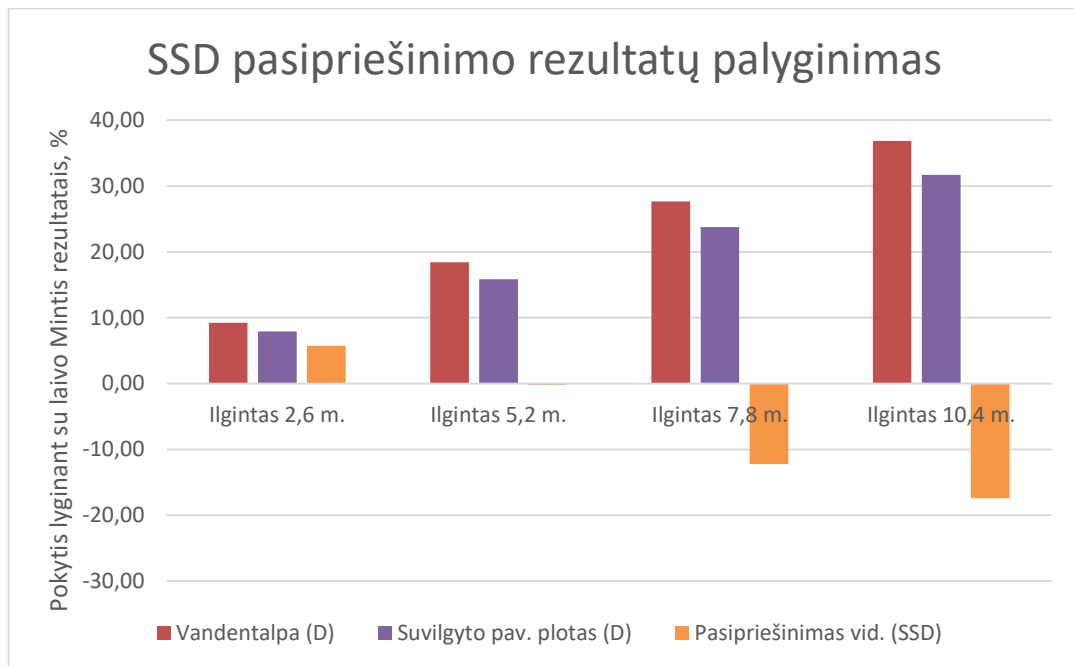
	Dim.	Originalas	Ilgintas 2,6 m.	Ilgintas 5,2 m.	Ilgintas 7,8 m.	Ilgintas 10,4 m.
Vandentalpa (D)	m ³	623,08	680,62	737,96	795,30	852,63
Vandentalpa (D)	%	-	9,23	18,44	27,64	36,84
Suvilgyto pav. plotas (D)	m ²	615,10	663,89	712,62	761,36	810,09
Suvilgyto pav. plotas (D)	%	-	7,93	15,85	23,78	31,70
Liekamas pasipriešinimas vid. (SSD)	kN	59,08	61,69	56,11	46,02	40,85
Trinties pasipriešinimas vid. (SSD)	kN	17,94	19,04	20,07	21,01	22,18
Pasipriešinimas vid. (SSD)	kN	77,02	80,73	76,18	67,04	63,04
Pasipriešinimas vid. (SSD)	%	-	4,82	-1,09	-12,96	-18,15



37 pav. FLOW-3D Liekamas pasipriešinimas (120-180 sek. vidurkiai).



38 pav. FLOW-3D Liekamas pasipriešinimas (120-180 sek. vidurkiai).



39 pav. Alternatyvių korpuso variantų charakteristikų palyginimas (nuo 120 iki 180 sekundės)

Pastabos: D – žymi DELFTship rezultatus.

SSD – žymi FLOW-3D eksperimentų rezultatus.

0 – pradinis, nepakeistas laivo MINTIS korpusas.

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.

Palyginę FLOW-3D pasipriešinimo rezultatus nustatėme, kad kiekvieno ilginimo variantu vandentalpa ir suvilgyto paviršiaus plotas atitinkamai didėja su kiekvienu variantu, tačiau pasipriešinimas kinta skirtinguose laiko perimetruose. Gauti rezultatai nuo 80 iki 120 sekundės skiriasi nuo papildomai skaičiuotų nuo 120 iki 180 sekundės. Tai gali būti dėl to, kad buvo papildomai užduotos sąlygos kaip šiurkštumas ir kiti parametrai, nes analizuojant nuo 80 iki 120 sekundės rezultatus aptikome, kad trinties pasipriešinimas yra neatitinkantis realybės. Galima pastebėti, kad tiek nuo 80 iki 120, tiek nuo 120 iki 180 sekundės trinties pasipriešinimo didėjimas yra vienodai proporcingas.

Kas liečia 3 ilginimo variantą (80 – 120 sekundė) – 7,8 m. ilgintą korpusą jis krenta žemiau nei pirmasis ir antrasis variantas, o paskutinis 10,4 m. ilgintas laivo „Minties“ korpusas

pasipriešinimą turi mažesnę nei originalus laivo korpusas. Tai gali būti dėl to, kad bangavimo pasipriešinimo dedamosios dydis sumažėja dėl laivo savosios bangos persiskirstymo ties laivo korpusu. Vandens pasipriešinimo mažėjimo tendencija matosi pradedant nuo pailginimo 7,8 m. O prie ilginimo varianto 10,4 m sumažėja ženkliai ir pasidaro mažesnis negu originalaus korpuso. Tuo tarpu (120 – 180 sekundė) atliktuose skaičiavimuose matome, kad tik pirmuoju – 2,6 m. ilginimo variantu pasipriešinimas didėja, o su 5,2 m, 7,8 m., ir 10,4 m. pasipriešinimas krenta, net iki 18,15 % mažiau. Rezultatai atitinka aukščiau aprašytą teoriją dėl bangų dėl savųjų laivo bangų pasiskirstymo ties korpusu, kur teigiama, kad kuo ilgesnė bangos įduba laivo viduryje, tuo mažesnis bangavimo pasipriešinimas (žiūrėti 3.1.1. skyrių).

Tačiau gautus rezultatus reikėtų patikrinti dar tikslinant matematinio eksperimento sąlygas. SSD matematinio eksperimento ribos išlieka nekeičiamos didėjant tiriamajam objektui, dėl to gali atsirasti rezultatų svyravimai, ką mes ir matome 35 pav. Jeigu padidinti matematinio eksperimento ribas taip, kad sumažinti jų įtaką eksperimento rezultatams, galima būtų patikslinti šiame tyrime gautus rezultatus ir įsistikinti jų tikslumą. Tai turėtų būti atskiras tyrimas, kuris leistu nustatyti gaunamų rezultatų tikslumą. O geriausiai tokius turimus atlikti kartu su eksperimentais bandymų baseine.

VII. IŠVADOS

1. Moksliniame tiriamajame darbe surinkta ir pateikta aktuali informacija apie srauto tyrimus ir optimizaciją, sudaryta mokslininkų literatūros apžvalga ir analizė. Išanalizavus šaltinius bei pasipriešinimo vertinimo metodus, matome, kad pasaulyje pagrinde eksperimentai grindžiami natūriniais ar bandymų baseinų atliekamais eksperimentais, tačiau nesant tokių galimybių, darbui buvo pasirinkti du eksperimento metodai.
2. Pirmasis matematinis eksperimentas grindžiamas Alferievo skaičiavimo metodika. Aprašius eksperimento sąlygas ir atlikus skaičiavimus originaliam laivo korpusui įsitikinome, kad rezultatai gana gerai dera su realaus laivo charakteristikomis. Laivui pasiekus 11 mazgų greitį propulsinė sistema yra apkrauta 70%, kas sudaro apie 1000 kW. Todėl buvo nuspręsta atlikti skaičiavimus ir keturiems laivo korpuso ilginimo variantams.
3. Atlikus bendrą laivo išdėstymo analizę nustatyta, kad tinkamas variantas skerspjuviui yra ties 15 španhautu. Pjūvio vietos pailginimui pasirinkimą lėmė mažiausiai sąnaudų reikalaujantis sprendimas. Tada buvo suformuoti dar keturi matematiniai skaičiavimai kiekvieno laivo korpuso ilginimo variantui, ir lyginant rezultatus sudarytas vandens priklausomybės nuo greičio grafikas, pagal kurį matome, kad iki 9,72 mazgų greičio rezultatai yra labai panašūs, tačiau didėjant greičiui pasipriešinimas mažėja su kiekvienu laivo korpuso ilginimu. Atliekant skaičiavimus kai kurios

koeficientų reikšmės viršijo metodikoje naudojamų grafikų ribas, to pasekoje reikšmės buvo nustatomos ekstrapoliacijos metodu. Toks koeficientų reikšmių gavimo būdas gali įtakoti rezultatų tikslumą ir viso skaičiavimo patikimumą. Siekiant atlikti teisingas išvadas buvo nuspręsta papildomai atlikti FLOW-3D SSD bandymus ir rezultatus palyginti.

4. Pasipriešinimo rezultatų palyginimui buvo panaudoti vidurkiai nuo 80 iki 120 sekundės, kadangi tuo momentu atsiranda nusistovėję ir neiškreipti duomenys. Iš pasipriešinimo, vandentalpos ir suvilgyto ploto paviršiaus sudarytas grafikas (38 pav.), kuriame matome, kad vandentalpa ir suvilgyto paviršiaus plotas didėja kiekvienu ilginimo variantu, tačiau pasipriešinimas skirtingai nuo 2,6 m. ilginimo didėja 12,59 %, ir 5,2 m ilginto varianto pasipriešinimas didėja 17,08 %. Tačiau 7,8 m. ilginto varianto pasipriešinimas didėja tik 7,97 %, o 10,4 m. ilgintas laivo korpusas turi mažesnę pasipriešinimą 5,13 % nei originalus laivo „Mintis“ korpusas.
5. Aptikus neatitikimų FLOW-3D skaičiavimuose papildomai atlikti skaičiavimai nuo 120 iki 180 sekundės, kur papildomai užduotas šiurkštumas ir padaryti papildomi nustatymai, kad būtų patikslinti trinties pasipriešinimo rezultatai. Liekamas pasipriešinimas tik pirmu 2,6 m. ilginimo variantu didėja, tačiau visais kitais trimis variantais mažėja, kai tuo tarpu trinties pasipriešinimas tolygiai auga su vandentalpos ir suvilgyto ploto paviršiaus didėjimu. Bendras pasipriešinimas tik pirmu ilginimo variantu 2,6 m. auga iki 4,82 %, o visi kiti rezultatai rodo mažesnę bendrą pasipriešinimą nei originalas. 5,2 m mažėja 1,09 %, 7,8 m. – mažėja 12,96 %, o 10,4 m. rodo didžiausią mažėjimą net iki 18,15 %,.
6. Išanalizavus gautus rezultatus galima daryti išvadą, kad 3 atvejų (Ilginimas -5,2 m., 7,8 m. ir 10,4 m.) pasipriešinimas mažėja, dėl to kad bangavimo pasipriešinimo dedamosios dydis sumažėja dėl laivo savosios bangos persiskirstymo ties laivo korpusu ir susidariusios ilgesnės bangos įdubos laivo viduryje.

REKOMENDACIJOS

Norint labiau ir tiksliau išnagrinėti korpuso hidrodinamines savybes ir įvertinti įtaką eigumui reikia:

1. Kad gauti tikslesnius ir aiškesnius duomenis būtų galima SSD tyrimą formuoti su pilnu laivo korpusu, kas galėtų suteikti tikslesnius ir aiškesnius rezultatus, taip pat galima būtų stebėti, kokią kiekvieno laivo ilginimo variantu turi bangų pasipriešinimas tarp korpusų.
2. Sudaryti eksperimentą su veikiančiu propulsiniu kompleksu. Veikiantis varytuvas laivagalyje gali parodyti visai kitokius srauto aptekėjimo rezultatus. Vertinant, kad skirtingais variantais keičiavis pasipriešinimas, galbūt pasikeitusios srauto aptekėjimo ar pasipriešinimo savybės įtakotų neigiamai varytuvo propulsinio komplekso naudingumui.

3. Gautus rezultatus reikėtų patikrinti dar tikslinant matematinio eksperimento sąlygas. SSD matematinio eksperimento ribos išlieka nekeičiamos didėjant tiriamajam objektui, dėl to gali atsirasti rezultatų svyravimai. Jeigu padidinti matematinio eksperimento ribas taip, kad sumažinti jų įtaką eksperimento rezultatams, galima būtų patikslinti šiame tyrime gautus rezultatus ir įsistikinti jų tikslumą. Tai turėtų būti atskiras tyrimas, kuris leistu nustatyti gaunamu rezultatų tikslumą. Idealiausiai būtų tokius turimus atlikti kartu su eksperimentais bandymų baseine.

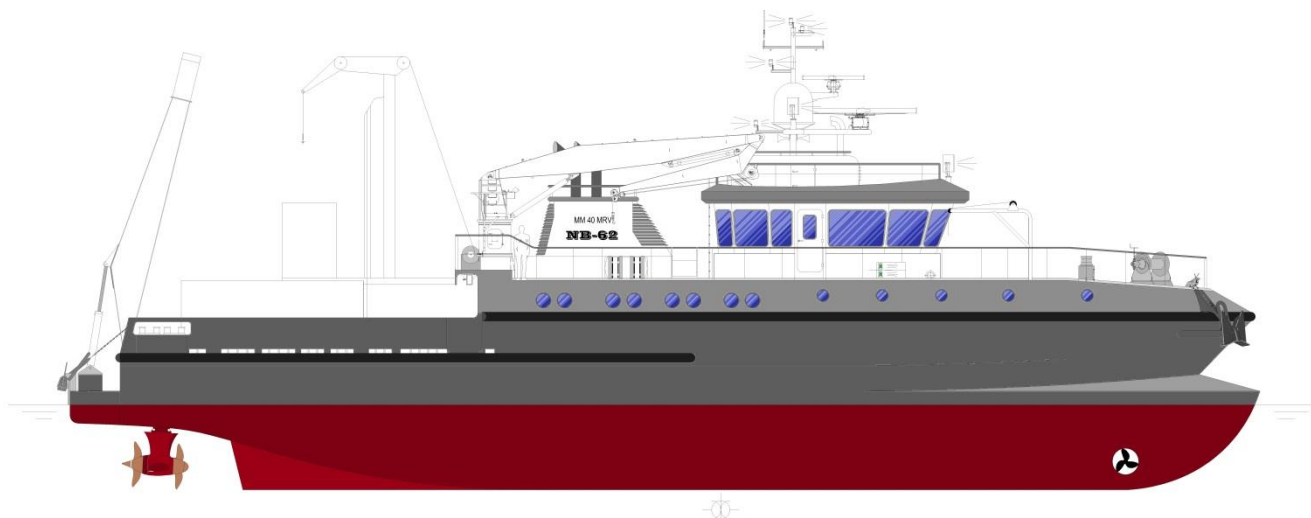
LITERATŪRA

1. Алферьев М. Я., Мадорский Г, С. 1976 Транспортные катамараны внутреннево плавания. Москва: Транспорт.
2. Aubault A. ir Yeung R.W. 2009. Multi-hull Interference Wave-Resistance in Finite-Depth Waters. International Workshop on Water Waves & Floating Bodies [Interaktyvus] Nr.24 [Žiūrėta 2019m. gruodžio 13d.] Prieiga per internetą: <www.iwwwfb.org/Abstracts/iwwwfb24/iwwwfb24_06.pdf>.
3. Auke van der Ploeg. 2014. Optimization of the STREAMLINE tanker using RANS/FS computations. Mulheim: 16th NuTTS.
4. Bakker A. 2006. Applied Computational Fluid Dynamics. [žiūrėta 2020 m. Kovo 23d.] Prieiga per internetą: <<http://www.bakker.org/dartmouth06/engs150/07-mesh.pdf> >
5. Bandringa H., Verstappen R., Wubs F., et al. 2012. On novel simulation methods for complex flows in maritime applications. Corton: 15th NuTTS.
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. Čerka J., Mickevičienė R., Ašmontas Ž., Norkevičius L., Žapnickas T., Djačkov V. ir Zhou P., 2016. Optimization of the research vessel hull form by using numerical simulation.
10. Djačkov V., Žapnickas T., Čerka J., Mickevičienė R., Ašmontas Ž., Norkevičius L., Ronkaitytė I., Zhou P., Blanco-Davis E., 2018. Numerical simulation of a research vessel's aftpart hull form.
11. Дубровский В. А. 1968. Исследование волнового сопротивления катамарана. Судостроение, Ленинград.
12. Flow Science [interaktyvus], [žiūrėta 2020 m. Balandžio 05d.] Prieiga per internetą: <<http://www.flow3d.com/home/resources/cfd-101>>
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. Heggelund S. E., Moan T., Oma S.. 2000. Transverse strength analysis of catamarans.
15. Hochkirch K., Bertram V., Mallol B. 2013. Reflections on the Importance of Full-Scale Computations for Ship Flows. Mulheim: 16th NuTTS.

16. Kawabuchi, M., Kawakita, C., Mizokami, S., Higasa, S., Kodan, Y., Takano, S., 2011. CFD Predictions of Bubbly Flow around an Energy-saving Ship with Mitsubishi Air Lubrication System. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 48(1), pp. 53–57.
17. Latorre R., Miller A., Philips R., 2003. Micro-bubble resistance reduction on a model SES catamaran. *Ocean Engineering*, 30, pp. 2297–2309.
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. Noblesse F., Delhommeau G., Kim H. Y., Yang C.. 2008. Thin-ship theory and influence of rake and flare.
22. Rawson K.J., Tupper E.C. 2001. Basic ship theory. Oxford: Butterworth-Heinemann.
23. Sayyaadi, H., Nematollahi, M., 2013. Determination of optimum injection flow rate to achieve maximum micro bubble drag reduction in ships; an experimental approach. *Scientia Iranica, Transactions B: Mechanical Engineering*, 20(3), pp. 535–541.
24. Schneekluth H., Bertram V. 1998. Ship Design for Efficiency and Economy. Oxford: Butterworth-Heinemann.
25. Stonkus V. 2006. Laivo teorija. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla.
26. Strake B., Windt J. 2003. Two examples of hull-form optimization using viscous-flow computations. London: Computational Fluid Dynamics Technology in Ship Hydrodynamics.
27. Tuck E. O. 1997. Wave resistance of Thin Ships and catamarans.
28. 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.
29. You-Sheng Wu, Wei-Cheing Cui, Guo-Jun Zhou. 2001. Practical ship design and Other Floating Structures. Shanghai: Tong University.
30. Zaghi S., Broglia R., Mascio A. Di. 2011. Analysis of the interference effects for high-speed catamarans by model tests and numerical simulations.

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 galingumas	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	$A_{\text{aft deck}}$, m ²	120
Bio laboratorijos plotas	$A_{\text{bio lab}}$, m ²	15,8
Geo laboratorijos plotas	$A_{\text{geo lab}}$, 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. Laivo „MINTIS“ teorinio brėžinio duomenys gauti iš DELFTSHIP programos.

Design hydrostatics report



Design hydrostatics report

Designer

Created by

Comment

Filename MINTIS - Originalas.fbm

Design length	38,400 (m)	Midship location	19,200 (m)
Length over all	39,223 (m)	Relative water density	1,0250
Design beam	12,000 (m)	Mean shell thickness	0,0000 (m)
Maximum beam	0,010 (m)	Appendage coefficient	1,0000
Design draft	2,800 (m)		

Volume properties		Waterplane properties	
Moulded volume	607,884 (m ³)	Length on waterline	39,058 (m)
Total displaced volume	607,884 (m ³)	Beam on waterline	12,001 (m)
Displacement	623,081 (tonnes)	Entrance angle	0,000 (Degr.)
Block coefficient	0,4711	Waterplane area	253,30 (m ²)
Prismatic coefficient	0,7406	Waterplane coefficient	0,5497
Vert. prismatic coefficient	0,8571	Waterplane center of floatation	14,641 (m)
Wetted surface area	615,10 (m ²)	Transverse moment of inertia	4499,1 (m ⁴)
Longitudinal center of buoyancy	16,241 (m)	Longitudinal moment of inertia	26674 (m ⁴)
Longitudinal center of buoyancy	-7,575 %		
Vertical center of buoyancy	1,508 (m)		

Midship properties		Initial stability	
Midship section area	21,38 (m ²)	Transverse metacentric height	8,909 (m)
Midship coefficient	0,6362	Longitudinal metacentric height	45,387 (m)

Lateral plane	
Lateral area	0,00 (m ²)
Longitudinal center of effort	0,000 (m)
Vertical center of effort	0,000 (m)

The following layer properties are calculated for both sides of the ship

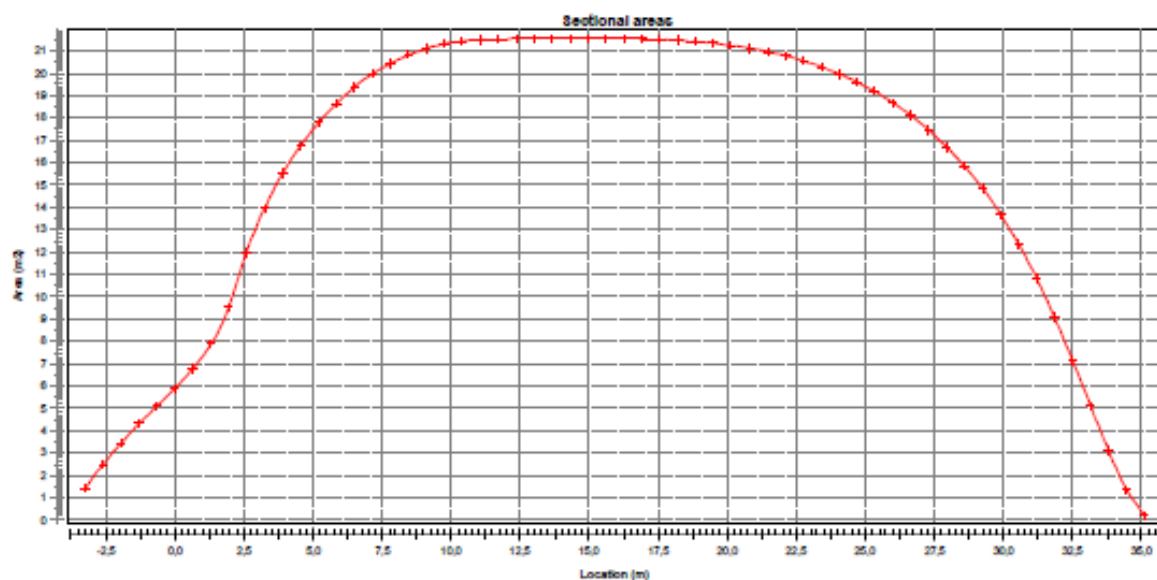
Location	Area	Thickness	Weight	LCG	TCG	VCG
	(m ²)	(m)	(tonnes)	(m)	(m)	(m)
Layer 1	1582,80	0,000	0,000	15,887	0,000 (CL)	3,514

Sectional areas									
Location	Area	Location	Area	Location	Area	Location	Area	Location	Area
(m)	(m ²)	(m)	(m ²)	(m)	(m ²)	(m)	(m ²)	(m)	(m ²)
-3,250	1,43	5,200	17,78	13,650	21,55	22,100	20,78	29,900	13,70
-2,600	2,51	5,850	18,64	14,300	21,55	22,750	20,55	30,550	12,35
-1,950	3,45	6,500	19,37	14,950	21,55	23,400	20,29	31,200	10,82
-1,300	4,32	7,150	19,98	15,600	21,55	24,050	19,97	31,850	9,08
-0,650	5,12	7,800	20,45	16,250	21,54	24,700	19,60	32,500	7,16
0,000	5,89	8,450	20,81	16,900	21,54	25,300	19,21	33,150	5,13
0,650	6,77	9,100	21,11	17,550	21,51	25,350	19,18	33,800	3,14
1,300	7,87	9,750	21,31	18,200	21,47	26,000	18,69	34,450	1,39
1,950	9,51	10,400	21,43	18,850	21,42	26,650	18,11	35,100	0,22
2,600	11,98	11,050	21,49	19,500	21,34	27,300	17,45		
3,250	13,96	11,700	21,52	20,150	21,24	27,950	16,69		
3,900	15,51	12,350	21,54	20,800	21,12	28,600	15,82		

2020-04-07

1

Sectional areas									
Location	Area	Location	Area	Location	Area	Location	Area	Location	Area
(m)	(m ²)	(m)	(m ²)	(m)	(m ²)	(m)	(m ²)	(m)	(m ²)
4,550	16,76	13,000	21,55	21,450	20,96	29,250	14,83		



NOTE 1: Draft (and all other vertical heights) is measured from base Z=0,000

NOTE 2: All calculated coefficients based on project length, draft and beam.

3 priedas. Laivo „MINTIS“ teorinio brėžinio duomenys gauti iš DELFTSHIP programos. (2,6 m. laivo ilginimas).

Design hydrostatics report

Designer

Created by

Comment

Filename

MINTIS - pailginta 2,6 m.fbm

Design length	38,400 (m)	Midship location	19,200 (m)
Length over all	41,823 (m)	Relative water density	1,0250
Design beam	12,000 (m)	Mean shell thickness	0,0000 (m)
Maximum beam	0,010 (m)	Appendage coefficient	1,0000
Design draft	2,800 (m)		

Volume properties		Waterplane properties	
Moulded volume	664,020 (m ³)	Length on waterline	41,658 (m)
Total displaced volume	664,020 (m ³)	Beam on waterline	12,001 (m)
Displacement	680,621 (tonnes)	Entrance angle	0,000 (Degr.)
Block coefficient	0,5146	Waterplane area	272,28 (m ²)
Prismatic coefficient	0,8028	Waterplane coefficient	0,5909
Vert. prismatic coefficient	0,8710	Waterplane center of floatation	15,931 (m)
Wetted surface area	663,89 (m ²)	Transverse moment of inertia	4851,0 (m ⁴)
Longitudinal center of buoyancy	17,538 (m)	Longitudinal moment of inertia	32928 (m ⁴)
Longitudinal center of buoyancy	-3,990 %		
Vertical center of buoyancy	1,497 (m)		

Midship properties		Initial stability	
Midship section area	21,54 (m ²)	Transverse metacentric height	8,802 (m)
Midship coefficient	0,6411	Longitudinal metacentric height	51,086 (m)

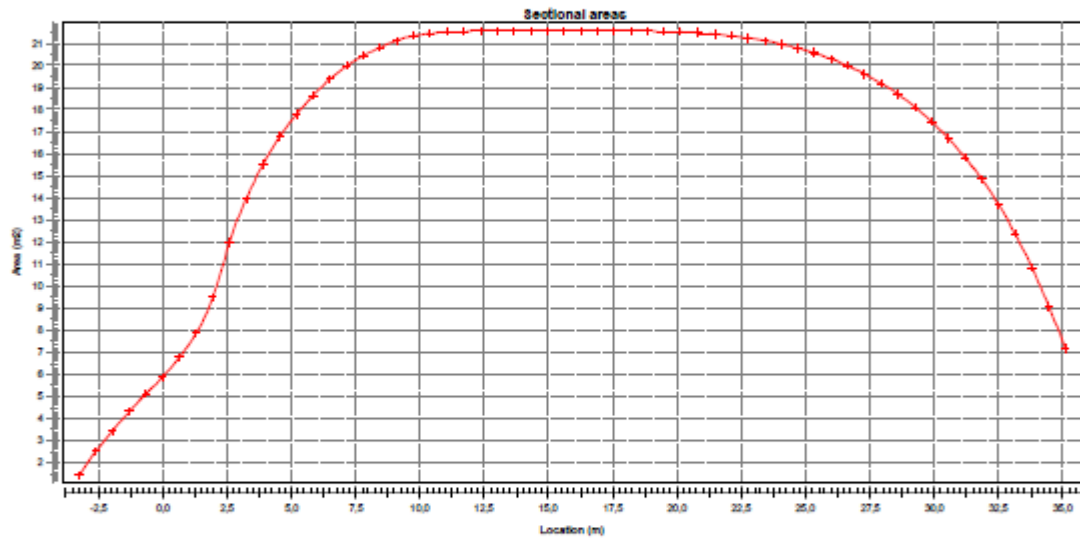
Lateral plane	
Lateral area	0,00 (m ²)
Longitudinal center of effort	0,000 (m)
Vertical center of effort	0,000 (m)

The following layer properties are calculated for both sides of the ship

Location	Area (m ²)	Thickness (m)	Weight (tonnes)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)
Layer 1	1139,52	0,000	0,000	23,614	0,000 (CL)	3,539
Aftpart	554,50	0,000	0,000	4,038	0,000 (CL)	3,371
Total	1694,03		0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000

Sectional areas									
Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)
-3,250	1,43	5,200	17,78	13,650	21,56	22,100	21,34	29,900	17,45
-2,600	2,51	5,850	18,64	14,300	21,56	22,750	21,24	30,550	16,69
-1,950	3,45	6,500	19,37	14,950	21,56	23,400	21,12	31,200	15,82
-1,300	4,32	7,150	19,98	15,600	21,56	24,050	20,96	31,850	14,83
-0,650	5,12	7,800	20,45	16,250	21,55	24,700	20,78	32,500	13,70
0,000	5,89	8,450	20,82	16,900	21,55	25,300	20,57	33,150	12,35
0,650	6,77	9,100	21,12	17,550	21,55	25,350	20,55	33,800	10,82
1,300	7,87	9,750	21,34	18,200	21,55	26,000	20,29	34,450	9,08
1,950	9,51	10,400	21,45	18,850	21,54	26,650	19,97	35,100	7,16
2,600	11,98	11,050	21,51	19,500	21,54	27,300	19,60		

Sectional areas									
Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)
3,250	13,96	11,700	21,54	20,150	21,51	27,950	19,18		
3,900	15,51	12,350	21,55	20,800	21,47	28,600	18,69		
4,550	16,76	13,000	21,56	21,450	21,42	29,250	18,11		



NOTE 1: Draft (and all other vertical heights) is measured from base $Z=0,000$

NOTE 2: All calculated coefficients based on project length, draft and beam.

4 priedas. Laivo „MINTIS“ teorinio brėžinio duomenys gauti iš DELFTSHIP programos. (5,2 m. laivo ilginimas).

Design hydrostatics report

Designer			
Created by			
Comment			
Filename MINTIS - pailginta 5,2 m.fbm			
Design length	38,400 (m)	Midship location	19,200 (m)
Length over all	44,423 (m)	Relative water density	1,0250
Design beam	12,000 (m)	Mean shell thickness	0,0000 (m)
Maximum beam	0,010 (m)	Appendage coefficient	1,0000
Design draft	2,800 (m)		

Volume properties		Waterplane properties	
Moulded volume	719,958 (m ³)	Length on waterline	44,258 (m)
Total displaced volume	719,958 (m ³)	Beam on waterline	12,001 (m)
Displacement	737,956 (tonnes)	Entrance angle	0,000 (Degr.)
Block coefficient	0,5580	Waterplane area	291,26 (m ²)
Prismatic coefficient	0,8699	Waterplane coefficient	0,6321
Vert. prismatic coefficient	0,8828	Waterplane center of floatation	17,223 (m)
Wetted surface area	712,62 (m ²)	Transverse moment of inertia	5202,9 (m ⁴)
Longitudinal center of buoyancy	18,836 (m)	Longitudinal moment of inertia	40103 (m ⁴)
Longitudinal center of buoyancy	-0,822 %		
Vertical center of buoyancy	1,488 (m)		

Midship properties		Initial stability	
Midship section area	21,55 (m ²)	Transverse metacentric height	8,715 (m)
Midship coefficient	0,6414	Longitudinal metacentric height	57,190 (m)

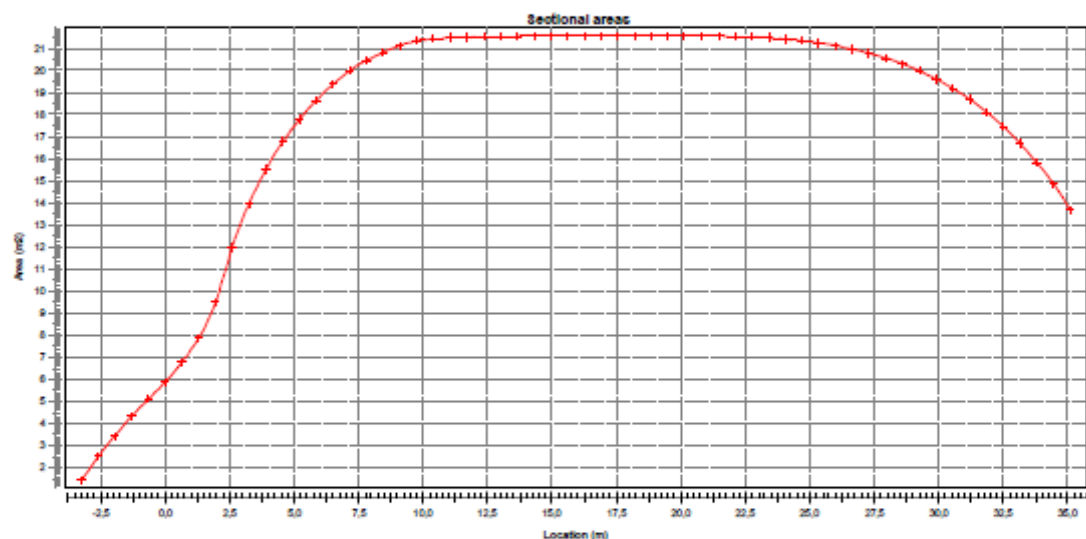
Lateral plane	
Lateral area	0,00 (m ²)
Longitudinal center of effort	0,000 (m)
Vertical center of effort	0,000 (m)

The following layer properties are calculated for both sides of the ship

Location	Area	Thickness	Weight	LCG	TCG	VCG
	(m ²)	(m)	(tonnes)	(m)	(m)	(m)
Layer 1	1232,16	0,000	0,000	25,157	0,000 (CL)	3,503
Aftpart	573,04	0,000	0,000	4,258	0,000 (CL)	3,361
Total	1805,20		0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000

Sectional areas									
Location	Area	Location	Area	Location	Area	Location	Area	Location	Area
(m)	(m ²)	(m)	(m ²)	(m)	(m ²)	(m)	(m ²)	(m)	(m ²)
-3,250	1,43	5,200	17,78	13,650	21,54	22,100	21,54	29,900	19,60
-2,600	2,51	5,850	18,64	14,300	21,55	22,750	21,51	30,550	19,18
-1,950	3,45	6,500	19,37	14,950	21,56	23,400	21,47	31,200	18,69
-1,300	4,32	7,150	19,98	15,600	21,56	24,050	21,42	31,850	18,11
-0,650	5,12	7,800	20,45	16,250	21,56	24,700	21,34	32,500	17,45
0,000	5,89	8,450	20,82	16,900	21,56	25,300	21,25	33,150	16,69
0,650	6,77	9,100	21,12	17,550	21,56	25,350	21,24	33,800	15,82
1,300	7,87	9,750	21,34	18,200	21,56	26,000	21,12	34,450	14,83
1,950	9,51	10,400	21,43	18,850	21,55	26,650	20,96	35,100	13,70
2,600	11,98	11,050	21,48	19,500	21,55	27,300	20,78		

Sectional areas									
Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)
3,250	13,96	11,700	21,50	20,150	21,55	27,950	20,55		
3,900	15,51	12,350	21,52	20,800	21,55	28,600	20,29		
4,550	16,76	13,000	21,53	21,450	21,54	29,250	19,97		



NOTE 1: Draft (and all other vertical heights) is measured from base Z=0,000

NOTE 2: All calculated coefficients based on project length, draft and beam.

5 priedas. Laivo „MINTIS“ teorinio brėžinio duomenys gauti iš DELFTSHIP programos. (7,8 m. laivo ilginimas).

Design hydrostatics report

Designer

Created by

Comment

Filename MINTIS - pailginta 7,8 m.fbm

Design length	38,400 (m)	Midship location	19,200 (m)
Length over all	47,023 (m)	Relative water density	1,0250
Design beam	12,000 (m)	Mean shell thickness	0,0000 (m)
Maximum beam	0,010 (m)	Appendage coefficient	1,0000
Design draft	2,800 (m)		

Volume properties		Waterplane properties	
Moulded volume	775,895 (m ³)	Length on waterline	46,858 (m)
Total displaced volume	775,895 (m ³)	Beam on waterline	12,001 (m)
Displacement	795,292 (tonnes)	Entrance angle	0,000 (Degr.)
Block coefficient	0,6014	Waterplane area	310,24 (m ²)
Prismatic coefficient	0,9371	Waterplane coefficient	0,6733
Vert. prismatic coefficient	0,8932	Waterplane center of floatation	18,515 (m)
Wetted surface area	761,36 (m ²)	Transverse moment of inertia	5554,8 (m ⁴)
Longitudinal center of buoyancy	20,135 (m)	Longitudinal moment of inertia	48262 (m ⁴)
Longitudinal center of buoyancy	1,996 %		
Vertical center of buoyancy	1,481 (m)		

Midship properties		Initial stability	
Midship section area	21,56 (m ²)	Transverse metacentric height	8,640 (m)
Midship coefficient	0,6417	Longitudinal metacentric height	63,683 (m)

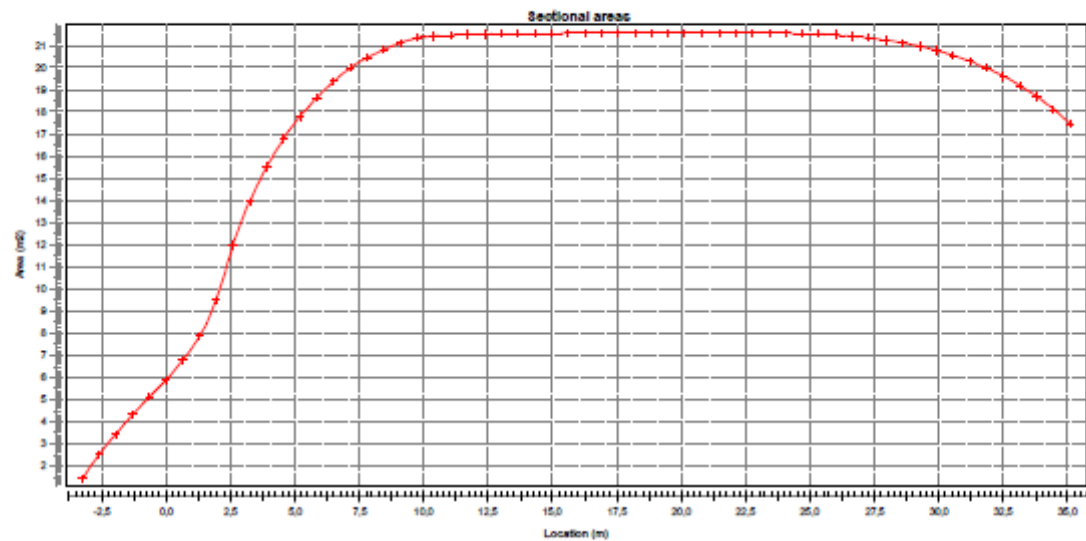
Lateral plane	
Lateral area	0,00 (m ²)
Longitudinal center of effort	0,000 (m)
Vertical center of effort	0,000 (m)

The following layer properties are calculated for both sides of the ship

Location	Area	Thickness	Weight	LCG	TCG	VCG
	(m ²)	(m)	(tonnes)	(m)	(m)	(m)
Layer 1	1324,81	0,000	0,000	26,696	0,000 (CL)	3,472
Aftpart	591,57	0,000	0,000	4,479	0,000 (CL)	3,352
Total	1916,38		0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000

Sectional areas									
Location	Area	Location	Area	Location	Area	Location	Area	Location	Area
(m)	(m ²)	(m)	(m ²)	(m)	(m ²)	(m)	(m ²)	(m)	(m ²)
-3,250	1,43	5,200	17,78	13,650	21,52	22,100	21,55	29,900	20,78
-2,600	2,51	5,850	18,64	14,300	21,53	22,750	21,55	30,550	20,55
-1,950	3,45	6,500	19,37	14,950	21,54	23,400	21,55	31,200	20,29
-1,300	4,32	7,150	19,98	15,600	21,54	24,050	21,54	31,850	19,97
-0,650	5,12	7,800	20,45	16,250	21,55	24,700	21,54	32,500	19,60
0,000	5,89	8,450	20,82	16,900	21,55	25,300	21,51	33,150	19,18
0,650	6,77	9,100	21,12	17,550	21,56	25,350	21,51	33,800	18,69
1,300	7,87	9,750	21,34	18,200	21,56	26,000	21,47	34,450	18,11
1,950	9,51	10,400	21,42	18,850	21,56	26,650	21,42	35,100	17,45
2,600	11,98	11,050	21,46	19,500	21,56	27,300	21,34		

Sectional areas									
Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)
3,250	13,96	11,700	21,48	20,150	21,56	27,950	21,24		
3,900	15,51	12,350	21,50	20,800	21,56	28,600	21,12		
4,550	16,76	13,000	21,51	21,450	21,55	29,250	20,96		



NOTE 1: Draft (and all other vertical heights) is measured from base $Z=0,000$

NOTE 2: All calculated coefficients based on project length, draft and beam.

6 priedas. Laivo „MINTIS“ teorinio brėžinio duomenys gauti iš DELFTSHIP programos. (10,4 m. laivo ilginimas).

Design hydrostatics report

Designer

Created by

Comment

Filename MINTIS - pailginta 10,4 m.fbm

Design length	38,400 (m)	Midship location	19,200 (m)
Length over all	49,623 (m)	Relative water density	1,0250
Design beam	12,000 (m)	Mean shell thickness	0,0000 (m)
Maximum beam	0,010 (m)	Appendage coefficient	1,0000
Design draft	2,800 (m)		

Volume properties		Waterplane properties	
Moulded volume	831,832 (m ³)	Length on waterline	49,458 (m)
Total displaced volume	831,832 (m ³)	Beam on waterline	12,001 (m)
Displacement	852,628 (tonnes)	Entrance angle	0,000 (Degr.)
Block coefficient	0,6447	Waterplane area	329,22 (m ²)
Prismatic coefficient	1,0050	Waterplane coefficient	0,7145
Vert. prismatic coefficient	0,9024	Waterplane center of floatation	19,809 (m)
Wetted surface area	810,09 (m ²)	Transverse moment of inertia	5906,7 (m ⁴)
Longitudinal center of buoyancy	21,435 (m)	Longitudinal moment of inertia	57470 (m ⁴)
Longitudinal center of buoyancy	4,518 %		
Vertical center of buoyancy	1,475 (m)		

Midship properties		Initial stability	
Midship section area	21,55 (m ²)	Transverse metacentric height	8,576 (m)
Midship coefficient	0,6415	Longitudinal metacentric height	70,563 (m)

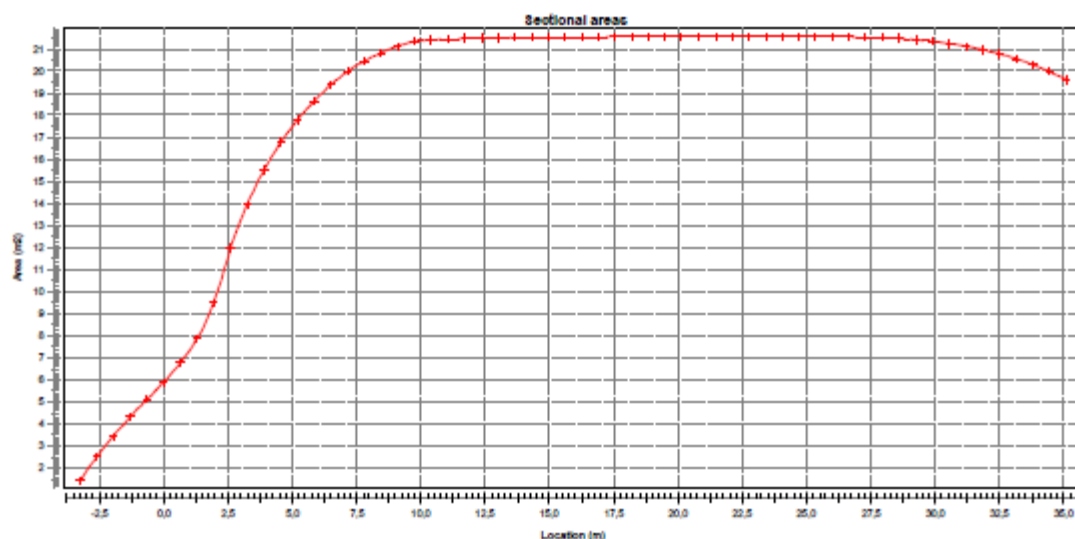
Lateral plane	
Lateral area	0,00 (m ²)
Longitudinal center of effort	0,000 (m)
Vertical center of effort	0,000 (m)

The following layer properties are calculated for both sides of the ship

Location	Area (m ²)	Thickness (m)	Weight (tonnes)	LCG (m)	TCG (m)	VCG (m)
Layer 1	1417,45	0,000	0,000	28,233	0,000 (CL)	3,445
Aftpart	610,11	0,000	0,000	4,699	0,000 (CL)	3,343
Total	2027,56		0,000	0,000	0,000 (CL)	0,000

Sectional areas									
Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)
-3,250	1,43	5,200	17,78	13,650	21,51	22,100	21,56	29,900	21,34
-2,600	2,51	5,850	18,64	14,300	21,52	22,750	21,56	30,550	21,24
-1,950	3,45	6,500	19,37	14,950	21,52	23,400	21,56	31,200	21,12
-1,300	4,32	7,150	19,98	15,600	21,53	24,050	21,55	31,850	20,96
-0,650	5,12	7,800	20,45	16,250	21,54	24,700	21,55	32,500	20,78
0,000	5,89	8,450	20,82	16,900	21,54	25,300	21,55	33,150	20,55
0,650	6,77	9,100	21,12	17,550	21,55	25,350	21,55	33,800	20,29
1,300	7,87	9,750	21,33	18,200	21,55	26,000	21,55	34,450	19,97
1,950	9,51	10,400	21,41	18,850	21,55	26,650	21,54	35,100	19,60
2,600	11,98	11,050	21,45	19,500	21,56	27,300	21,54		

Sectional areas									
Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)	Location (m)	Area (m ²)
3,250	13,96	11,700	21,47	20,150	21,56	27,950	21,51		
3,900	15,51	12,350	21,49	20,800	21,56	28,600	21,47		
4,550	16,76	13,000	21,50	21,450	21,56	29,250	21,42		



NOTE 1: Draft (and all other vertical heights) is measured from base Z=0,000

NOTE 2: All calculated coefficients based on project length, draft and beam.

7 priedas. Vandens pasipriešinimo skaičiavimo rezultatai skirtingiems greičiams

Ilginimas 2.6 m.

Dydis	Dimensija	Skaitinė reikšmė				
v_0	km/h	12,00	15,00	18,00	21,00	24,00
v	m/s	3,33	4,17	5,00	5,83	6,67
Fr	-	0,166	0,208	0,249	0,291	0,332
$C_R^{L/B}$	-	0,17	0,25	0,38	0,72	1,07
$\chi(B/T)$	-	1,06	1,16	1,25	2,10	2,40
$\chi\delta$	-	1,70	2,80	3,20	3,60	4,00
C_R	-	0,306	0,812	1,520	5,443	10,272
R_{liek}	kN	1,158	4,797	12,931	63,030	155,358
$R_e \cdot 10^{-8}$	-	0,87	1,09	1,31	1,52	1,74
$C_A \cdot 10^3$	-	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
$C_{FO} \cdot 10^3$	-	2,20	2,12	2,06	2,02	1,99
$(C_{FO} + C_A) \cdot 10^3$	-	2,70	2,62	2,56	2,52	2,49
R_{tr}	kN	10,209	15,479	21,779	29,181	37,660
$C_{AP} \cdot 10^3$	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
C_P	-	3,106	3,532	4,180	8,063	12,862
R	kN	11,745	20,867	35,561	93,369	194,531
P_E	kW	39,15	86,95	177,81	544,65	1296,87
P	kW	60,23	133,76	273,55	837,93	1995,19

Ilginimas 5.2 m.

Dydis	Dimensija	Skaitinė reikšmė				
v_0	km/h	12,00	15,00	18,00	21,00	24,00
v	m/s	3,33	4,17	5,00	5,83	6,67
Fr	-	0,161	0,201	0,242	0,282	0,322
$C_R^{L/B}$	-	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
$\chi(B/T)$	-	0,20	0,30	0,38	0,50	0,80
χ^{δ}	-	0,85	0,91	1,05	1,75	2,20
C_R	-	1,800	3,000	3,300	3,800	4,300
R_{liek}	kN	0,306	0,819	1,317	3,325	7,568
$Re \cdot 10^{-8}$	-	1,24	5,20	12,03	41,34	122,91
$C_A \cdot 10^3$	-	0,93	1,16	1,39	1,62	1,85
$C_{FO} \cdot 10^3$	-	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
$(C_{FO} + C_A) \cdot 10^3$	-	2,20	2,12	2,06	2,02	1,99
R_{tr}	kN	2,700	2,620	2,560	2,520	2,490
$C_{AP} \cdot 10^3$	-	10,96	16,62	23,39	31,33	40,44
C_P	-	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
R	kN	3,106	3,539	3,977	5,945	10,158
P_E	kW	12,61	22,45	36,33	73,92	164,97
P	kW	42,04	93,55	181,64	431,21	1099,81

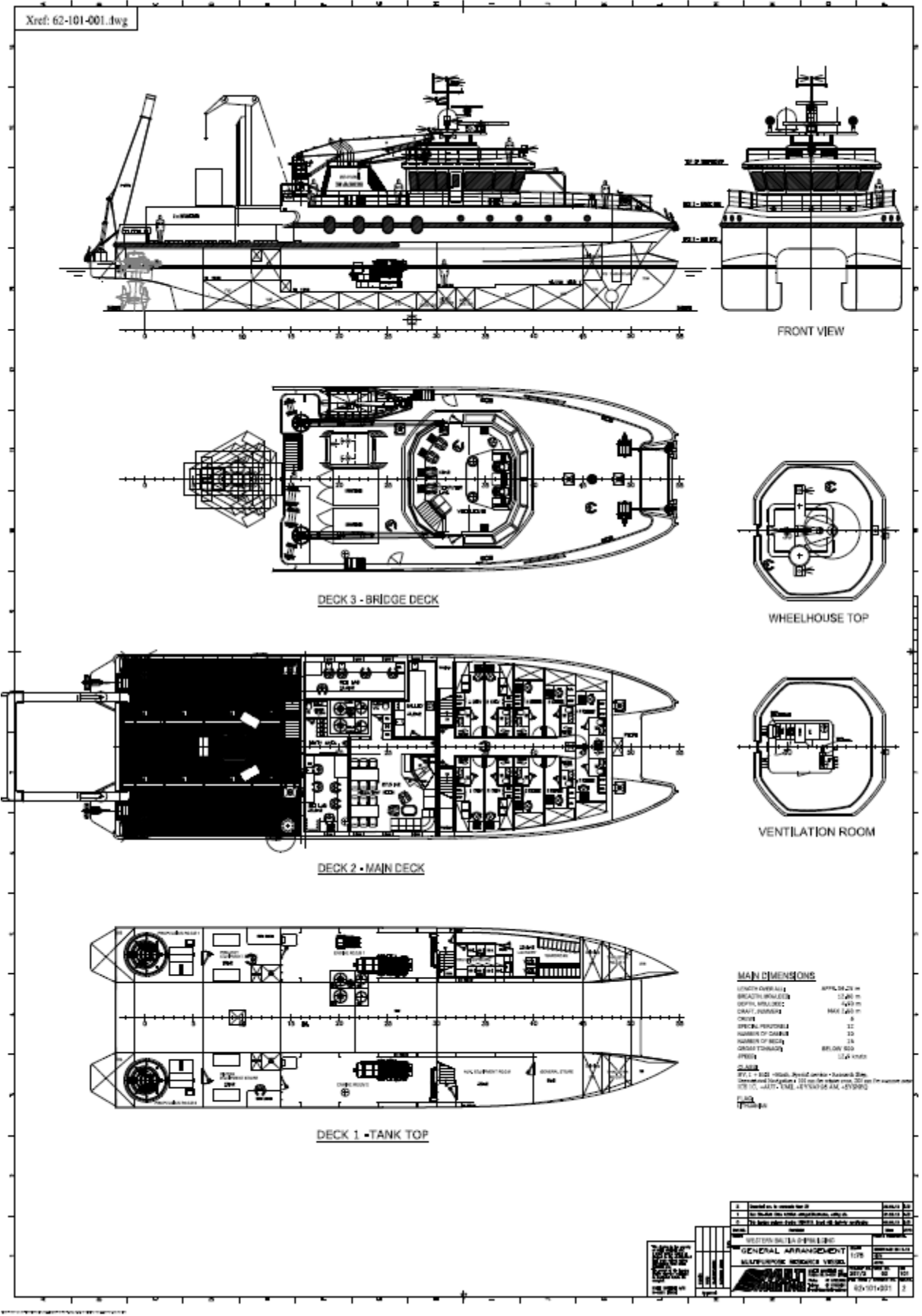
Ilginimas 7.8 m.

Dydis	Dimensija	Skaitinė reikšmė				
v_0	km/h	12,00	15,00	18,00	21,00	24,00
v	m/s	3,33	4,17	5,00	5,83	6,67
Fr	-	0,157	0,196	0,235	0,274	0,313
$C_R^{L/B}$	-	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
$\chi(B/T)$	-	0,13	0,24	0,35	0,46	0,78
χ^δ	-	0,85	0,92	0,97	1,32	1,87
C_R	-	2,000	3,200	3,600	4,000	4,400
R_{liek}	kN	0,221	0,707	1,222	2,429	6,418
$R_e \cdot 10^{-8}$	-	0,96	4,79	11,93	32,28	111,39
$C_A \cdot 10^3$	-	0,98	1,23	1,47	1,72	1,96
$C_{FO} \cdot 10^3$	-	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
$(C_{FO} + C_A) \cdot 10^3$	-	2,20	2,12	2,06	2,02	1,99
R_{tr}	kN	2,700	2,620	2,560	2,520	2,490
$C_{AP} \cdot 10^3$	-	11,72	17,76	24,99	33,49	43,22
C_P	-	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
R	kN	3,021	3,427	3,882	5,049	9,008
P_E	kW	13,11	23,23	37,90	67,09	156,35
P	kW	43,70	96,80	189,51	391,37	1042,31

Ilginimas 10.4 m.

Dydis	Dimensija	Skaitinė reikšmė				
v_0	km/h	12,00	15,00	18,00	21,00	24,00
v	m/s	3,33	4,17	5,00	5,83	6,67
Fr	-	0,152	0,190	0,229	0,267	0,305
$C_R^{L/B}$	-	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
$\chi(B/T)$	-	0,10	0,20	0,26	0,40	0,60
$\chi\delta$	-	0,83	0,90	0,97	1,17	1,90
C_R	-	2,100	3,350	3,780	4,300	4,800
R_{liek}	kN	0,174	0,603	0,953	2,012	5,472
$Re \cdot 10^{-8}$	-	0,80	4,35	9,89	28,43	100,96
$C_A \cdot 10^3$	-	1,04	1,30	1,55	1,81	2,07
$C_{FO} \cdot 10^3$	-	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
$(C_{FO} + C_A) \cdot 10^3$	-	2,20	2,12	2,06	2,02	1,99
R_{tr}	kN	2,700	2,620	2,560	2,520	2,490
$C_{AP} \cdot 10^3$	-	12,45	18,88	26,57	35,60	45,94
C_P	-	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100
R	kN	2,974	3,323	3,613	4,632	8,062
P_E	kW	13,72	23,95	37,50	65,44	148,74
P	kW	45,73	99,79	187,50	381,71	991,63

8 priedas. Laivo „Mintis“ bendras išdėstymas



9 priedas. FLOW-3D pasipriešinimo skaičiavimų rezultatai

Pasipriešinimas 10,4 m.

flscon: version 11.2.0.16 win64 2016	2.4000628E+01 -6.9842625E+04
FLOW-3D 10:12:29 05/25/2020 slam	2.5198092E+01 -6.9293250E+04
hydr3d version 11.2.0.16 win64	2.6401804E+01 -6.5617133E+04
Title	2.7601501E+01 -5.9178230E+04
5	2.8801863E+01 -5.4779629E+04
hydr3d version 11.2.0.16 win64 11/21/2016	3.0002014E+01 -5.2185176E+04
	3.1201324E+01 -4.7431711E+04
Mesh Block 1	3.2399437E+01 -4.7956281E+04
printing %1 tfixob	3.3600883E+01 -4.8321762E+04
1 101 2.822E-03 1.200E+02	3.4799732E+01 -4.9878855E+04
time tfixob 1	3.5999687E+01 -5.5641766E+04
2.8219535E-03 -1.4986732E+07	3.7200665E+01 -5.9113176E+04
0,00282 - 14986732 N – 14986,732 kN	3.8398132E+01 -6.3534293E+04
1.2009026E+00 -8.6929164E+04 1,2	3.9599426E+01 -6.6582430E+04
2.3988616E+00 -8.8436781E+04	4.0798580E+01 -6.7089656E+04
3.6013749E+00 -8.9062812E+04	4.2002018E+01 -6.8419336E+04
4.8003235E+00 -8.7876547E+04	4.3199261E+01 -6.4573934E+04
5.9994960E+00 -6.9216719E+04	4.4400345E+01 -6.1389008E+04
7.2016678E+00 -6.1112477E+04	4.5599201E+01 -5.5248664E+04
8.4003496E+00 -5.9100094E+04	4.6799427E+01 -5.3018277E+04
9.6000214E+00 -5.4063871E+04	4.8000610E+01 -4.7051043E+04
1.0801286E+01 -5.8449504E+04	4.9200924E+01 -4.4566109E+04
1.1997995E+01 -5.9842246E+04	5.0399246E+01 -4.3100887E+04
1.3201457E+01 -5.8432414E+04	5.1601299E+01 -4.1807027E+04
1.4399965E+01 -5.7593406E+04	5.2799595E+01 -4.6157523E+04
1.5601565E+01 -5.5374652E+04	5.3998695E+01 -5.2251387E+04
1.6800426E+01 -5.5608207E+04	5.5200603E+01 -5.3959566E+04
1.8001200E+01 -5.5702020E+04	5.6401340E+01 -5.9681094E+04
1.9198336E+01 -5.7053016E+04	5.7600044E+01 -6.2859625E+04
2.0401184E+01 -6.2727547E+04	5.8798771E+01 -6.6200812E+04
2.1599781E+01 -6.6330938E+04	5.9999992E+01 -6.7265320E+04
2.2798939E+01 -7.0531797E+04	6.1198971E+01 -6.6159711E+04

6.2400002E+01 -6.3640441E+04
 6.3600636E+01 -6.0647004E+04
 6.4800758E+01 -6.0295004E+04
 6.6000343E+01 -5.3724297E+04
 6.7198372E+01 -4.8384902E+04
 6.8399940E+01 -4.4774113E+04
 6.9601173E+01 -4.7986660E+04
 7.0799026E+01 -4.4903684E+04
 7.2000214E+01 -4.8581016E+04
 7.3200813E+01 -5.2815258E+04
 7.4398079E+01 -5.9601258E+04
 7.5601753E+01 -5.9249160E+04
 7.6800713E+01 -6.2681082E+04
 7.8000938E+01 -6.5246055E+04
 7.9201302E+01 -6.5582422E+04
 8.0401016E+01 -6.6885117E+04
 8.1599899E+01 -6.1904723E+04
 8.2799736E+01 -5.8072500E+04
 8.4000099E+01 -5.5641668E+04
 8.5199371E+01 -5.2444594E+04
 8.6400658E+01 -5.0036906E+04
 8.7598267E+01 -4.8491312E+04
 8.8801468E+01 -4.6630160E+04
 8.9999863E+01 -4.7032016E+04
 9.1200027E+01 -4.8983477E+04
 9.2399643E+01 -5.2320879E+04
 9.3600365E+01 -5.5594820E+04
 9.4800392E+01 -5.9323914E+04
 9.5998383E+01 -6.1979695E+04
 9.7201744E+01 -6.2776402E+04
 9.8401611E+01 -6.3466785E+04
 9.9601097E+01 -6.1929562E+04
 1.0080169E+02 -5.7762828E+04
 1.0199882E+02 -5.6383133E+04
 1.0320075E+02 -5.5053062E+04

1.0439928E+02 -5.1031105E+04
 1.0560011E+02 -4.8518789E+04
 1.0679891E+02 -4.8619531E+04
 1.0800101E+02 -4.9800410E+04
 1.0920003E+02 -4.9522660E+04
 1.1040045E+02 -5.0405559E+04
 1.1160052E+02 -5.2475332E+04
 1.1280164E+02 -5.5690738E+04
 1.1399945E+02 -5.8722918E+04
 1.1519989E+02 -5.9909406E+04
 1.1639960E+02 -6.0980496E+04
 1.1759917E+02 -6.4109410E+04
 1.1880025E+02 -6.2088059E+04
 1.2000008E+02 -5.9561117E+04

Pasipriešinimas 7,8 m.

flscon: version 11.2.0.16 win64 2016
 FLOW-3D 08:55:38 05/25/2020 vxri
 hydr3d version 11.2.0.16 win64
 Title
 5
 hydr3d version 11.2.0.16 win64
 11/21/2016

Mesh Block 1

printing %1 tfxob

1 101 2.822E-03 1.200E+02

time tfxob 1

2.8219535E-03 -1.4983496E+07

1.2016629E+00 -8.2499555E+04

2.3990407E+00 -8.7812320E+04

3.6016178E+00 -8.9156594E+04

4.8014998E+00 -8.4548094E+04

5.9984984E+00	-6.9102586E+04	4.8000664E+01	-5.3933164E+04
7.1988802E+00	-6.0782637E+04	4.9200512E+01	-5.3277617E+04
8.3986597E+00	-5.6620898E+04	5.0399910E+01	-5.1400797E+04
9.5987139E+00	-5.5823617E+04	5.1599686E+01	-5.3067578E+04
1.0798866E+01	-5.8173539E+04	5.2800571E+01	-5.5617789E+04
1.1999378E+01	-6.1628141E+04	5.3999649E+01	-5.9082922E+04
1.3199535E+01	-6.3549680E+04	5.5200680E+01	-6.4781016E+04
1.4399659E+01	-6.3909414E+04	5.6399170E+01	-6.9640609E+04
1.5599900E+01	-6.3236891E+04	5.7599159E+01	-6.8576094E+04
1.6800121E+01	-6.1257070E+04	5.8800411E+01	-7.2862672E+04
1.8001022E+01	-6.1805492E+04	6.0000114E+01	-7.2565312E+04
1.9199154E+01	-6.6860570E+04	6.1199409E+01	-7.2266859E+04
2.0400703E+01	-7.2101320E+04	6.2400269E+01	-6.9181688E+04
2.1600758E+01	-7.8474922E+04	6.3600941E+01	-6.6312586E+04
2.2800734E+01	-7.9768695E+04	6.4798584E+01	-6.5519125E+04
2.4000004E+01	-7.7956312E+04	6.5999115E+01	-5.7786809E+04
2.5200148E+01	-7.6703930E+04	6.7199944E+01	-5.7124418E+04
2.6400442E+01	-7.2974312E+04	6.8399742E+01	-5.3231273E+04
2.7599964E+01	-6.7759742E+04	6.9599808E+01	-5.3194328E+04
2.8799179E+01	-6.1091285E+04	7.0799957E+01	-5.4000430E+04
3.0000500E+01	-5.7530918E+04	7.2000450E+01	-5.6278496E+04
3.1197964E+01	-5.4080613E+04	7.3200729E+01	-5.9563953E+04
3.2398880E+01	-5.3578734E+04	7.4401413E+01	-6.2837473E+04
3.3599323E+01	-5.3463324E+04	7.5599083E+01	-6.7329438E+04
3.4799683E+01	-5.8253758E+04	7.6798561E+01	-6.9893508E+04
3.5998875E+01	-6.2135750E+04	7.7998505E+01	-7.2499414E+04
3.7200333E+01	-6.9473891E+04	7.9199783E+01	-7.3671211E+04
3.8400204E+01	-7.1344352E+04	8.0400040E+01	-7.0895695E+04
3.9599285E+01	-7.4710211E+04	8.1600227E+01	-6.9401758E+04
4.0800343E+01	-7.6213180E+04	8.2800026E+01	-6.7192133E+04
4.2000610E+01	-7.3672445E+04	8.4000763E+01	-6.2744910E+04
4.3199657E+01	-7.2484898E+04	8.5199760E+01	-6.0218641E+04
4.4398121E+01	-6.7833875E+04	8.6399200E+01	-5.7334043E+04
4.5598713E+01	-6.1848930E+04	8.7600914E+01	-5.4956641E+04
4.6800938E+01	-6.0476078E+04	8.8799789E+01	-5.4180930E+04

8.9999199E+01 -5.4241992E+04
 9.1200737E+01 -5.6963266E+04
 9.2399773E+01 -5.8263656E+04
 9.3599937E+01 -6.3048070E+04
 9.4800552E+01 -6.5449785E+04
 9.6000656E+01 -6.7779023E+04
 9.7198692E+01 -7.0321844E+04
 9.8399712E+01 -7.0381789E+04
 9.9600723E+01 -6.7562562E+04
 1.0080093E+02 -6.6627531E+04
 1.0200060E+02 -6.3358574E+04
 1.0319949E+02 -6.2277770E+04
 1.0439912E+02 -5.9151293E+04
 1.0559953E+02 -5.8418766E+04
 1.0680079E+02 -5.5761148E+04
 1.0799910E+02 -5.6622684E+04
 1.0920097E+02 -5.8771988E+04
 1.1039903E+02 -6.0657445E+04
 1.1159939E+02 -6.2941578E+04
 1.1279996E+02 -6.7775164E+04
 1.1399899E+02 -6.6759266E+04
 1.1519991E+02 -7.0068891E+04
 1.1640099E+02 -7.1449148E+04
 1.1759942E+02 -6.7283164E+04
 1.1880066E+02 -7.0462812E+04
 1.2000224E+02 -6.6427164E+04

Pasipriešinimas 5,2 m.

flscon: version 11.2.0.16 win64 2016
 FLOW-3D 21:24:45 05/24/2020 khpg
 hydr3d version 11.2.0.16 win64

Title

5

hydr3d version 11.2.0.16 win64 11/21/2016

Mesh Block 1

printing %1 tfxob

1 101 2.822E-03 1.200E+02

time tfxob 1

2.8219535E-03 -1.4993041E+07
 1.2001665E+00 -9.5784258E+04
 2.3980236E+00 -8.7151117E+04
 3.5994220E+00 -9.1133219E+04
 4.7981977E+00 -8.3118367E+04
 6.0000916E+00 -6.8016914E+04
 7.1988959E+00 -5.8022355E+04
 8.3986359E+00 -5.3833414E+04
 9.5996914E+00 -4.9989816E+04
 1.0800919E+01 -5.4585570E+04
 1.1998775E+01 -5.7885906E+04
 1.3199257E+01 -6.1078621E+04
 1.4399539E+01 -6.3599645E+04
 1.5601400E+01 -6.4789844E+04
 1.6799109E+01 -6.5464469E+04
 1.7998356E+01 -6.7605070E+04
 1.9199425E+01 -7.0623891E+04
 2.0401146E+01 -7.4755242E+04
 2.1599575E+01 -7.9147406E+04
 2.2800510E+01 -8.0444805E+04
 2.4001083E+01 -8.0231211E+04
 2.5199051E+01 -7.7525586E+04
 2.6399279E+01 -7.3743516E+04
 2.7599819E+01 -6.9268289E+04
 2.8799166E+01 -6.3840625E+04
 2.9998524E+01 -6.0924215E+04
 3.1201073E+01 -6.5275215E+04
 3.2398991E+01 -5.6869688E+04
 3.3598820E+01 -6.0947062E+04

3.4799126E+01 -6.0836070E+04
3.6000900E+01 -6.7785359E+04
3.7198692E+01 -7.1770758E+04
3.8398460E+01 -7.5893773E+04
3.9599987E+01 -7.8191273E+04
4.0801254E+01 -7.9088742E+04
4.2000141E+01 -7.5923359E+04
4.3201969E+01 -7.7011219E+04
4.4398041E+01 -7.1189125E+04
4.5599514E+01 -6.6797156E+04
4.6801105E+01 -6.2696012E+04
4.7999542E+01 -5.9688445E+04
4.9200150E+01 -5.7815227E+04
5.0399784E+01 -5.7078836E+04
5.1599667E+01 -5.8254793E+04
5.2800770E+01 -6.0363957E+04
5.3999718E+01 -8.1963672E+04
5.5201107E+01 -6.9374102E+04
5.6399452E+01 -7.3819086E+04
5.7600437E+01 -7.9223648E+04
5.8801029E+01 -7.8313070E+04
6.0000706E+01 -7.8796727E+04
6.1198006E+01 -7.7873102E+04
6.2399864E+01 -7.5471086E+04
6.3599312E+01 -7.1581852E+04
6.4798241E+01 -6.7230125E+04
6.5999062E+01 -6.4654312E+04
6.7201279E+01 -6.1714621E+04
6.8401443E+01 -5.9447180E+04
6.9599655E+01 -6.2636543E+04
7.0800041E+01 -6.0953402E+04
7.2000648E+01 -6.1942961E+04
7.3199181E+01 -6.6730523E+04
7.4401123E+01 -7.0005898E+04
7.5601120E+01 -7.1979758E+04

7.6798790E+01 -7.6258023E+04
7.8001678E+01 -7.7601766E+04
7.9198303E+01 -7.6128453E+04
8.0398186E+01 -7.6818031E+04
8.1598473E+01 -7.4806281E+04
8.2800392E+01 -7.0908758E+04
8.4000114E+01 -6.7502414E+04
8.5202003E+01 -6.3307438E+04
8.6399300E+01 -6.2645777E+04
8.7600929E+01 -6.0997773E+04
8.8800285E+01 -6.1101707E+04
8.9998161E+01 -6.2192492E+04
9.1200935E+01 -6.4243289E+04
9.2398560E+01 -6.7020094E+04
9.3599266E+01 -6.9087227E+04
9.4799500E+01 -7.2218906E+04
9.6000771E+01 -7.4166812E+04
9.7198441E+01 -7.4767875E+04
9.8400070E+01 -7.4643094E+04
9.9600975E+01 -7.3674953E+04
1.0080042E+02 -7.2342203E+04
1.0200201E+02 -6.9207047E+04
1.0320203E+02 -6.8176484E+04
1.0439964E+02 -6.4979844E+04
1.0559815E+02 -6.3813086E+04
1.0679910E+02 -6.2095160E+04
1.0800009E+02 -6.3070715E+04
1.0920020E+02 -6.3265098E+04
1.1040038E+02 -6.4494832E+04
1.1160045E+02 -6.7157703E+04
1.1280009E+02 -6.9504375E+04
1.1400027E+02 -7.1372945E+04
1.1520086E+02 -7.3431312E+04
1.1640046E+02 -7.4666375E+04
1.1760061E+02 -7.5056867E+04

1.1879916E+02 -7.2999664E+04
1.2000118E+02 -7.1844305E+04

Pasipriešinimas 2,6 m.

flscon: version 11.2.0.16 win64 2016
FLOW-3D 21:30:26 05/24/2020 ufvk
hydr3d version 11.2.0.16 win64
Title
5
hydr3d version 11.2.0.16 win64
11/21/2016

Mesh Block 1

printing %1 tfxob

1 101 2.822E-03 1.200E+02
time tfxob 1
2.8219535E-03 -1.4857695E+07
1.1997596E+00 -8.3886172E+04
2.3995004E+00 -8.6780672E+04
3.5994418E+00 -9.2605406E+04
4.7989421E+00 -8.2865648E+04
6.0014033E+00 -6.7344359E+04
7.1981301E+00 -5.6064555E+04
8.3983803E+00 -5.0467023E+04
9.5993528E+00 -4.8160012E+04
1.0800455E+01 -4.8154598E+04
1.2000510E+01 -4.9207461E+04
1.3201154E+01 -5.2589227E+04
1.4400020E+01 -6.2312430E+04
1.5598532E+01 -5.8338965E+04
1.6799847E+01 -6.2755340E+04
1.7999184E+01 -6.7373672E+04
1.9201612E+01 -7.0036680E+04

2.0401628E+01 -7.4441047E+04
2.1601912E+01 -7.6113266E+04
2.2798367E+01 -7.7014781E+04
2.3998217E+01 -7.5542383E+04
2.5198702E+01 -7.2751234E+04
2.6398670E+01 -6.8745523E+04
2.7599621E+01 -6.4686578E+04
2.8799231E+01 -5.9519539E+04
3.0000214E+01 -5.6954668E+04
3.1199295E+01 -5.5256191E+04
3.2400524E+01 -5.5314441E+04
3.3600803E+01 -5.6799438E+04
3.4800030E+01 -6.0645824E+04
3.5998734E+01 -6.4556902E+04
3.7199928E+01 -6.8959078E+04
3.8401863E+01 -7.2613562E+04
3.9600956E+01 -7.5216219E+04
4.0800671E+01 -7.6082516E+04
4.2001286E+01 -7.4745078E+04
4.3200287E+01 -7.2941578E+04
4.4400368E+01 -6.9257695E+04
4.5599770E+01 -6.5300281E+04
4.6799835E+01 -6.2202516E+04
4.8000313E+01 -5.9184441E+04
4.9200283E+01 -5.5326035E+04
5.0399914E+01 -5.4597879E+04
5.1599934E+01 -5.5619715E+04
5.2800251E+01 -5.8074574E+04
5.4000263E+01 -6.2510676E+04
5.5201012E+01 -6.6267766E+04
5.6400784E+01 -6.9590344E+04
5.7598846E+01 -7.3427461E+04
5.8800457E+01 -7.5220523E+04
6.0001175E+01 -7.5769250E+04
6.1201298E+01 -7.4204086E+04

6.2401070E+01 -7.1205094E+04
 6.3600842E+01 -6.8645055E+04
 6.4800613E+01 -6.4747812E+04
 6.5999573E+01 -6.0930496E+04
 6.7199348E+01 -5.9128391E+04
 6.8399117E+01 -5.7836430E+04
 6.9598892E+01 -5.6909031E+04
 7.0798660E+01 -5.8072324E+04
 7.1998436E+01 -5.9964883E+04
 7.3201416E+01 -6.3595434E+04
 7.4401184E+01 -6.7963625E+04
 7.5600960E+01 -7.1039734E+04
 7.6800735E+01 -7.3975117E+04
 7.8000504E+01 -7.5740844E+04
 7.9200279E+01 -7.5200070E+04
 8.0400047E+01 -7.3934039E+04
 8.1599823E+01 -7.0864898E+04
 8.2799141E+01 -6.7513227E+04
 8.4000916E+01 -6.3982992E+04
 8.5200691E+01 -6.0664859E+04
 8.6400459E+01 -5.8585812E+04
 8.7600235E+01 -5.7566680E+04
 8.8800003E+01 -5.6991410E+04
 8.9999054E+01 -5.8292875E+04
 9.1201004E+01 -5.9979035E+04
 9.2401443E+01 -6.3672051E+04
 9.3601212E+01 -6.7017195E+04
 9.4800987E+01 -7.0042719E+04
 9.6000755E+01 -7.2140141E+04
 9.7200531E+01 -7.3773625E+04
 9.8400307E+01 -7.4041703E+04
 9.9600075E+01 -7.2844094E+04
 1.0079985E+02 -7.1024133E+04
 1.0199962E+02 -6.7782797E+04
 1.0319939E+02 -6.4668352E+04

1.0439916E+02 -6.1739586E+04
 1.0559894E+02 -5.9969434E+04
 1.0680054E+02 -5.8903492E+04
 1.0799814E+02 -5.8458180E+04
 1.0919802E+02 -6.1339855E+04
 1.1040168E+02 -6.2544191E+04
 1.1160089E+02 -6.3929930E+04
 1.1279858E+02 -6.6799703E+04
 1.1399923E+02 -6.9521492E+04
 1.1520033E+02 -7.2360188E+04
 1.1640142E+02 -7.2890664E+04
 1.1760156E+02 -7.2326359E+04
 1.1879948E+02 -7.1704977E+04
 1.2000179E+02 -6.9996141E+04

Pasipriešinimas Originalas

flscon: version 11.2.0.16 win64 2016

FLOW-3D 10:28:59 05/25/2020 rgrq

hydr3d version 11.2.0.16 win64

Title

5

hydr3d version 11.2.0.16 win64 11/21/2016

Mesh Block 1

Block 3: printing hyl i=242 j=35 k=25

1 121 0.000E+00 1.200E+02 242 242 35 35
25 25

time hyl -1

0.0000000E+00 0.0000000E+00

9.9905908E-01 0.0000000E+00

1.9983283E+00 0.0000000E+00

2.9984858E+00 0.0000000E+00

4.0003319E+00 0.0000000E+00

4.9996648E+00 0.0000000E+00

5.9980798E+00 0.0000000E+00

7.0004897E+00	0.0000000E+00	4.1999371E+01	0.0000000E+00
7.9988089E+00	0.0000000E+00	4.3001469E+01	0.0000000E+00
9.0011702E+00	0.0000000E+00	4.3998951E+01	0.0000000E+00
1.0000138E+01	0.0000000E+00	4.5001900E+01	0.0000000E+00
1.1000408E+01	0.0000000E+00	4.5999104E+01	0.0000000E+00
1.2000895E+01	0.0000000E+00	4.6998901E+01	0.0000000E+00
1.2999525E+01	0.0000000E+00	4.7998573E+01	0.0000000E+00
1.4000519E+01	0.0000000E+00	4.9001934E+01	0.0000000E+00
1.4999657E+01	0.0000000E+00	5.0000267E+01	0.0000000E+00
1.6000551E+01	0.0000000E+00	5.1000198E+01	0.0000000E+00
1.7000931E+01	0.0000000E+00	5.2001190E+01	0.0000000E+00
1.8001360E+01	0.0000000E+00	5.2998543E+01	0.0000000E+00
1.8999577E+01	0.0000000E+00	5.3998814E+01	0.0000000E+00
2.0000839E+01	0.0000000E+00	5.4999763E+01	0.0000000E+00
2.1001976E+01	0.0000000E+00	5.6000771E+01	0.0000000E+00
2.2000235E+01	0.0000000E+00	5.7001701E+01	0.0000000E+00
2.3000118E+01	0.0000000E+00	5.8001362E+01	0.0000000E+00
2.4000202E+01	0.0000000E+00	5.8999928E+01	0.0000000E+00
2.5001209E+01	0.0000000E+00	5.9998104E+01	0.0000000E+00
2.5998245E+01	0.0000000E+00	6.1001534E+01	0.0000000E+00
2.7000774E+01	0.0000000E+00	6.2000729E+01	0.0000000E+00
2.8000490E+01	0.0000000E+00	6.3000591E+01	0.0000000E+00
2.9001028E+01	0.0000000E+00	6.3998325E+01	0.0000000E+00
2.9998857E+01	0.0000000E+00	6.4999763E+01	0.0000000E+00
3.1000174E+01	0.0000000E+00	6.6000122E+01	0.0000000E+00
3.1999716E+01	0.0000000E+00	6.6999611E+01	0.0000000E+00
3.3000305E+01	0.0000000E+00	6.8000488E+01	0.0000000E+00
3.4001431E+01	0.0000000E+00	6.8999290E+01	0.0000000E+00
3.4998180E+01	0.0000000E+00	7.0000244E+01	0.0000000E+00
3.5999382E+01	0.0000000E+00	7.1001442E+01	0.0000000E+00
3.7001183E+01	0.0000000E+00	7.1998077E+01	0.0000000E+00
3.7998749E+01	0.0000000E+00	7.2998688E+01	0.0000000E+00
3.8999535E+01	0.0000000E+00	7.4000214E+01	0.0000000E+00
4.0000305E+01	0.0000000E+00	7.5001892E+01	0.0000000E+00
4.0999744E+01	0.0000000E+00	7.6001564E+01	0.0000000E+00

7.7000381E+01 0.0000000E+00	9.8998428E+01 0.0000000E+00
7.8001213E+01 0.0000000E+00	1.0000132E+02 0.0000000E+00
7.9001480E+01 0.0000000E+00	1.0100026E+02 0.0000000E+00
7.9998756E+01 0.0000000E+00	1.0200087E+02 0.0000000E+00
8.0998611E+01 0.0000000E+00	1.0300092E+02 0.0000000E+00
8.1999168E+01 0.0000000E+00	1.0400109E+02 0.0000000E+00
8.2999168E+01 0.0000000E+00	1.0500146E+02 0.0000000E+00
8.3998131E+01 0.0000000E+00	1.0599964E+02 0.0000000E+00
8.5000229E+01 0.0000000E+00	1.0700002E+02 0.0000000E+00
8.6002022E+01 0.0000000E+00	1.0799898E+02 0.0000000E+00
8.6999008E+01 0.0000000E+00	1.0899998E+02 0.0000000E+00
8.7999512E+01 0.0000000E+00	1.1000062E+02 0.0000000E+00
8.9000824E+01 0.0000000E+00	1.1100043E+02 0.0000000E+00
9.0001839E+01 0.0000000E+00	1.1199987E+02 0.0000000E+00
9.0998680E+01 0.0000000E+00	1.1300144E+02 0.0000000E+00
9.1998650E+01 0.0000000E+00	1.1400069E+02 0.0000000E+00
9.3000603E+01 0.0000000E+00	1.1500008E+02 0.0000000E+00
9.3999748E+01 0.0000000E+00	1.1600124E+02 0.0000000E+00
9.4998718E+01 0.0000000E+00	1.1700069E+02 0.0000000E+00
9.6000397E+01 0.0000000E+00	1.1800004E+02 0.0000000E+00
9.7001198E+01 0.0000000E+00	1.1899963E+02 0.0000000E+00
9.7998863E+01 0.0000000E+00	1.2000085E+02 0.0000000E+00

10 priedas. FLOW-3D pasipriešinimo vidurkių rezultatai nuo 80 iki 120 sekundės.

Laikas, s	Oroignalas korpusas	Ilginimas 2,6 m.	Ilginimas 5,2 m.	Ilginimas 7,8 m.	Ilginimas 10,4 m.
80	65,52	73,93	76,82	70,90	66,89
82	61,97	70,86	74,81	69,40	61,90
83	58,84	67,51	70,91	67,19	58,07
84	54,82	63,98	67,50	62,74	55,64
85	53,36	60,66	63,31	60,22	52,44
86	52,83	58,59	62,65	57,33	50,04
88	50,00	57,57	61,00	54,96	48,49
89	50,54	56,99	61,10	54,18	46,63
90	52,44	58,29	62,19	54,24	47,03
91	55,63	59,98	64,24	56,96	48,98
92	56,44	63,67	67,02	58,26	52,32
94	63,07	67,02	69,09	63,05	55,59
95	64,03	70,04	72,22	65,45	59,32
96	65,18	72,14	74,17	67,78	61,98
97	66,63	73,77	74,77	70,32	62,78
98	66,14	74,04	74,64	70,38	63,47
100	64,58	72,84	73,67	67,56	61,93
101	62,01	71,02	72,34	66,63	57,76
102	58,67	67,78	69,21	63,36	56,38
103	56,83	64,67	68,18	62,28	55,05
104	54,22	61,74	64,98	59,15	51,03
106	52,73	59,97	63,81	58,42	48,52
107	52,34	58,90	62,10	55,76	48,62
108	52,55	58,46	63,07	56,62	49,80
109	53,80	61,34	63,27	58,77	49,52
110	54,85	62,54	64,49	60,66	50,41
112	58,11	63,93	67,16	62,94	52,48
113	60,52	66,80	69,50	67,78	55,69
114	63,74	69,52	71,37	66,76	58,72
115	63,82	72,36	73,43	70,07	59,91
116	64,34	72,89	74,67	71,45	60,98
118	63,70	72,33	75,06	67,28	64,11
119	61,71	71,70	73,00	70,46	62,09
120	60,58	70,00	71,84	66,43	59,56
VIDURKIAI	58,72	66,11	68,75	63,40	55,71