

# **KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS**

Jūrų technikos fakultetas

Laivo inžinerijos katedra

Tadas Valiulis

## **SEKLIŲ VANDENŲ LAIVO JŪRINIŲ SAVYBIŲ TYRIMAS**

Laivų projektavimo ir statybos studijų programos magistranto  
baigiamasis darbas

Klaipėda, 2013

## SANTRAUKA

Valiulis T. Seklių vandenų laivo jūrinių savybių tyrimas. Laivų projektavimo ir statybos studijų programos magistro baigiamasis darbas. Darbo vadovas dr. V. Djačkov, Klaipėdos universitetas, Jūrų technikos fakultetas: Klaipėda, 2013.

Magistro baigiamajame darbe tiriamas seklių vandenų laivas su specialiai pritaikytu laivapriekiu. Laivo modelis tiriamas SSD skaičiavimo metodika, rezultatai lyginami su bandymų baseine atliktais tyrimais.

Baigiamasis darbas susideda iš teorinės ir eksperimentinės dalies. Teorinėje dalyje apžvelgiama, kokie reiškiniai pasireiškia sekliuose vandenyse, kaip šiuos reiškinius reikėtų įvertinti ir kokie yra atlikti tyrimai šioje srityje. Pateikiamos šių reiškinų mažinimo galimybės, aprašoma laivaprieikinio gumbo paskirtis. Apžvelgiamos metodikos ir reikalavimai išleisti ITTC.

Eksperimentinėje dalyje atliekami bandymai su skaičiuojamosios skysčių dinamikos programa Flow 3D. Gauti rezultatai palyginami su modelinių bandymų rezultatais.

**Raktiniai žodžiai** – seklių vandenų laivas, sekliems vandenims pritaikytas laivapriekis, SSD – skaičiuojamųjų skysčių dinamika, modeliavimas naudojant Flow 3D programą, vandens pasipriešinimo laivo judėjimui tyrimai.

## SUMMARY

Valiulis T. Marine features research of shallow water vessel. Master's degree final thesis of ship design and construction program. Master's degree final thesis tutor Dr. V. Djačkov, Klaipėda University, Faculty of Marine Engineering: Klaipėda, 2013.

In this master's degree final thesis the vessel of the shallow water with a specially adapted bow is analyzed. The ship model is investigated with CFD calculation methodology, the results are compared with model test experiments data.

Final thesis consists of theoretical and experimental parts. The theoretical part provides an overview of which effects occurs in shallow water, how these effects needs to be evaluated and what studies are accomplished in this area. The opportunities for reducing of these effects are presented, the purpose of bulbous bow is described. Procedures and requirements released by ITTC are overviewed.

In the experimental part of final thesis tests are carried out with computational fluid dynamics program Flow 3D. The results obtained are compared with model tests results.

**Keywords** – Shallow water ship, bulbous bow adapted to shallow water, CFD – Computer cal fluid dynamic, research made in Flow 3D program, water resistance research in shallow water.

## MAGISTRO BAIGIAMŲJŲ DARBŲ LYDRAŠČIO FORMA

### Pildo magistro baigiamojo darbo autorius

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

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

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

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

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

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

### Pildo magistro baigiamojo darbo vadovas

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

(įrašyti – leidžiu arba neleidžiu)

.....  
(data )

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

### Pildo katedros, kuriojančios studijų programą, administratorius (sekretorius)

Baigiamasis darbas įregistruotas katedroje

.....  
(data)

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

### Pildo katedros, kuriojančios studijų programą, vedėjas

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

(įrašyti – leidžiu arba neleidžiu)

.....  
(data )

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

**Recenzentu(-ais) skiriu** .....

.....  
(įrašyti recenzento(u) vardą, pavardę)

.....  
(data )

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



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

Užduotis studentui: Tadiui Valiuliui

Temos pavadinimas: Seklių vandenų laivo jūrinių savybių tyrimas

### Darbo sudėtis

1. Įvadas
2. Literatūros analizė
3. Modelinių bandymų aprašymas ir analizė
4. Matematinis modeliavimas naudojant programa Flow 3D
  - 4.1. Vandens pasipriešinimo laivo judėjimui be laivapriekinio bulbo
  - 4.2. Vandens pasipriešinimo laivo judėjimui su laivapriekiniu bulbu
  - 4.3. Skaičiavimo rezultatų palyginimas su modeliniais bandymais

Išvados

Literatūra

Priedai

Darbo vadovas: doc. dr. Vasilij Djačkov

(vardas, pavardė, parašas)

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Tipinės linijinių gumbo parametrų reikšmės .....	22
2 lentelė. Tipinės nelinejinių gumbo parametrų reikšmės.....	22
3 lentelė. Bandinių ir natūralaus dydžio laivų charakteristikos .....	32
4 lentelė. Eksperimentų sąlygos.....	35
5 lentelė. Modelio eksperimentas 08,024,01 .....	36
6 lentelė. Modelio eksperimentas 0,8,025,01 .....	36
7 lentelė. Modelio eksperimentas 0,8,026,01 .....	36
8 lentelė. Modelio eksperimentas 0,8,027,01 .....	36
9 lentelė. Modelio eksperimentas 0,8,028,01 .....	37
10 lentelė. Vandens greitis.....	38
11 lentelė. Laivo pasipriešinimo su laivapriekiniu gumbu rezultatai.....	42
12 lentelė. Laivo pasipriešinimo be laivapriekinio gumbo rezultatai .....	43
13 lentelė. Skirtingų laivapriekių formų vertinimas.....	46

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Laivo siurbimo efektas sekliame vandenyje .....	11
2 pav. Laivo siurbimo efektas sekliame vandenyje .....	12
3 pav. Laivinių bangų sistema. ....	13
4 pav. Laivybos kanalų formos.....	16
5 pav. Siurbimo efekto priklausomybė nuo greičio taikant skirtingas skaičiavimo metodikas .....	18
6 pav. Siurbimo efekto priklausomybė nuo greičio .....	19
7 pav. Laivo sukeltos bangos .....	20
8 pav. Gumbo parametrai .....	21
9 pav. Laivapriekių tipai ir jų dizaino parametrai.....	23
10 pav. Tipinės laivapriekių formos .....	24
11 pav. Laivo sparnai .....	24
12 pav. Laivapriekinė plokštė.....	25
13 pav. Laivapriekinis sparnas .....	25
14 pav. Vandens turbulencija .....	26
15 pav. Tiriamo laivo modelis bandymu baseine 4,72 m/s .....	29
16 pav. Sienose užduodamos eksperimento sąlygos.....	30
17 pav. Seklaus vandens gumbas.....	33
18 pav. Seklių vandenių laivas su įprastine laivapriekine forma.....	33
19 pav. Stebėjimo stiklas.....	34
20 pav. Schematinis Duisburgo laboratorijos patalpų vaizdas .....	35
22 pav. Programos apskaičiuotas korpusas .....	39
23 pav. Laivo pasipriešinimo grafinis atvaizdavimas.....	40
24 pav. Įprastinio tinklelio laivapriekio forma .....	41
25 pav. Padidinto tinklelio laivapriekio forma .....	42
26 pav. Laivo pasipriešinimo grafinis atvaizdavimas.....	43
27 pav. Eksperimente naudotų laivapriekių formos .....	44
28 pav. Tiriamo laivo modelis bandymu baseine 3,53 m/s .....	45
29 pav. Tiriamas laivas SSD programoje baseine 3,48 m/s .....	45
30 pav. Laivas su C tipo gumbu SSD programoje 3,53 m/s .....	46
31 pav. Skirtingų laivapriekių formų vertinimas .....	47

## TURINYS

<b>ĮVADAS</b> .....	9
<b>I. LITERATŪROS ANALIZĖ</b> .....	11
1.1. Sekliame vandenyje pasireiškiantys reiškiniai .....	11
1.1.1 Bangos sukeliama sekliame vandenyje .....	12
1.2. Seklaus vandens reiškinių atlikti tyrimai, jų vertinimas .....	14
1.3. Šių reiškinių įtaka laivui, jų mažinimo galimybės .....	18
1.4. Laivapriekinis gumbas .....	19
1.5. SSD- skaičiuojamųjų skysčių dinamikos įvertinimo metodai .....	26
1.6. ITTC rekomendacijos modeliniams pasipriešinimo testams atlikti .....	28
1.7. ITTC rekomendacijos SSD skaičiavimo metodikoms aprašyti.....	29
<b>II. TIRIAMOJI DALIS</b> .....	32
2.1. Tiriama laivo parametrai.....	32
2.2. Laboratoriniai tyrimai .....	34
2.3. Bandymo aprašymas Flow 3D programoje.....	37
2.4. Skirtingų tinklelio tankumų pasipriešinimo palyginimas .....	40
2.5. Skirtingų laivapriekio formų pasipriešinimo įvertinimas .....	44
<b>IŠVADOS</b> .....	48
<b>LITERATŪRA</b> .....	50
<b>PRIEDAI</b> .....	52

## IVADAS

Europos Parlamentas nuolat reiškė paramą vidaus vandens kelių transportui ir daugiaryšio transporto skatinimo priemonėms (Danklefsen N., 2008 m.). Toks transportas yra itin efektyvus suvartojamos energijos tonkilometriui požiūriu ir gali būti laikomas viena labiausiai aplinką tausojančių ir saugiausių transporto rūšių. Tokio transporto priimtinumą ir konkurencingumą rodo ir tai, kad tokios garsios kompanijos kaip Mercedes, BASF, Kronenbourg, Neckermann, Heineken, Nike, Auchan, Renault, Arianespace ir kt. plačiai naudojami vidaus vandenų transporto paslaugomis. Visame pasaulyje bendras vidaus vandenų kelių ilgis siekia 550 tūkst. km. Tai rodo, kad toks transportavimas išlieka aktualus visame pasaulyje. Vidaus vandenų transporto patrauklumą lemia ir tokios jo savybės kaip punktualumas, saugumas, techninės galimybės ir maži kaštai. Atsižvelgiant į užsienio patirtį ir užsienio šalių vidaus vandenų transporto infrastruktūrą, tampa aišku, kad vandens transportas yra viena iš perspektyvių ūkio plėtros šakų, kuri turėtų būti plėtojama ir Lietuvoje (ES vidaus vandenų transporto politika, 2006). Tačiau vidaus vandenų laivai susiduria su rimtomis problemomis, viena iš jų – tai mažas vandenų gylis. Nedidelio gylio problema tampa vis opesnė nes laivų gabaritai didėja, o uosto akvatorijose, kanaluose, kur vyksta laivyba, išlaikomas tik minimalus reikalaujamas gylis. Laivo savybės (tokios kaip eigumas, valdomumas, hidrodinaminės jėgos veikiančios laivą ir kt.) sekliame vandenyje skiriasi nuo savybių giliame vandenyje. Kaip pavyzdžiui – laivui judant sekliame vandenyje po laivu atsiranda didesnis slėgis, dėl ko sumažėja grimzlė (Metin T., 2001.n 3p.). Šiandien energijos taupymas, trinties mažinimas yra pagrindines laivo projektuotojų užduotys. Labai maži geometriniai pakeitimai laivapriekinėje laivo dalyje lyginant su visu laivo korpusu gali duoti reikšmingą naudą siekiant padidinti laivo efektyvumą sekliame vandenyje. Speciali laivapriekio forma, vadinama laivapriekiniu gumbu – tai tinkamai parinkta inovacija, kuri gali sumažinti laivo kuro sąnaudas nuo 13 proc. iki 15 proc. (Venckus T., 2010. 1p.). Šiame darbe nagrinėsime sekliems vandenims pritaikyto laivapriekinio gumbo savybes. Laivapriekinis gumbas pirmą kartą buvo pritaikytas 1907 m. inžinieriaus D.W. Taylor. Jis buvo pirmasis, kuris suprato ir panaudojo tokio laivapriekio formos privalumus (Kracht A., 1978. 197-217p.). Laivo korpuso formų vertinimas paprastai atliekamas eksperimentais specialiaame bandymų baseine arba pasitelkiant į pagalbą SSD – skaičiuojamųjų skysčių dinamikos įvertinimo metodus. Skaičiuojamoji skysčių dinamika (angl. CFD – computational fluid dynamics) yra paremta pagrindinėmis skysčių dinamikos lygtimis – tolydumo (continuity), judesio kiekio (momentum) ir energijos lygtimis. Šios lygtys yra trijų pagrindinių fizikos principų, kuriais paremta visa skysčių dinamika, matematinė formuluotė. Spartus kompiuterinės technikos vystymasis leidžia efektyviai tobulinti fizinių procesų modeliavimo programas, kurioms padedant galima apskaičiuoti ir vizualizuoti laivo judėjimą, esant skirtingoms aplinkos sąlygoms. Naudojant Klaipėdos universitete

turimą programą Flow 3D bandysime įvertinti seklių vandens laivo jūrines savybes, programoje gautus rezultatus lyginsime su atliktais tyrimais bandymų baseine.

Darbo tikslas:

Atlikti vandens pasipriešinimo tyrimą pritaikant skirtingas laivapriekio formas.

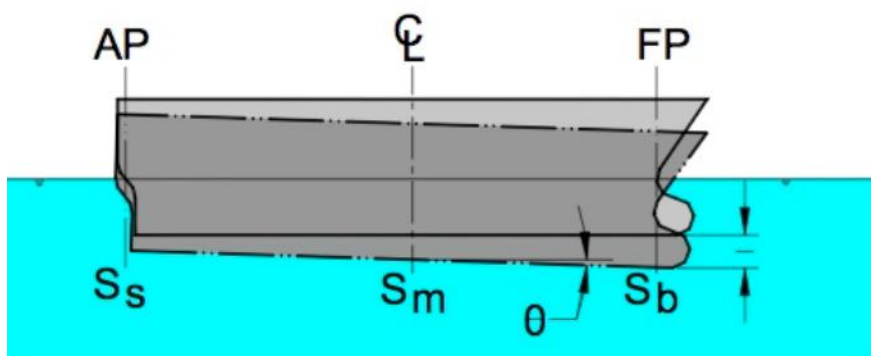
Uždaviniai:

1. Išanalizuoti sekliame vandenyje pasireiškiančius reiškinius;
2. Apžvelgti seklaus vandens reiškinių atliktus tyrimus ir jų vertinimą;
3. Išanalizuoti seklaus vandens reiškinių įtaka laivui ir jų mažinimo galimybes;
4. Aprašyti laivapriekinį gumbą;
5. Pateikti skaičiuojamųjų skysčių dinamikos įvertinimo metodus;
6. Atlikti analizę sudarius laivo modelį panaudojant Flow 3D programą, palyginti gautus duomenis;
7. Pateikti išvadas.

# I. LITERATŪROS ANALIZĖ

## 1.1. Sekliame vandenyje pasireiškiantys reiškiniai

Laivus plaukiojančius sekliuose vandenyse (dažniausiai tai upės ar dirbtiniai kanalai) veikia visiškai kitokios bangos nei atvirame vandenyje. Atsimušdamos į krantus ar kitą laivą bangos grįžta atgal į laivo korpusą ir sukelia papildomą pasipriešinimą, nestabilumą (Henn R., 2001, 2p.). Laivų savininkams norint įveikti vis intensyvesnę konkurencinę kovą su kitomis transporto rūšimis tenka didinti laivų greitį ir gabaritus. Tai savo ruožtu įtakoja laivų sukiamų bangų didėjimą bei yra tiesiogiai proporcinga laivo energijos kiekio suvartojimui. Bangų teorija aiškina, kad bangos energija yra proporcinga bangos aukščio kvadratui (Jacek J., 2008, 5p.). Didėjant laivų gabaritams mažėja atstumas tarp laivo kylio ir dugno (klirensas). Jeigu šis atstumas yra mažesnis nei 1,5 m pasireiškia siurbimo efektas, dėl to atsiranda diferentas į laivapriekį ar laivagalį (Venckus T. 2010 4p.). Šis fenomenalus reiškinys galioja ir prasilenkiant laivams, o tai pat ir tokiu atveju kai atstumas tarp laivo ir pakrantės yra pakankamai mažas. Siurbimo efektas vienas iš kritinių reiškinų, kuris veikia laivus sekliuose vandenyse. Laivui judant dėl siurbimo efekto vanduo išstumiamas į priekį. Dėl skirtingų korpuso formų vandens greičio aptekėjimas yra nevienodas, tai įtakoja slėgių kritimą, dėl to, laivas grimzta vertikaliai. Dėl tokio grimzdimo laivas automatiškai įgauna diferentą į laivapriekį arba laivagalį. Didžiausi siurbimo efekto padariniai pasireiškia laivapriekyje  $S_b$  (žr. 1 pav.), ypač kai laivas pilnai pakrautas ir plaukia siaurame negilame kanale.



1 pav. Laivo siurbimo efektas sekliame vandenyje  
Šaltinis (Michael J., 2006, 2p.)

Tačiau laivams su nedideliu vandentalpos pilnumo koeficientu siurbimo efektas pasireiškia laivagalyje  $S_s$  (žr. 1 pav.). Efekto stiprumas priklauso nuo laivo greičio ( $V$ ), grimzlės ( $d$ ) ir vandentalpos pilnumo koeficiento ( $\delta$ ) bei kanalo parametrų - gylio ( $h$ ) ir pločio ( $w$ ) (žr. 1 pav.). Vertinant efekto intensyvumą laikoma, jog laivas plaukia kanalo viduryje, greitis yra pastovus, o kanalo dugnas yra lygus. Praktikoje yra teigiama, jog kanalo nelygumai – duobės, iškilimai, padidina laivo siurbimą prie dugno, o dumblytumas sumažina (Venckus T., 2010, 4 p.).



2 pav. Laivo siurbimo efektas sekliame vandenyje

Šaltinis (Watts M., 2008)

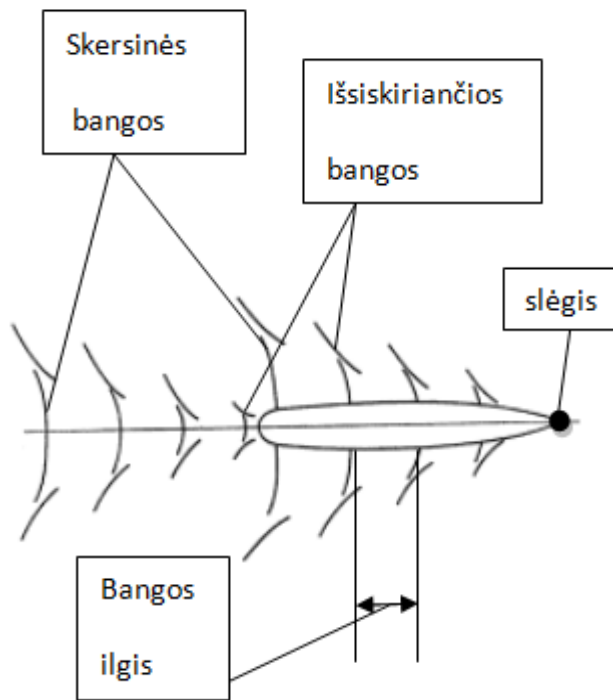
Būtina įvertinti seklaus vandens efektus, kad išvengtume jo sukiamų padarinių, tokių kaip - laivo diferento į laivagalį ar laivapriekį, ženklus laivapriekinės bangos aukščio padidėjimo, suprastėjusio laivo valdomumo, manevringumo, sulėtėjusio vairo reakcijos laiko į atliktus manevrus, dėl ko cirkuliacijos charakteristikos gali padidėti iki 100%. Priklausomai nuo seklaus vandens parametrų kinta laivo greitis. Jei laivas juda atviroje seklioje akvatorijoje greitis gali sumažėti iki 35%. Jei laivas plauks kanale ar upėje greičio sumažėjimas gali siekti 75%. Kartais pasireiškia rezonansas, kai sekliame vandenyje laivas gali pradėti vibruoti. Tai nutinka kai savieji korpuso dažniai sutampa su kito kūno virpesiais. Laivo stabdymo kelias ir laikas padidėja lyginant su gilaus vandens parametrais.

### 1.1.1 Bangos sukeltos sekliame vandenyje

Laivui plaukiant susidaro dviejų tipų laivinės bangos kurios pakeičia vandens dalelių greičius sraute (3 pav.).

Divergentinės – bangos susidaro, kai laivas juda ir stumia vandens masę. Taip sudarydamas didesnę vandens slėgį laivapriekinėje laivo dalyje.

Skersinės – bangos susidarančios laivagalyje ir paliekančios hidrodinamines jėgas stabdančias laivą.



3 pav. Laivinių bangų sistema.  
Šaltinis (Donald C.S., 2008)

Šios laivų generuojamos bangos gali būti sukeltos tiek į laivapriekį, tiek į laivagalį. Laivinių bangų susidarymas susietas su tuo, kad laivui plaukiant arti laivo korpuso vandenyje slėgis pakinta, o vandens paviršių visur veikia vienodas oro slėgis. Laivapriekyje ir laivagalyje vandens lygis pakyla, o ties laivo mideliu nusileidžia. Kostenko 1939 m. ir Gerasimov 1959 m. šį fenomeną aprašė taip: “Vandens masės sužadintos laivapriekio užpildo susidariusią ertmę laivagalyje”. Pavyzdžiui, laivas kurio ilgis 100 metrų, tonažas 1000 tonų, judantis 40 mazgų greičiu, per 5 sekundes išstums 1000 tonų vandens, taip paskui save palikdamas dujų ertmę, kuri bus užpildoma vandeniu. Teoriškai spėti kaip skystis užlies tuščią ertmę yra sudėtinga, o ypač negiliame vandenyje (Venckus T., 2010, 2p.). Pasikeitus greičiams sraute, persiskirsto ir slėgis išilgai laivo. Suprojektavę slėgio pokyčio atstojamąją Laivo judėjimo kryptį, turėsime bangavimo pasipriešinimą  $R_w$  (Čerka J., 2005, 11p.).

$$R_w = \int p_n d\Omega, \quad (1.1.1)$$

čia  $p_n$  – elementų plotas, m;

$d\Omega$  – elementų plotą veikiantis slėgis,  $kg/m^2$ .

Iš pusiausvyros išvestos vandens dalelės, sunkio jėgos veikiamos, pradeda svyruoti – judėti apskritimu (Briggs M. J. 2006). Mažėjant gyliui mažėja ir vandens dalelių orbitos, kuriomis juda dalelės.

Laivo sukeltas vandens dalelių srautas pasikeičia jai atsiranda sąlytis su dugnu, orbitų forma plokštėja tampa elipsiška, visiškai pasiekusios dugną dalelės juda plokštuma. Tokia dalelių

elgsena vadinama ilgos bangos efektu, jis pasireiškia kai bangos ilgis yra didesnis ir skiriasi keletą kartų nei vandens gylis ( Ruellan F. ir kt., 1950, 10 p.).

Laivapriekinių ir laivagalinių bangų interferencija – kai bangos sutampa gaudamos vieną bangą arba viena kita slopindamos sukelia charakteringus lingavimus nuo kurių laivas ima vibruoti ar kitaip judėti. Šių bangų slopinimui ar įveikimui naudojamas laivapriekinis gumbas.

## **1.2. Seklaus vandens reiškinių atlikti tyrimai, jų vertinimas**

Projektuojant laivą būtina žinoti, kokią įtaką daro įvairūs korpuso formos rodikliai, tokie kaip pagrindinių matmenų santykiai, pilnumo koeficientas laivagalių forma, cilindrinė laivo dalis, vandentalpos centro padėtis. Vandens pasipriešinimas judant laivui išlieka vienas iš svarbiausių rodiklių. Šis klausimas sudėtingas, ir išsamų atsakymą projektuotojas gauna tik atlikęs laivo modelinius bandymus. Siekiant kryptingai atlikti eksperimentinius tyrimus bei preliminariai įvertinti vandens pasipriešinimą laivo judėjimui, būtina žinoti pagrindinius laivo korpuso formos įtakos vandens pasipriešinimui dėsningumus. Laivo eigumas yra viena iš svarbiausių laivo, kaip sudėtingo plaukiojančio inžinerinio įrenginio, savybių. Laivo eigumas – tai savybė išvystyti reikiamą laivo greitį tam eikvojant kuo mažiau galios. Šiandieniniai laivo eigumo uždaviniai konkrečiai sprendžiami tiek remiantis mokslo laimėjimais ir teorija, tiek vadovaujantis gerąja praktika bei sukaupta patirtimi. Laivui tolygiai plaukiant tiesiu kursu, laivo korpusas nuolat susiduria su vandens mase, t.y. aplinkiniam vandeniui perduoda dalį energijos. Dalis šios energijos, kuri buvo suteikta vandeniui laivo įsibėgėjimo metu, lieka pastovi, kita dalis, eikvojama vandeniui stumti. Ši energija, tenkanti laivo nuplaukto kelio vienetui, lygi vandens pasipriešinimui laivo judėjimui. Visas vandens pasipriešinimas susideda iš trijų dalių: trinties pasipriešinimo  $R_F$ , formos pasipriešinimo  $R_{VP}$ , bangavimo pasipriešinimo  $R_W$ . Be šių pagrindinių pasipriešinimo dalių dar yra išsikišančių dalių pasipriešinimas  $R_{AP}$ , oro pasipriešinimas  $R_{AA}$  ir kai kurios kitos pasipriešinimo dalys, būdingos tam tikromis plaukiojimo sąlygomis. Laivo eigumo uždaviniuose nagrinėjamas atvirkštinis judėjimas: sąlyginai laikomas, kad laivas stovi vietoje, o jį apteka vandens srautas greičiu, lygiu laivo greičiui.

Nepastovaus gylio sekliuose vandenyse eksploatuojamiems laivams, paprastai taikomi modeliniai bandymai. Siekiant tiksliai įvertinti seklaus vandens kriterijus pasipriešinimui reikia tinkamo vertinimo baigtiniam vandens gylio efektui. Ribų efektą galime įvertinti Ross ir Wtajeble metodais, abi šios metodikos susijusios su korekcijomis, viena skirta greičiui kita – pasipriešinimui. Abu šiuos metodus galime sujungti su Schichtingo hipoteze, kurioje teigiama, kad giliame ir sekliame vandenyje bangavimo pasipriešinimas yra vienodas kai yra vienodas bangų ilgis. Esant skirtingiems greičiams pasipriešinimo skaičiavimuose tiesiog įvedamas greičio koeficientas (1.2.1).

$$k_x \frac{C_{Rh}}{C_R} \quad (1.2.1)$$

čia  $C_{Rh}$  – likusio pasipriešinimo koeficientas sekliame vandenyje;

$C_R$  – likusio pasipriešinimo koeficientas giliame vandenyje.

Greičio kritimui nustatyti naudojamas Landeweber'io koeficientas, įvertinantis kanalo formą. Pasikeitimus greityje judant sekliame vandenyje vertiname diagramų arba išskaičiuojame empiriškai naudojant greičio pataisą, kuri vadinama efektyviu greičiu ir priklauso nuo vidutinio panardinimo  $Z_v$  (Venckus T., 2010, 26p.).

$$V_E = \sqrt{\frac{V^2 + 2gz_v}{1 - \frac{Z_v}{h}}} = V \sqrt{\frac{1 + \frac{2gz_v}{V^2}}{1 + \frac{Z_v}{h}}}, \quad (1.2.2)$$

čia  $V$  – laivo greitis, m/s;

$Z_v$  – vidutinis panardinimo gylis, m;

$h$  – vandens gylis, m;

$g$  – laisvojo kritimo pagreitis, m/s.

Formulė įvertina riboto vandens gylio, bei pasienio sluoksnio sukeliama neigiamą efektą eigumui. Vandens deformacija tiesiogiai priklauso nuo vidutinio laivo panardinimo  $Z_v$ . Panaudojant Bernulio lygtį galima įvertinti šių efektų įtaką laivo greičiui.

$$V_B = \sqrt{V^2 + 2gz_v}, \quad (1.2.3)$$

čia  $V$  – laivo greitis giliame vandenyje, m/s;

$g$  – laisvojo kritimo pagreitis, m/s;

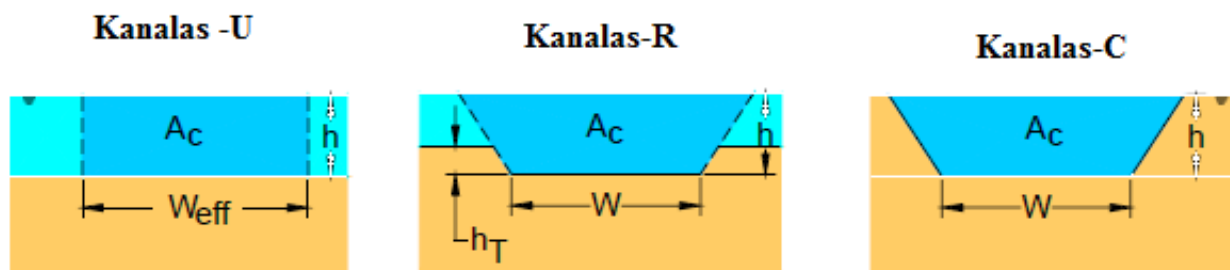
$z_v$  – vidutinis panardinimo gylis, m.

Srauto greičio  $V_B$  išraiška pateikta (1.2.3), įvertinanti vandens klampumą (Djačkov V., ir kt., 2009, 170-172 p.). T.Jiang 2001 m. atlikti bandymai tipiniams seklių vandens laivų modeliams teigė: visas laivo pasipriešinimas laivui judančiam sekliame vandenyje, kurio Frūdo  $Fr \leq 0,7$  skaičius ir santykinis gylis  $h/d \geq 1.5$  gali būti išreikštas, kaip efektyvinio laivo greičio funkcija, priklausomai nuo vandens gylio.

Siurbimo efektas gali būti vertinamas empiriniais arba analitiniais metodais, tikro laivo bandymais arba panaudojant SSD programas (skaičiuojamosios skysčių dinamikos). Siurbimo efektui skaičiuoti yra naudojama daug formulių. Jei naudojame įprastinius teoriniais metodais paremtus skaičiavimus, kuriuos savo knygoje aprašė Tuck ir Taylor (1970 m.), susiduriame su

sunkumais, kai reikalinga patikrinti naujų korpuso formų efektyvumą. Tačiau dažniausiai praktikoje naudojama metodika yra empiriniais metodais paremti skaičiavimai, kuriuos aprašo Eryuzlu ir Hausser (1978 m.). Šie skaičiavimai atlikti įvairių tipų kanaluose išsiskiria tuo, jog yra vertinamas laivų turinčių laivapriekinį gumbą prisiurbimo efektas.

Atliekant skaičiavimus labai svarbu įvertinti kanalo formą. Daugumoje skaičiavimų vyrauja trys pagrindinės kanalų formos schematiškai atvaizduotos 4 pav.



4 pav. Laivybos kanalų formos

Šaltinis (Briggs M. J., 2006, 5p.)

*Laivybos kanalas U* – tai neapibrėžtos formos dažniausiai atviras vandens telkinys (tokios kaip Kuršių marios ir panašūs telkiniai) užsibaigiantis ar pereinantis į kitos formos kanalą. Daugumos kanalų negalima apibrėžti tik viena forma, paprastai kanale vyrauja keletas formų. *R* tipo kanale – vykdoma laivyba tik tose kanalo dalyse, kur atlikti gilavimo darbai, todėl laivo dugną veikia ir išgilinto kanalo šoninės dalys. *C* tipo kanalai – tai upės ar dirbtiniai vandens keliai. Vienas iš garsiausių tokio tipo kanalų yra Panamos kanalas. Svarbesni kanalo parametrai yra šie – kanalo plotis jo dugne  $W$  (neapibrėžto dydžio kanalams kanalo plotis vertinamas kaip laivo plotis), vandens gylis –  $h$ , vandens pilnumo koeficientas  $C_{WP}$ , kuris apskaičiuojamas pagal Barrass 1979 m. formulę:

$$W_{eff} = C_{eff} \cdot B = 7.7 + 45(1 - C_{WP})^2 B \quad (1.2.4)$$

Pasinaudojus Barrass formule galima rasti atstumą tarp kanalo dugno ir laivapriekio  $S_{bB}$ . Šis metodas remiasi natūriniais bandymais (Venckus T., 2010, 5p.)

$$S_{bB} = \left( \frac{1}{30} \right) \cdot C_b \cdot ((S_2)^{\frac{2}{3}}) \cdot V^{2.08} \quad (1.2.5)$$

čia  $C_b$  – vandentalpos pilnumo koeficientas;

$S_2$  – kanalo ploto ir laivo midelio ploto santykinis dydis, m;

$V$  – laivo greitis, mazgais.

Metodika įvertinanti laivo pritraukimą prie dugno daugiausiai paremta laboratoriniais bandymais, ši metodika naudojama neribotuose bei ribotuose kanaluose (Jacek J., 2008, 28 p.).

$$S_b = 0,298 \frac{h^2}{T} \left( \frac{V_s}{\sqrt{gT}} \right)^{2,289} \cdot \left( \frac{h}{T} \right)^{-2,972} \cdot K_b \quad (1.2.6)$$

čia  $V_s$  – laivo greitis, mazgais;

$h$  – grimzlė, m;

$T$  – vandens gylis kanale, m.

$K_b$  įvertinimui reikalingi papildomi skaičiavimai:

$$K_b = \left\{ \begin{array}{l} \frac{3,1}{\sqrt{W/B}}, \frac{W}{B} < 9,61 \\ 1, \frac{W}{B} \geq 9,61 \end{array} \right\} \quad (1.2.7)$$

čia  $W$  – kanalo plotis, m;

$B$  – laivo grimzlė, m.

Vienas iš naujesnių skaičiavimo metodų buvo pateiktas japono Yoshimura 1986 m. Ši formulė buvo išvesta kaip standartas japonų laivyno keltams. Skaičiavimai buvo patvirtinti 2006 m. japonų instituto OCADIJ. Jie skirti R ir C tipų kanalams.

$$S_b = \left[ \left( 0,7 + \frac{1,5T}{h} \right) \left( \frac{BC_B}{L_{pp}} \right) + \frac{15T}{h} \left( \frac{BC_B}{L_{pp}} \right)^3 \right] \frac{V_e^2}{g} \quad (1.2.8)$$

čia  $B$  – laivo grimzlė, m;

$T$  – vandens gylis kanale, m;

$L_{pp}$  – laivo ilgis tarp statmenų, m;

$C_B$  – vandentalpos pilnumo koeficientas;

$h$  – grimzlė, m;

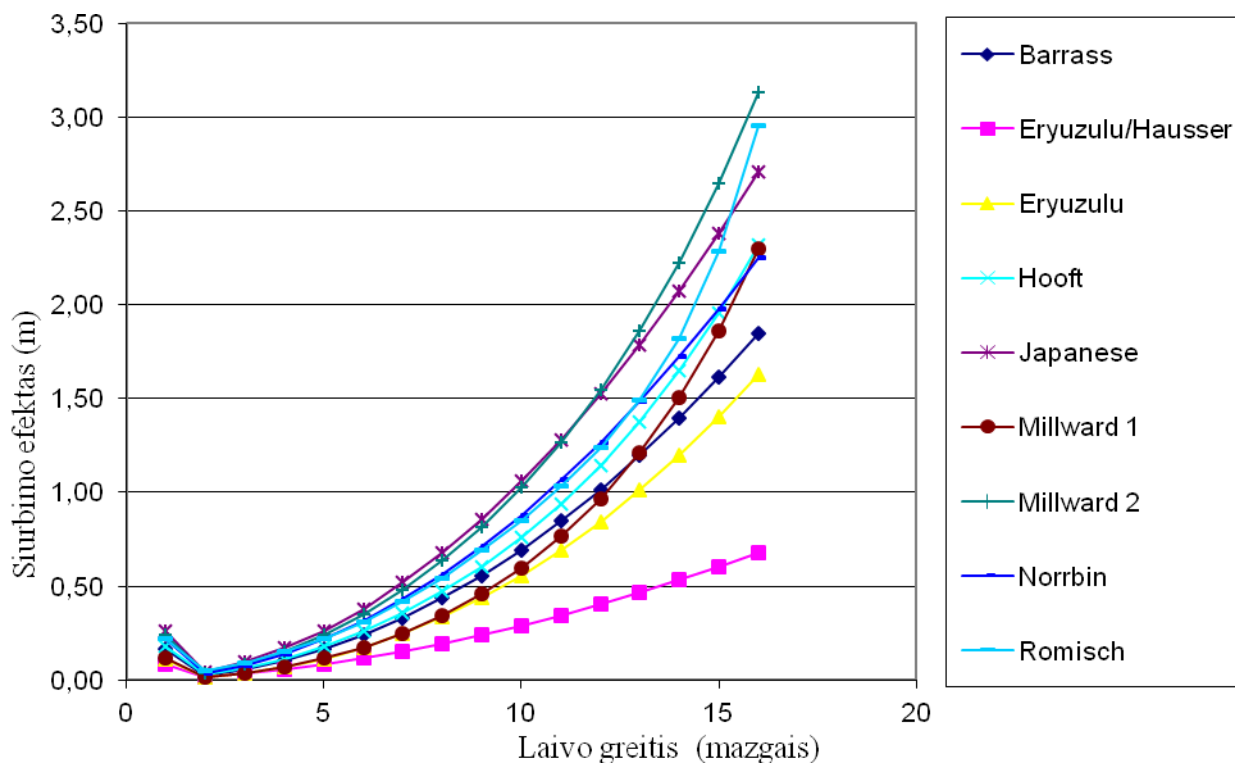
$V_e$  – laivo greičio sąlyga C tipo kanalams.

$$V_e = \frac{V_s}{(1-S)} C \quad (1.2.9)$$

čia  $C$  – kanalo forma;

$V_s$  – laivo greitis, mazgais.

Dažniausiai naudojamų formulių skaičiavimo skirtumus galime matyti pateiktame 5 paveiksle, skaičiavimai atlikti su 46563 tonų vandentalpos laivu. To paties laivo skaičiavimai skirtingais metodais duoda skirtingas reikšmes.

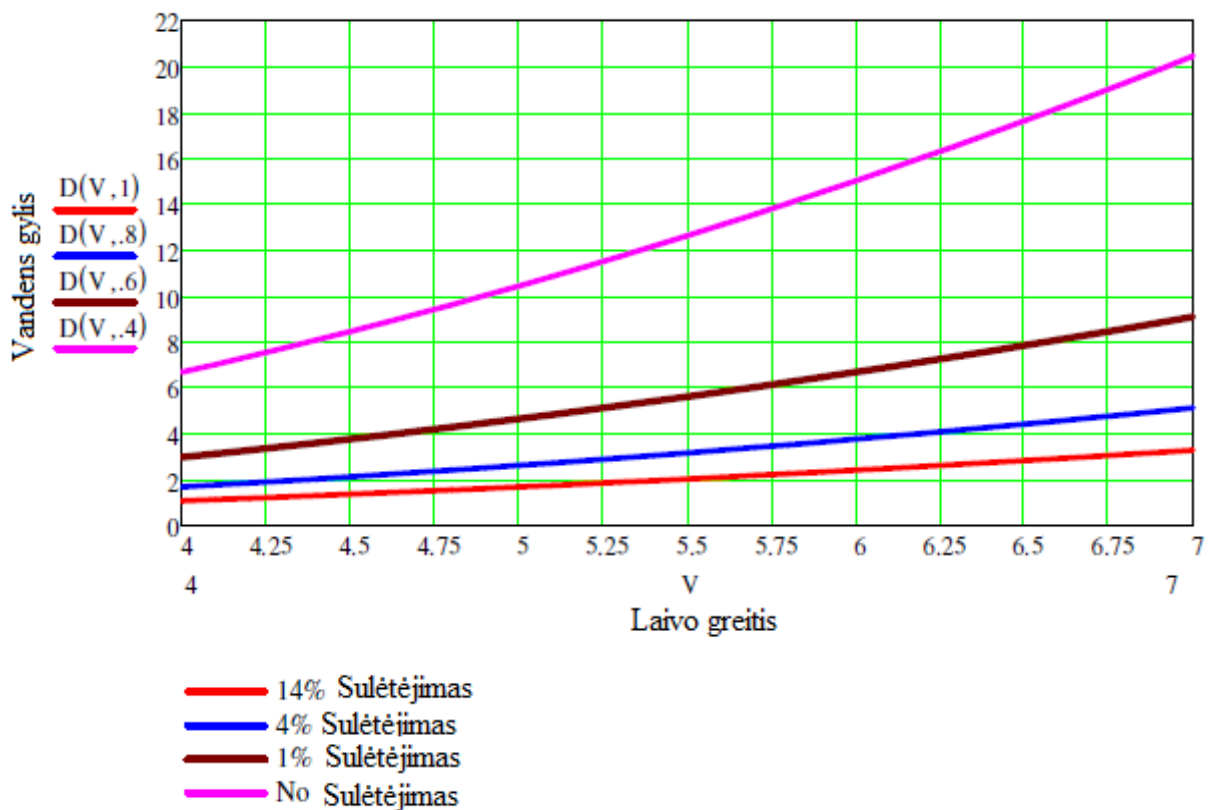


5 pav. Siurbimo efekto priklausomybė nuo greičio taikant skirtingas skaičiavimo metodikas  
Šaltinis (Velde M., 2010, 30 p.)

5 pav. pateikiamas siurbimo efekto grafinis atvaizdavimas skirtingomis skaičiavimo metodikomis. Taigi skaičiuojant prisiurbimo efektą būtina tiksliai įvertinti visas aplinkybes, kad būtų galima kuo tiksliau pasirinkti skaičiavimo metodika.

### 1.3. Šių reiškinų įtaka laivui, jų mažinimo galimybės

Siurbimo efekto mažinimas gali būti atliekamas keliais būdais. Pirmasis būdas – tai laivo greičio mažinimas. Greičio įtaką siurbimo efekto dydžio vertei galima matyti iš siurbimo efekto priklausomybės nuo greičio grafiko (6 pav.). Laivo greitis yra vienas svarbiausių parametrų nuo kurio priklauso siurbimo ir kitų efektų sukeliama įtaka laivui. Tačiau laivo greičio mažinimas nėra pats efektyviausias problemos sprendimo būdas, nes tokiu atveju laivas tampa per daug lėtas, o dėl to nukenčia laivų, kaip transporto rūšies konkurencingumas. Antrasis būdas – tai kanalo, kuriuo vyksta laivyba, parametrų didinimas. Tačiau tai gali būti itin sudėtinga arba neįmanoma dėl įvairių priežasčių, tokių kaip – upių sunešamų sankauptų, geografinės teritorijų padėties, gilimo bei platinimo kainos ar kt. Todėl labai svarbu šiuos efektus įvertinti dar ankstyvoje laivo projektavimo fazėje. Tokiu atveju vienas iš sprendimo būdų galėtų būti laivapriekinio gumbo panaudojimas.



6 pav. Siurbimo efekto priklausomybė nuo greičio

Šaltinis (Granowitz L., 2012, 2p.)

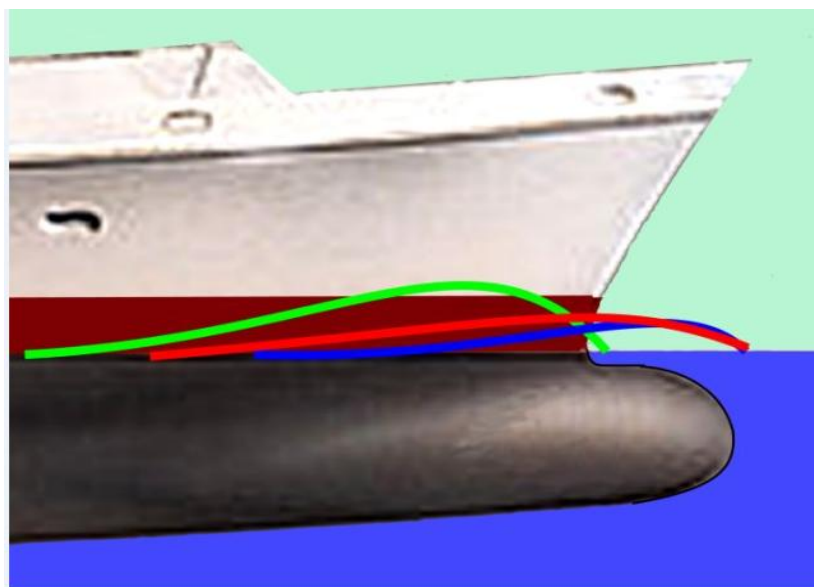
Laivapriekinio gumbo istorija prasidėjo dar gilioje senovėje. Laivapriekinį gumbą naudojo jau nuo Egipto Senosios Karalystės laikų, tačiau tada jis buvo naudojamas labiau kaip taranas (tokio tipo laivai buvo vadinami galeromis). Šiuolaikinio laivapriekinio gumbo vystymo pradininku galima laikyti D.W.Taylor. Jis dar 1910m. laive „Delaware” pirmasis panaudojo laivapriekinį gumbą, kad sumažintų laivo pasipriešinimą bei pagerintų daugelį kitų laivo charakteristikų. Jau nuo 1960 m. laivapriekiniai gumbai (tuo metu dar visiškai nauja technologija) pradėta plačiai taikyti dideliems komerciniams laivams. Pavyzdžiui, Inui suprojektuotas laivapriekinis gumbas sumažindavo apie 5% kuro sąnaudų judant kruiziniu greičiu. Eksploatuojant laivą įvairiais greičiais, išsikišusi gumbo forma veikia laivapriekyje susidarancias bangas, taip sudarydama bangų sistemą, kuri interferuodama su laivinėmis bangomis sumažina bangavimo ir formos pasipriešinimą (Čerka J., 2005, 12p.).

#### 1.4. Laivapriekinis gumbas

Vieni pirmųjų laivapriekinio gumbo įtaką laivui pradėjo tirti W.G.S. Wigley, G. Weinblum, T. Inui. Wigley vienas iš pirmųjų aprašė laivapriekinio gumbo savybes ir teigė, kad laivapriekinio gumbo naudingumas yra intervale nuo  $0.238 \leq F_n \leq 0.563$ . Tačiau tuo metu dar nebuvo patikimų skaičiavimo metodikų parenkant laivapriekinius gumbus. Dėl šios priežasties

teorija neatnešė lauktų rezultatų. Tačiau situacija pasikeitė, kai M. Kracht sudarė skaičiavimų metodiką, dėl kurios buvo galima įvertinti tokio laivapriekio parametrus, spręsti apie pasipriešinimą laivo eigumui, tinkamą variklio galios ir laivapriekinio gumbo formos parinkimą (Kracht A., 1978, 3p.).

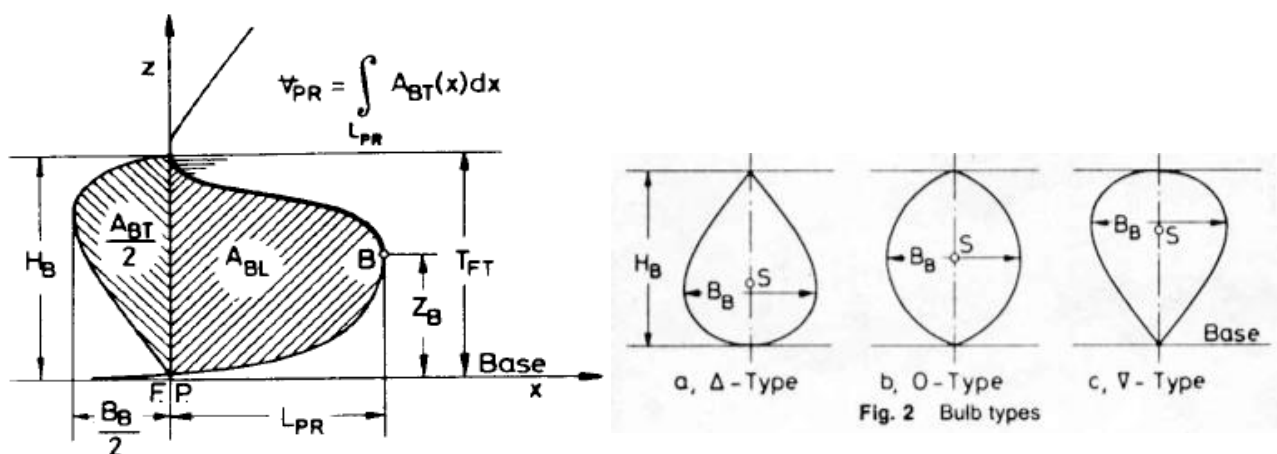
Laivapriekinio gumbo ilgis apsprendžia bangos interferencijos fazę ir bangos ilgį, banga sukeliama laivapriekyje ir keliauja išilgai palei laivo korpusą bei interferuoja su likusiomis bangomis, o bangos dydis priklauso nuo laivapriekinio gumbo pločio. Laivapriekinis gumbas interferuoja šias bangas, priklausomai nuo gumbo keičiasi vaterlinijos vandens atakos kampas. t.y panaudojant gumbą galima sumažinti bangų sukeltą pasipriešinimą. (žr. 7 pav.).



7 pav. Laivo sukeliama banga

Šaltinis (Weddell. M, 2010)

Žaliai pažymėta banga – tai laivapriekio be laivapriekinio gumbo sukelta banga. Mėlynos spalvos banga atspindi laivapriekio su gumbu bangos dydį. Raudona linija žymi suminį abiejų bangų didumą. Galime daryti išvadą, kad naudojant laivapriekinį gumbą laivo banga bus mažesnė, o tai duos mažesnę pasipriešinimą. Šiam pasipriešinimui rasti visų pirma reikia įvertinti laivapriekinio gumbo parametrus (žr. 8 pav.).



8 pav. Gumbo parametrai

Šaltinis (Kracht A., 1978., 2-3p.)

Šie parametrai skirstomi į dvi pagrindines grupes – linijinius ir nelineinius. Linijinių koeficientų apskaičiavimui, naudojamos šios formulės:

Pločio koeficientas apskaičiuojamas (žr. 8 pav.) -

$$C_{bb} = \frac{B_B}{B_{MS}} \quad (1.4.1)$$

$C_{bb}$  – pločio koeficientas;

$B_{MS}$  - gumbo plotis, m.

Ilgio koeficientas apskaičiuojamas (žr. 8 pav.) -

$$C_{LPR} = \frac{L_{PR}}{L_{PP}} \quad (1.4.2)$$

$C_{LPR}$  – Ilgio koeficientas;

$C_{PR}$  - išsikišančio gumbo ilgis, m;

$L_{PP}$  - laivo ilgis, m;

Aukščio koeficientas apskaičiuojamas (žr. 8 pav.) -

$$C_{ZB} = \frac{Z_B}{T_{FP}} \quad (1.4.3)$$

$C_{ZB}$  – aukščio koeficientas;

$Z_B$  - gumbo priekinio taško aukštis, m;

$T_{FP}$  - gumbo aukštis, m;

1 lentelė. Tipinės linijinių gumbo parametrų reikšmės

	MIN	MAX
$C_{BB}$	0.170	0.200
$C_{LPR}$	0.018	0.031
$C_{ZB}$	0.260	0.550

Šaltinis (Ventura E., 2010, 13 p.)

Nelinijinių koeficientų apskaičiavimui, naudojamos šios formulės:

Gumbo ploto koeficientas apskaičiuojamas (žr. 8 pav.) -

$$C_{ABT} = \frac{A_{BT}}{A_{MS}} \quad (1.4.4)$$

čia  $C_{ABT}$  – santykinis gumbo plotas,  $m^2$ ;

$A_{BT}$  - gumbo plotas,  $m^2$ ;

$A_{MS}$  - midelinio španhauto plotas,  $m^2$ .

Išilginio ploto koeficientas apskaičiuojamas (žr. 8 pav.) -

$$A_{ABL} = \frac{A_{BT}}{A_{MS}} \quad (1.4.5)$$

čia  $A_{ABL}$  – santykinis išilginis plotas,  $m^2$ ;

$A_{BT}$  - vaterlinijos plotas,  $m^2$ .

Santykinio tūrio koeficientas apskaičiuojamas (žr. 8 pav.) -

$$C_{VPR} = \frac{\nabla_{PR}}{\nabla_{WL}} \quad (1.4.6)$$

čia  $C_{VPR}$  – santykinis gumbo tūris,  $m^3$ ;

$\nabla_{PR}$  - gumbo tūris,  $m^3$ ;

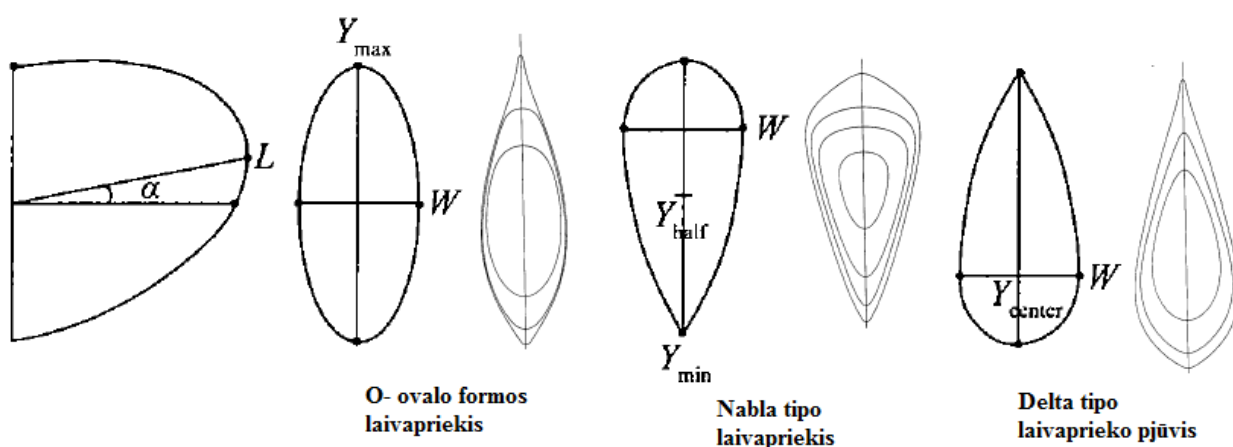
$\nabla_{WL}$  - laivo tūrinė vandentalpa,  $m^3$

2 lentelė. Tipinės nelinijinių gumbo parametrų reikšmės

	MIN	MAX
$C_{ABT}$	0.064	0.122
$C_{ABL}$	0.068	0.146
$C_{VPR}$	0.0011	0.00272

Šaltinis (Ventura E., 2010, 13 p.)

Skirtingos laivapriekio formos naudojamos skirtingomis eksploataavimo sąlygomis, todėl ne visos įprastinio tipo laivapriekio formos tinka bet kokios modifikacijos laivui. Vis didėjantys laivų gabaritai bei griežtėjantys laivų eksploatacijos apribojimai įpareigoja ieškoti naujų sprendimo būdų laivapriekio formai pagerinti.



9 pav. Laivapriekių tipai ir jų dizaino parametrai

Šaltinis (Ventura E., 2010, 14 p.)

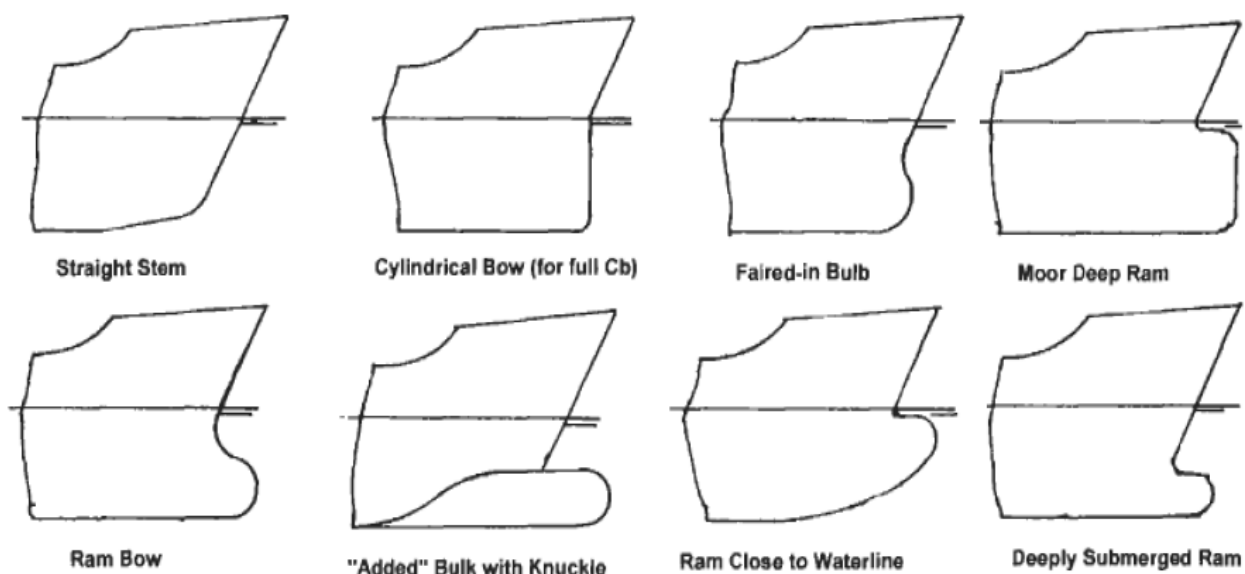
Kracht (1978 m.) suskirstė laivapriekių formas į tris pagrindines – tai Ovalo, Nablo ir Delta tipo, kurių skersiniai pjūviai pavaizduoti 9 pav. Čia –  $L$  atsikišusios dalies ilgis,  $Y_{max}$  maksimalus laivapriekinio gumbo aukštis,  $W$  – laivapriekinio gumbo plotis,  $Y_{center}$  ir  $Y_{half}$  apibrėžia laivapriekio formą, o  $\alpha$  apibrėžia išilginį laivapriekinio gumbo profilį. Projektuojant laivus paprastai naudojama keletas nusistovėjusių laivapriekio formų.

Ovalo formos laivapriekis tinkamiausias suspaustos formos laivams, tačiau tinka ir U bei V korpuso tipo laivams. Ovalo formos laivapriekis tinkamas montuoti laivuose turinčiuose sonarus. Šio tipo laivapriekius reikėtų naudoti laivams skirtiems dirbti stipraus bangavimo sektoriuose.

Nablo tipo laivapriekiai lengvai montuojami ant V tipo laivo korpuso. Dažniausiai montuojami laivams su tiksliai apskaičiuotais  $C_w$  ir balastinių vandenių parametrais. Visiškai panardinto Nablo tipo laivapriekio bangų slopinimo poveikis yra ganėtinai aukštas.

Delta tipo laivapriekiai naudojami laivams su didele grimzle, U korpuso tipo laivams. Nors didėjant grimzlei laivapriekio formos efektas mažėja, tačiau banguotose jūrose atsitrenkimo poveikis (slamming effect) mažėja (Kracht A ir kt., 1978, 200p.).

Galime išskirti keletą laivapriekio formų, pateiktų 10 pav.

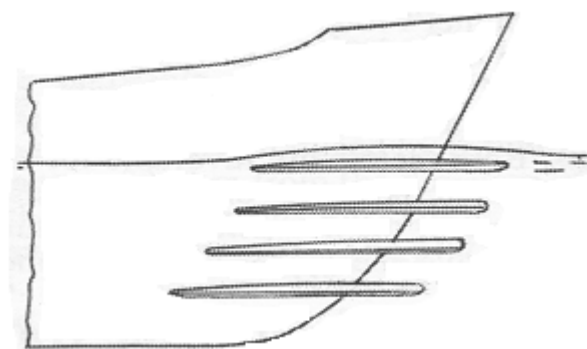


10 pav. Tipinės laivapriekių formos

Šaltinis (Ventura E., 2010, 10p.)

Tačiau laivams eksploatuojamiems daugiau sekliuose vandenyse reikia kitokių laivapriekio formų arba korpuso formos pakitimų norit išvengti siurbimo efekto. Tokios formos sumažina pasipriešinimą eigumui ir padidina propulsinio komplekso efektyvumą.

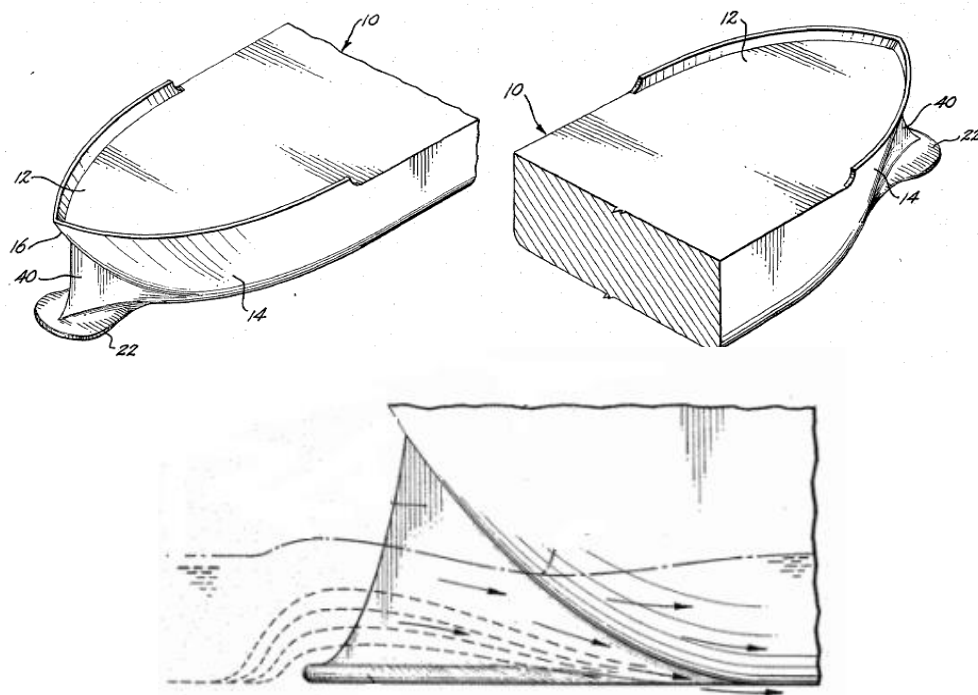
Viena tokių laivapriekio formų Japonijoje 1975m. užpatentuota Fuji Takahaci. (žr. 11 pav.).



11 pav. Laivo sparnai

Šaltinis (Venckus T., 2010, 14 p.)

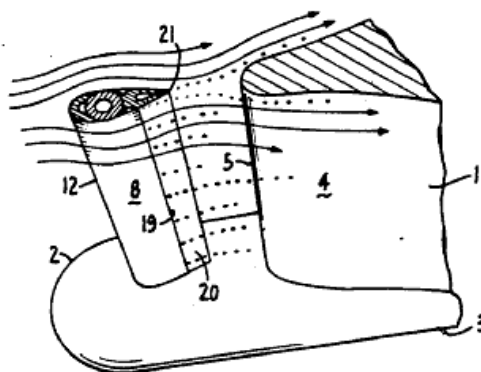
Šis netradicinės formos laivapriekis remiasi keliančių kūnų – sparnų montavimu laivapriekinėje, midelinėje ir laivagalinėje dalyje. Bangavimo pasipriešinimui sumažinti išradėjas pasiūlė kompleksą povandeninių sparnų, kurie yra lygiagretūs vandens paviršiui. Tokie sparnai keičia laivo bangos profilį sumažindami bangavimo pasipriešinimą.



12 pav. Laivapriekinė plokštė

Šaltinis (JAV patentas, 4,003,325 B2 1977m. 12p.)

Rudolph A. Allen 1975 metais pasiūlytas išradimas 12 pav. skirtas krovininiams laivams plaukiojantiems sekliuose vandenyse, paprastai baržoms. Toks laivapriekis sukuria laminarinį tekėjimą aplink plokštelę laivapriekyje. Laivapriekinė plokštė sudaro 1/3 laivo pločio, toks sprendimas gali būti pritaikytas jau esamiems laivo korpusams. Palyginti su įprastiniais laivapriekiniais gumbais toks laivapriekis nereikalautų daug papildomų investicijų.



13 pav. Laivapriekinis sparnas

Šaltinis (JAV patentas, 07/284,805B2 2007m. 12p.)

Laivapriekinis sparnas pateiktas 13 pav. Šis patentas įregistruotas 1988 m. Ulf H stanford, san. Tokio tipo laivapriekis mažina turbulenciją, sudaro mažesnę korpuso pasipriešinimą, taip pat gerina laivo korpuso aptakumą. Įstatytas sparno formos apvadas laivapriekyje taip pat didina laivo valdomumą.

Visi aprašyti įrenginiai skirti bangavimo pasipriešinimui sumažinti jau patikrinti praktikoje, tačiau nėra plačiai taikomi kaip standartiniai laivapriekiniai gumbai.

### 1.5. SSD- skaičiuojamųjų skysčių dinamikos įvertinimo metodai

Skaičiuojamoji skysčių dinamika duoda kiekybines ir kokybines skysčio elgsenos variacijas. SSD atveria galimybes atlikti begales eksperimentų virtualioje skysčių aplinkoje. Vandens turbulencijos eksperimentas pateiktas 14 pav. Kairiajame paveiksle realaus skysčio tekėjimas, o dešiniajame SSD.



14 pav. Vandens turbulencija

Šaltinis (Orrego S., 2009.)

Modeliniai bandymai ir toliau išliks labai svarbūs nustatinėjant pasipriešinimo bei kitas jėgas, tačiau SSD smarkiai sumažina modeliųjų bandymų kainą, nes nebereikia atlikti tiek daug eksperimentų. SSD – neseniai pripažinimą gavęs, kaip skaičiavimo ir analizės metodas galutinėse dizaino stadijose. SSD – skaičiuojamoji skysčių dinamika (angl. CFD – computational fluid dynamics) yra paremta pagrindinėmis skysčių dinamikos lygtimis – tolydumo (continuity), judesio kiekio (momentum) ir energijos lygtimis. Šios lygtys yra trijų pagrindinių fizikos principų, kuriais paremta visa skysčių dinamika, matematinė formuluotė:

1. Masės tvermė;
2. Niutono antrasis dėsnis  $F = ma$  ;
3. Energijos tvermė.

Skysčių dinamika arba hidrodinamika (gr. dynamis – reiškia jėgos) – tai skysčių mechanikos (hidraulikos) šaka, kurioje nagrinėjamas skysčio judėjimas, įvertinant jį veikiančias jėgas (Grigaliūnaitė-Vonševičienė G., 2012, 41 p.). SSD – tai ekonomiškasis skaičiavimo ir vertinimo metodas, palyginti su eksperimentiniais metodais, SSD leidžia inžinieriams įvertinti būsimo laivo charakteristikas, skysčio parametrus aplink korpusą, ko neįmanoma padaryti modeliniais bandymais. SSD sparčiai pradėjo vystytis nuo 1980 m., kai pradėjo vykti tarptautiniai susitikimai ir konferencijos. Taip per keliolika metų atsirado daugiau SSD kodų, kurie integrovosi į universitetų programas, laivų statyklos ir tapo plačiai naudojami.

Mokslininkai Feldtmann ir Garner 2001 m. naudodami SSD tyrė bangų sistemų susidarymą, jie lygino gilių ir seklių vandenų bangų formas. Mokslininkai įrodė, kad laivinės

bangos laivui judant sekliame vandenyje yra intensyvesnės ir sklaidesnės, todėl laivas sukelia papildomą pasipriešinimą eigumui. Tai įrodo, kad sekliame vandenyje sunaudojama daugiau propulsinės galios, lyginant su gilaus vandens parametrais.

Pagrindiniai fizikiniai principai yra pritaikomi tėkmės modeliui, ko pasekmėje gaunamos matematinės lygčių išraiškos, charakterizuojančios minėtus principus – tolydumo, judesio kiekio ir energijos lygtys. Kiekvienas skirtingas tėkmės modelis tiesiogiai duoda skirtingą pagrindinių lygčių matematinę išraišką, kai kurios pusiausvyros formoje, kai kurios ne. Po to, kai gautos pagrindinės lygtys, išvedamos specifinės jų formos tinkamos SSD sprendiniams. Galiausiai išvedamos fizikinės ribinės sąlygos ir jų tinkamos matematinės išraiškos. Pagrindinės lygtys turi būti sprendžiamos ribinių sąlygų atžvilgiu. Fizikinis ribinių sąlygų aspektas yra fundamentaliai nepriklausomas nuo lygčių formų, tačiau tinkama skaitmeninė fizikinių ribinių sąlygų forma priklauso nuo tam tikros pagrindinių lygčių matematinės formos (Wilson S., 2005, 2p.). SSD sprendžia lygčių modelius, kuriuose skysčio tekėjimas, mūsų atveju vyksta aplink laivo korpusą.

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1.5.1)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\text{Re}} \frac{\partial^2 U_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \overline{u_i u_j} \quad (1.5.2)$$

Kur  $U_i = (U, V, W)$  Reinoldso vidutinio greičio komponentai  $x_i = (x, y, z)$  nepriklausomo koordinačių sistemos kryptys  $p = \left[ (p - p_\infty) / \rho U_0^2 + z / Fr^2 \right]$  yra pjezometrinis slėgio koeficientas  $\overline{u_i u_j}$  Reinoldso stresas, kuris turi koreliacija dviem taškais su turbulenciniais svyravimais  $u_i$ ,  $Fr = U_0 / \sqrt{gL}$  Frudo skaičius ir  $\text{Re} = U_0 L / \nu$  Reinoldso skaičius. Visos lygtys yra bedimensės nurodant greičio  $U_0$ , ilgį  $L$ , skysčių klampumu  $\nu$  ir tankiu  $\rho$ . (Wilson S., 2005, 81p.).

SSD – tai skaičiavimų įrankis darantis vis didesnę įtaką analizavimo srityje. Besivystanti kompiuterių technologija spartina analizavimą, projektavimą, optimizaciją. Naudojant SSD programinius paketus tapo įmanoma itin detalai nustatyti ir vizualiai pateikti vandens tėkmę aplink laivą ir jo elementus bei jų sąveiką su bangomis. Šios programos naudojamos tiek grynai teoriniam, tiek ir eksperimentiniam hidrodinamikos problemų nagrinėjimui, o atsižvelgiant į vis augančią eksperimentinių tyrimų kainą ir plačias nuolat pingančios ir sparčiai besivystančios kompiuterinės technikos galimybes, SSD programų pritaikomumas ir svarba yra akivaizdūs.

SSD stipriai pakeitė visą laivų projektavimo ir testavimo procedūrą. Pirmiausia laivai projektuojami specialiomis CAD programomis, po to jų skaitmeniniai modeliai perkeliama į SSD programinius paketus. Šitaip galima sparčiai tobulinti korpuso pavidalą, išvengiant brangių ir ilgai

trunkančių eksperimentų su modeliais. Eksperimentas tokiu būdu naudojamas tik tiksliai laivo savybių patikrinimui realiomis sąlygomis (Beneš P., 2011. 5p. ).

### **1.6. ITTC rekomendacijos modeliniams pasipriešinimo testams atlikti**

ITTC tai visame pasaulyje nepriklausomai veikianti asociacija vienijanti hidrodinamikos mokslinių tyrimų organizacijų veiklą vilkimo tūriuose arba panašiuose modeliniuose testuose, kurie buvo atlikti laboratorijose. Prie ITTC yra prisijungę dizaineriai, statybininkai ir laivavedžiai patardami, kurie teikia informaciją apie eksploatacines savybes, saugos poveikį, poveikį aplinkai, laivams ir jūrų įrenginiams. ITTC pasipriešinimo testas ir jo atlikimo eiga bandymų baseine pateikiama 7.5-02 -02-01. procedūroje.

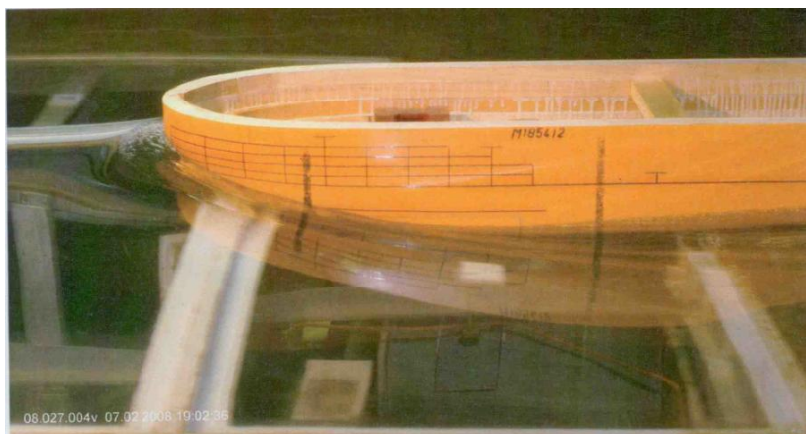
Paprastai pasipriešinimo testas atliekamas norint gauti laivo korpuso pasipriešinimo reikšmes esant skirtingiems užduoties greičiams. Šiam tikslui pasiekti atliekami modeliniai bandymai. Atliekant laivo modelinius bandymus yra matuojamas netik pasipriešinimas bet ir diferentas į laivapriekį ar laivagalį. Pasipriešinimo dydis aprašomas reikalinga galia tempti laivui. Testas atliekamas nusistovėjusiam vandenyje. Laivo modelinis bandymas turėtų būti pagamintas pagal ITTC 7.5-01-01-01 procedūrą.

Priklausomai nuo bandymų baseino parametrų rekomenduojama, kad laivo modelis būtų kiek įmanoma didesnis, kad tinkamai įvertinti visas laivo korpuso sukeltas jėgas. Laivų modeliai turėtų būti testuojami pagal vieną ar abi šias sąlygas:

Atliekamas laivo modelio pasipriešimo testas, kai laivas yra įprastinės formos. Laivo sraigčiai turėtų būti įskaičiuoti į pasipriešinimo bandymo rezultatus.

Antrąją sąlygą laivo modelis testuojamas su visais priedais išsikišančiomis detalėmis ir t.t., kad įvertinti padidėjusį laivo pasipriešinimo koeficientą nuo priedų. Visi laivo korpuso priedai, kurie skaitomi kaip varomieji turėtų būti sumontuoti ant korpuso. Judančios dalys ar kontroliuojami paviršiai neturėtų būti naudojami teste, laivo šoninis kylis neturėtų būti ant laivo modelio jai tikėtina, kad nuo to pasipriešinimas bus mažesnis.

Visi testuojami laivų modeliai turėtų būti pagaminti pagal ITTC 7.5-01-01-01 procedūros rekomendacijas. Modelio gamybos paklaida turėtų būti nedidesnė kaip  $\pm 0.2\%$



15 pav. Tiriama laivo modelis bandymu baseine 4,72 m/s

Šaltinis (Modelinių testų bandymas Duisburgo baseinas 2008m., 14p.)

Laivo modelis jungiamas prie matavimo prietaiso matuoti laivo pasipriešinimui. Toks įtaisas matuoja tik išilgai laivą veikiančias jėgas. Buksyruojamas laivo modelis spec. įtaisų pagalba išlaikomas stabilus, kad nesvyruotų į šonus. Atliekant bandymus turi būti užtikrinta, kad prijungti kabeliai nesukelia papildomo apsipriešinimo laivui. Atliekant laivo modelinius bandymus yra matuojamas modelio greitis, visas pasipriešinimas, grimzlės ir vandens temperatūra, visi šie prietaisai turi būti sukalibruoti, eksperimentai negali būti taip greitai pakartojami, nes ITTC reglamentuoja net eksperimento dažnumą. Šie ir dauguma kitų faktorių, tarp kurių neišimtis ir kaina, veda prie kompiuterinių bandymų ir jų atlikimo tvarkos.

### 1.7. ITTC rekomendacijos SSD skaičiavimo metodikoms aprašyti

Rekomendacijas pasipriešinimui rasti naudojant SSD ITTC pateikia 7.5 – 03 – 02 – 03 procedūroje. Ši metodika parašyta labiau apibrėžti paviršiams. Procedūra gali naudotis tiek mokslininkai tiriantys laivus SSD skaičiavimo metodikoms, tiek ir kiti asmenys užsiimantys komercinėmis veiklomis.

SSD skaičiavimų procesas paprastai dalijamas į dvi dalis – išankstinio skaičiavimo ir apdorojimo etapą. Išankstinio apdorojimo etapas yra susijęs su tinkamai apibrėžtais problemos tyrimo parametrais. Šio žingsnio metu įvedami nustatymai skaičiavimo kodui apibrėžti, įvedami eksperimento duomenys, tokie kaip skystis, ar tinklelio dydis. Apdorojimo etapui yra priskirtas duomenų pateikimas.

ITTC pateikia rekomendaciją, kad vandens klampumas atliekant tokius bandymus turėtų būti atliktas vandenyje, kurio temperatūra 10-15<sup>0</sup> C. Atstumas iki sienos turėtų būti pagrįstas kūno pasipriešinimu kaip funkcijai nuo Reinoldso skaičiaus.

$$y / L_{pp}, m = y^+ / \sqrt{(C_F / 2)} \quad (1.71)$$

$$C_{FF} = 0,075 / ((\log_{10} Re - 2)^2) \quad (1.72)$$

čia  $y$  - langelio aukštis, m;

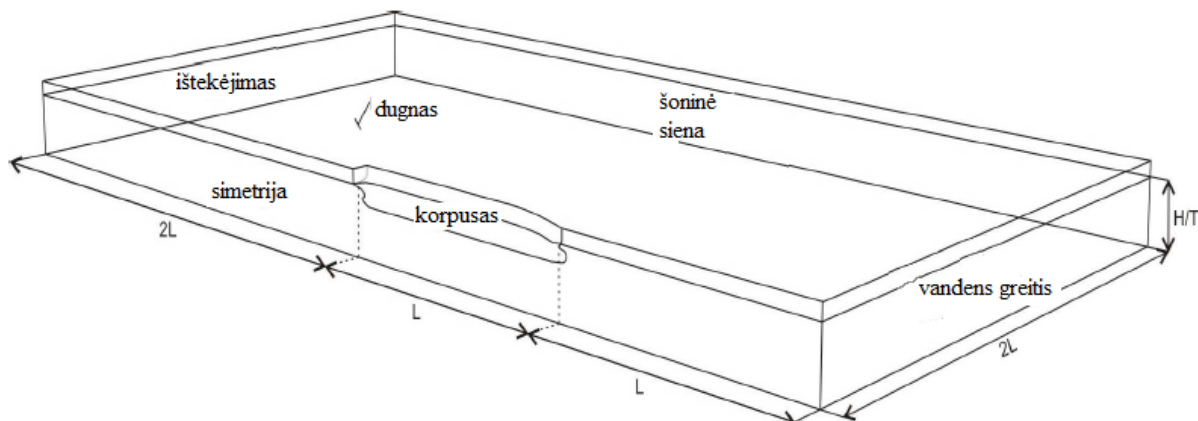
$C_F$  - kūno pasipriešinimo koeficientas;

$Re$  - Reinoldso skaičius.

Pagal ITTC metodikas  $C_F$  turėtų būti apskaičiuojamas įvertinant visa laivo ilgį.

Išankstinio skaičiavimo metodikoje apibrėžiamas ir tinklelis kuriame bus talpinamas laivo modelis. Langeliai kertantys laivą, kurio mastelis paprastai būna 1:1, gali būti 1 metro ilgio 0,5 metro pločio. Ir tik  $10^{-3}$  milimetro aukščio. Tokių parametrų tinklelis bus labai tankus ir reikės atlikti nemažai matematinių skaičiavimų. Tokie aukšti reikalavimai privedė prie sienos funkcijos, laminariniam tekėjimui. Ilgas plokščias nulinio slėgio gradientas gerai žinomas kaip Blasiuso sprendinys. Turbulenciniam tekėjimui toks sprendimas pritaikomas tik vidinėms sienelėms, tačiau tai duoda galimybę išretinti tinklelį. Sienos funkcijos nereikėtų naudoti jai tam yra kitų techninių galimybių.

ITTC rekomendacijose aprašomi ir įvertinami dugno paviršių nelygumai. Šie nelygumai SSD programose gali būti įvertinami dviem būdais. Pirmasis būdas tai sienelės funkcijos pritaikymas tokioms sąlygoms arba įvedant į tinklelį papildomas sąlygas. Tačiau pagrindinis sunkumas norint įvertinti dugno šiurkštumus yra tas, kad neaišku su koku dugno paviršiumi laivas susidurs.



16 pav. Sienose užduodamos eksperimento sąlygos

Šaltinis (Beneš P., 2011, 4p.)

Eksperimento tinklelio sienų grafinis atvaizdavimas pateikiamas 16 pav. Pirmoji siena paveikslėlyje parodyta kaip vandens greitis, tai skysčio aukščio ir greičio uždavimo siena, ji paprastai žymima X maksimumu. Ištekėjimas pavaizduotas kaip ištekėjimo siena, žymima X minimumas, ši siena paprastai projektuojama kaip neįleidžianti skysčio, o tik išleidžianti. Šoninės sienelės Y maksimumas ir Y minimumas paprastai kartu su dugno sieniele turi tokį patį skysčio judėjimo greitį. SSD skaičiavimo programoje turėtų būti apibrėžtas eksperimento laiko intervalas. Bangų sąlygomis atliekamo eksperimento laikas turėtų būti mažiausiai 60 ir 100 jai bangų periodas

yra reguliarus. Laiko intervalas nustatomas priklausomai nuo eksperimento eigos, kol randamas stabilumas.

Išanalizavus esamą padėtį, atliktus tyrimus seklių vandenų srityje galima daryti išvadą, kad seklių vandenų laivapriekių technologija, bei tokių korpuso formų vystymas ir tobulinamas, šiai dienai yra aktualus, tačiau išsamesnių tyrimų atliktų kompiuterinės skysčių dinamikos (SSD) programomis nėra pakankamai. Ne išimtis ir seklaus vandens gumbas, kurio analizė buvo atlikta tik bandymų baseine, ir plačiau aprašyta (Venckus T., 2010m.) literatūros šaltinyje, todėl susiformavo užduotis atlikti kompiuterinius skysčių dinamikos skaičiavimus šiam gumbui ir palyginti su įprastinių skaičiavimų bei modelinių bandymų rezultatais.

## II. TIRIAMOJI DALIS

### 2.1. Tiriamo laivo parametrai

Pirminis taškas, nuo kurio pradama bet kokia navigacinė ar dizaino analizė remiasi tiksliai hidrodinaminių jėgų, susidarantių nuo laivo korpuso judėjimo uždaruose vandens telkiniuose, nustatymu. Tokio tipo analizė turi apimti seklaus vandens horizontalų pasipriešinimą, kanalo asimetriją, dumblėto dugno įtaką, laivo siurbimo efektą laivų tarpusavio sąveikavimą ir t.t. Natūralu, kad atlikti tokio tipo analizei į pagalbą pasitelkiama kompiuterinės skysčių dinamikos modeliavimo programa Flow 3D. Šios programos gauti eksperimento duomenys bus lyginami su egzistuojančiais laboratoriniais tyrimais. Tiriant sekliems vandenims pritaikyto laivapriekio savybes remsimės jau turimais duomenimis iš bandymų baseino įsikūrusio Duisburge (Vokietija), kur buvo atlikti modeliniai bandymai laivams su laivapriekiniu apvadu ir be apvado. Bandymams buvo paimti tipiniai vidaus vandenų laivai skirti gabenti birius krovinius. Laivo charakteristika pateiktos 3 lentelėje.

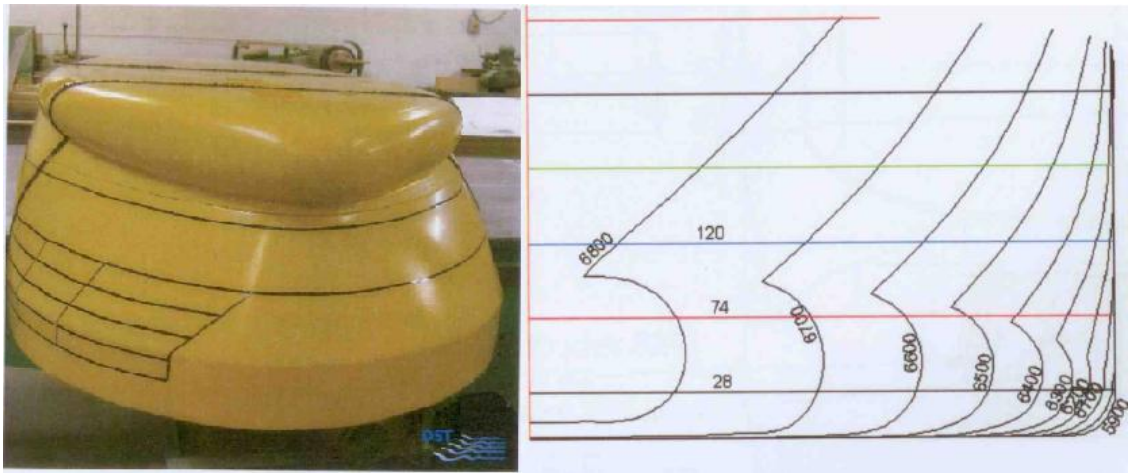
3 lentelė. Bandinių ir natūralaus dydžio laivų charakteristikos

Charakteristikos	Natūralaus dydžio su apvadu
$L_{0A}, m$	110,00
$L_{wl}, m$	109,63
$B, m$	11,40
$d, m$	2,00
$\nabla, m^3$	2172,5
$\delta$	0,84 – 0,88

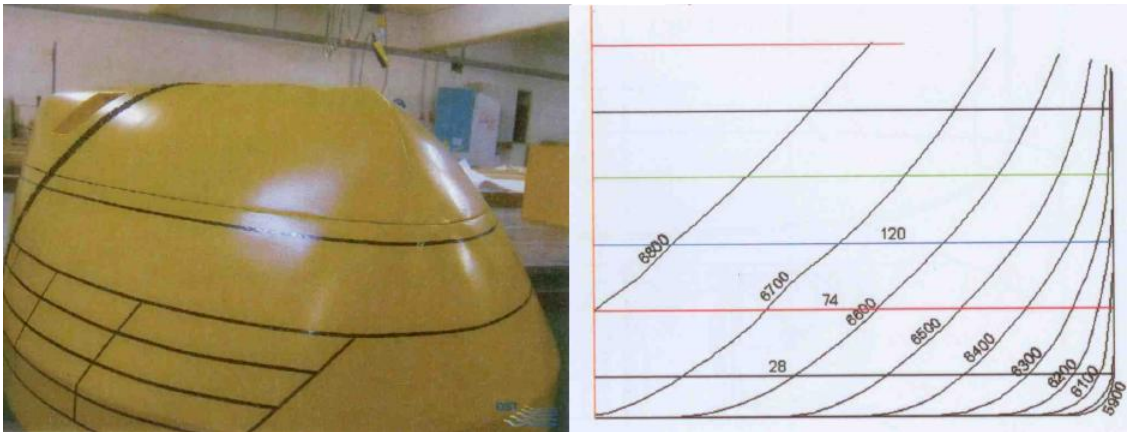
Šaltinis (Reederei J., 2008, 5p.)

Tiriamą laivo pavyzdžiai pateikiami 17/18 pav. Tokio tipo laivai skirti plaukioti sekliuose vandenyse, kur tarp laivo kaip dugno ir vandens telkinio reljefo skirtumas yra mažesnis nei 1m.

Šio laivapriekio principas yra prailginti vaterliniją. Taip sumažinamas visas pasipriešinimas eigumui, nes sumažėja vandens dalelių greitis po plokščiu dugnu, ko pasekoje sumažėja plokščio dugno prisiurbimo efektas. (Metin T.; 2001, 4p.)



17 pav. Seklaus vandens gumbas  
Šaltinis (Reederei J., 2008, 5-21p.)



18 pav. Seklių vandenų laivas su įprastine laivapriekinė forma  
Šaltinis (Reederei J., 2008, 5-21p.)

Laivo pagrindinių matmenų santykiai:

$$\frac{L}{B} = \frac{110}{11,40} = 9,65; \quad (2.2.1)$$

čia L- laivo ilgis, m;

B- laivo plotis, m.

$$\frac{B}{d} = \frac{11,40}{2} = 5,70; \quad (2.2.2)$$

čia B - Laivo plotis, m;

d - Laivo grimzlė, m.

$$\frac{L}{\sqrt[3]{\nabla}} = \frac{110}{\sqrt[3]{2172,5}} = 8,49; \quad (2.2.3)$$

$\nabla$  -laivo vandentalpa, m<sup>3</sup>;

$\delta$  -Vandentalpos pilnumo koeficientas;

$\delta = 0,880$ ;

$\varphi$  - Išilginimo pilnumo koeficientas;

$\varphi = 0,882$ .

## 2.2. Laboratoriniai tyrimai

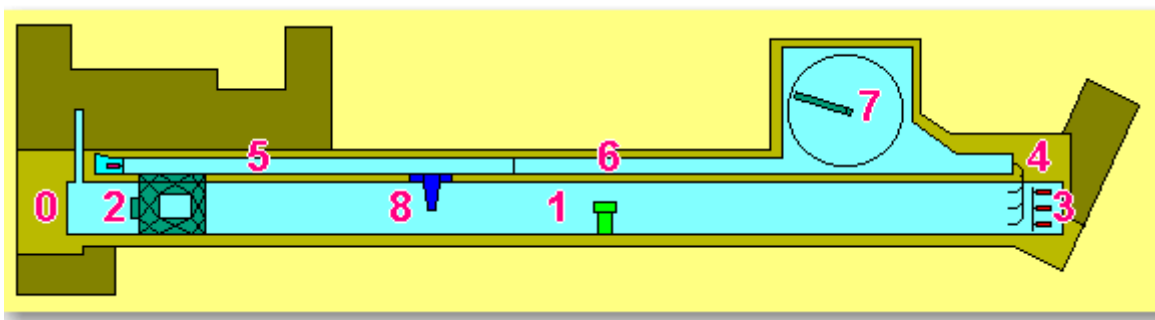
Duisburgo laboratorija atlieka bandymus su sekliems vandenims pritaikytų laivų korpusais, tiria hidrodinamiką aplink laivo korpusą, seklių vandenų laivų navigacines savybes. Duisburgo laboratorija yra sujungta su Laivų technologijos ir transporto sistemų vystymo centru. Vienas šio centro tikslų yra optimizuoti laivų korpuso povandeninę dalį. Specializuoti bandymų baseinai nėra plačiai paplitę. Tokio tipo laboratorijose būna specializuota įranga skirta tik tokio tipo bandymams. Duisburgo laboratorija turi didelį negilaus vandens rezervuarą 190m x 9,8m, kurio maksimalus gylis 1,25m su povandeninio stebėjimo stiklu.



19 pav. Stebėjimo stiklas

Šaltinis (Engelkamp P., 2013)

Baseine yra tempimo karutis galintis testuoti modelius iki 6,5m/s greičiu su suplanuoto greičio mechanizmu. Greitiems glisuojuantiems laivams testuoti iki 15m/s baseine įrengtas specialus greitaeigių laivų karutis. Baseinas turi tris atskirai veikiančias judinamas sienas, bangų generatorius, galinčius kryptingai sukelti reguliarias bangas. Bandymų baseine taip pat yra mažų matmenų gilus vandens rezervuaras 73 metrų ilgio 2 metrų pločio su mažu bangų generatoriumi, čia maksimalus gylis gali būti iki 3m. Shematiniame laboratorijos vaizde 6 numeriu pažymėtas negilus mažagabaritinis seklius rezervuaras 53 metrų ilgio 3 metrų pločio ir iki 1,25 m gylio. Patalpose yra ir manevravimo baseinas, šioje baseino dalyje yra mechanizmas galintis plukdyti modelį ratu. Laivas gali judėti iki 25 m diametro ratu. Vandens gylis gali siekti iki 1,25m,



20 pav. Schematinis Duisburgo laboratorijos patalpų vaizdas

Šaltinis (Engelkamp P., 2013)

0 – administracinės patalpos, 1 – bandymo baseinas, 2 – įprastinis tempimo karutis, 3 – bangų generatoriai, 4 – siurblinė, 5 – gilus mažagabaritinis baseinas, 6 – negilus mažagabaritinis baseinas, 7 – manevravimų baseinas, 8 – greitaeigis bandymų karutis.

Duisburgo bandymų baseinuose buvo atlikti bandymai su tiriamaisiais laivais tokiomis sąlygomis:

4 lentelė. Eksperimentų sąlygos

Eksperimentas Nr.	Vandens gylis, m	Grimzlė, m	Laivo savybės
8,024	4	3	Be gumbo
8,025	3	2	Be gumbo
8,026	3	2	Su gumbu
8,027	4	2	Su gumbu
8,028	4	3	Su gumbu

Šaltinis (Reederei J., 2008, 5p.)

Eksperimentuose laivai buvo savaeigiai, kiekvienas jų turėjo po du sraigtus, kurių diametras  $D=0,110$  m, menčių skaičius  $z=4$ , žingsninis santykis  $P/D=1$ , diskinis santykis  $AE/AO=0,70$ . Bandymai buvo atlikti ramiame vandenyje. Rezultatai perskaičiuoti į realaus dydžio laivą įvertinant mastelinį efektą. (Waymouth G. D., 2008. 8p.)

Bandymų baseine su laivo modeliais atliktų eksperimentų duomenys pateikiami 5, 6, 7 ir 8 lentelėse.

5 lentelė. Modelio eksperimentas 08,024,01

Modelio greitis, km/h	Modelio greitis, m/s	Variklio galia, kW
13	3,61	352
14,01	3,89	506
14,28	3,97	498
14,48	4,02	539

Šaltinis (Reederei J., 2008, 6p.)

čia  $V_S$ - modelio greitis, km/h; $V_S$ - modelio greitis, m/s; $P_D$ - reikalinga variklio galia, kW.

6 lentelė. Modelio eksperimentas 0,8,025,01

Modelio greitis, km/h	Modelio greitis, m/s	Variklio galia, kW
7,99	2,22	34
9,99	2,78	77
12	3,33	155
12,49	3,47	209
12,7	3,53	240

Šaltinis (Reederei J., 2008, 6p.)

7 lentelė. Modelio eksperimentas 0,8,026,01

Modelio greitis, km/h	Modelio greitis, m/s	Variklio galia, kW
8	2,22	24
8,99	2,50	26
10,5	2,92	74
12,01	3,34	171
12,51	3,48	212
12,7	3,53	231

Šaltinis (Reederei J., 2008, 6p.)

8 lentelė. Modelio eksperimentas 0,8,027,01

V, km/h	$V_S$ , m/s	$P_D$ , kW
14	3,89	231
16	4,44	505
16,97	4,71	1421
18,04	5,01	3180

Šaltinis (Reederei J., 2008, 7p.)

9 lentelė. Modelio eksperimentas 0,8,028,01

V, km/h	V <sub>s</sub> , m/s	P <sub>D</sub> , kW
10	2,78	101
12	3,33	172
12,98	3,61	323
14,01	3,89	492
14,48	4,02	616

Šaltinis (Reederei J., 2008, 7p.)

Iš visų Duisburgo laboratorijos atliktų eksperimentų naudosime 08.025.01 ir 08.026.01 eksperimentų duomenis, nes eksperimentai atitinka pasirinktas projektines grimzles.

### 2.3. Bandymo aprašymas Flow 3D programoje

Laivo korpusas sukurtas Delf Ship programa ir konvertuotas į skaičiuojamąjį modelį STL formatą, šis formatas leidžia programai įvertinti tik paviršiaus geometriją. Tiriama laivo korpusas atitinka realaus laivo dydį ir į programą konvertuotas masteliu 1:1. Programoje Flow 3D susikuriame naują aplinką, kurioje bus atliekamas eksperimentas, šiuo atveju reikėjo atlikti eksperimentus kiekvienam greičiui skirtingose simuliacijose. Todėl eksperimentai vedami į aplinkos simuliacijas, t.y. eksperimentui reikia sukurti simuliaciją, kurioje toliau bus vykdomas bandymas. Bendrų nuostatų (General) skiltyje įvedamas eksperimento atlikimo laikas ir pasirenkama tarptautinė matavimo vienetų sistema SI. Šiose nuostatose parenkamas ir matavimo kiekio kartojimas, tikslumas. Bendrų nuostatų skiltyje nurodomas eksperimente naudojamų skysčių kiekis, mūsų atveju – vienas skystis. Laivą veikia atmosferinis slėgis ir traukos jėga, jas įvedame į fizikos skiltį. Šioje skiltyje nurodomas ir skysčio tekėjimas – turbulencinis. Kita nemažiau svarbi programos skiltis skirta skysčiams. Skysčiams skirtoje skiltyje galima rankiniu būdu arba iš duomenų bazės užduoti parametrus kiekvienam skysčiui. Vandens klampumas priklauso nuo eksperimente naudojamo vandens temperatūros šiam eksperimentui iš duomenų bazės buvo paimtas vanduo 293K kelvinų. Eksperimente paimtas vanduo yra gėlas, o temperatūra didesnė, nes paprastai vidaus vandenų laivai plaukioja šiltesniame vandenyje. Duomenų kokioje temperatūroje buvo atlikti laboratoriniai bandymai nėra.

$$^{\circ}\text{C} = \text{K} - 273,16;$$

$$^{\circ}\text{C} = 293 - 273,16 = 19,84^{\circ};$$

Čia k - absoliutus nulis 293, k;

$\rho$ - vandens tankumas 917, kg/m<sup>3</sup>.

Ketvirtojoje programos skiltyje naudojamas laivo modelis STL formatu. Norint gauti eksperimentinius duomenis laivo korpusą turi kirsti dirbtinis tinklas (mesh) pavaizduotas 21 pav. Korpusas buvo sudalintas į daug mažų segmentų, norint pakankamai tiksliai įvertinti laivo korpusą, jį reikėtų skaidyti į kuo smulkesnius elementus. Tačiau tinklelio tankumą apsprendžia kompiuterio resursų galimybės. Negalima dalinti laivo korpuso į pernelyg smulkius kvadratėlius, kvadratėlių skaičius apsprendžia, kaip tiksliai į kompiuterinę programą yra įvestas laivo korpusas, ir kiekvienas kvadratėlis turi būti paskaičiuotas.

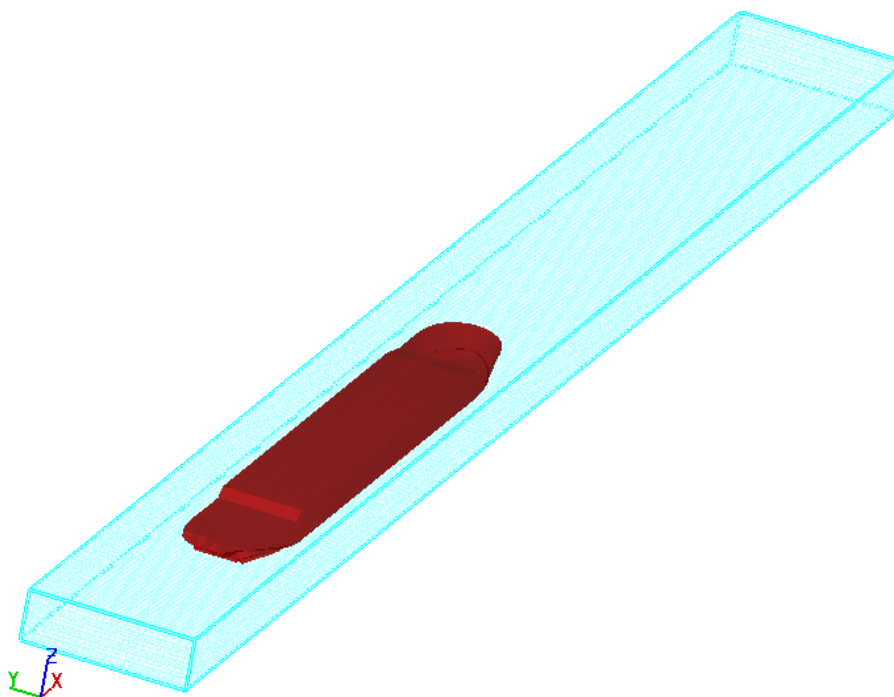
Programoje gaunamas stačiakampio formos tinklas 300 m ilgio, 24 metrų pločio ir 7 metrų aukščio. Tinklelyje tiriamąjį laivo korpusą aptekės vanduo, -X kryptimi pagal laivo modelio išsidėstymą. Kiekvieno eksperimento metu skysčiui užduodamas jo tekėjimo greitis. Skystis aptekės laivą greičiais pateiktais 10 lentelėje. Šie greičiai atitinka eksperimentinius greičius gautus bandymu baseine.

10 lentelė. Vandens greitis

V, km/h	8	9	10,50	12,00	12,50	12,7
V <sub>s</sub> , m/s	2,22	2,5	2,92	3,34	3,48	3,53

Šaltinis (sudaryta autoriaus)

Skysčiui programoje užduodamas ir jo aukštis t.y. nuo pagrindinės laivo linijos užduotas aukštis atitiks laivo grimzlę mūsų atveju – du metrai. Nepriklausomai nuo to, koks atstumas liks – Z kryptimi.

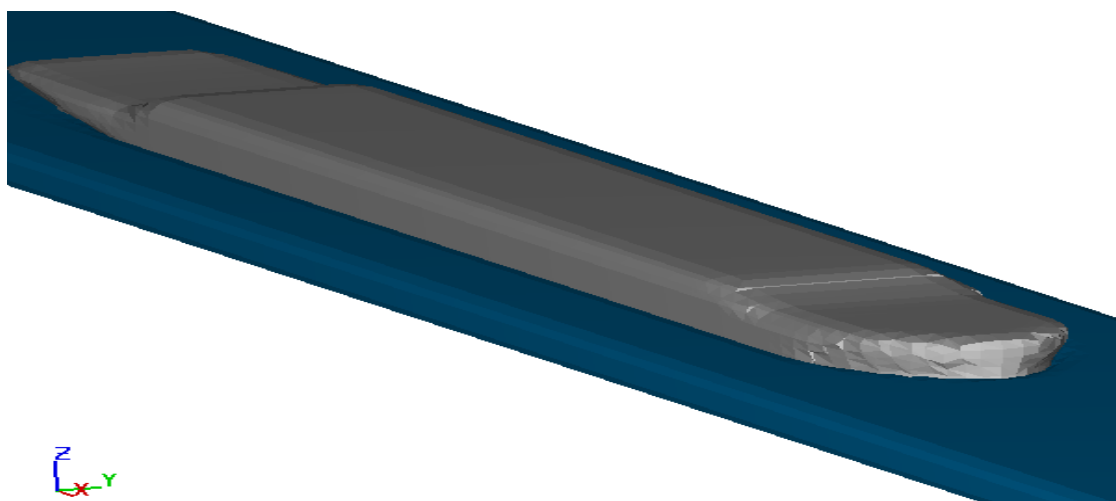


21 pav. Laivo korpusas dalinamas tinkleliu

Šaltinis (sudaryta autoriaus)

Norint taisyklingai apibrėžti skaičiavimus pats tinklelis turi būti suformatuotas, t.y. apibrėžta kiekviena tinklo sienos savybė. Priekinei sienai  $X$  maksimumas užduodamas apibrėžtas greitis  $-X$  kryptimi atitinkančią skysčio judėjimo greitį, ši siena taip pat turi skysčio aukštį. Šoninės sienos apibrėžtos taip, kad per jas vanduo ištekėtų, tokiu atveju neatsiranda šalutinis poveikis dėl atsimušusių bangų. Tinklelio dugnas turi turėti laivo greitį t.y. sutapti su skysčio greičiu.

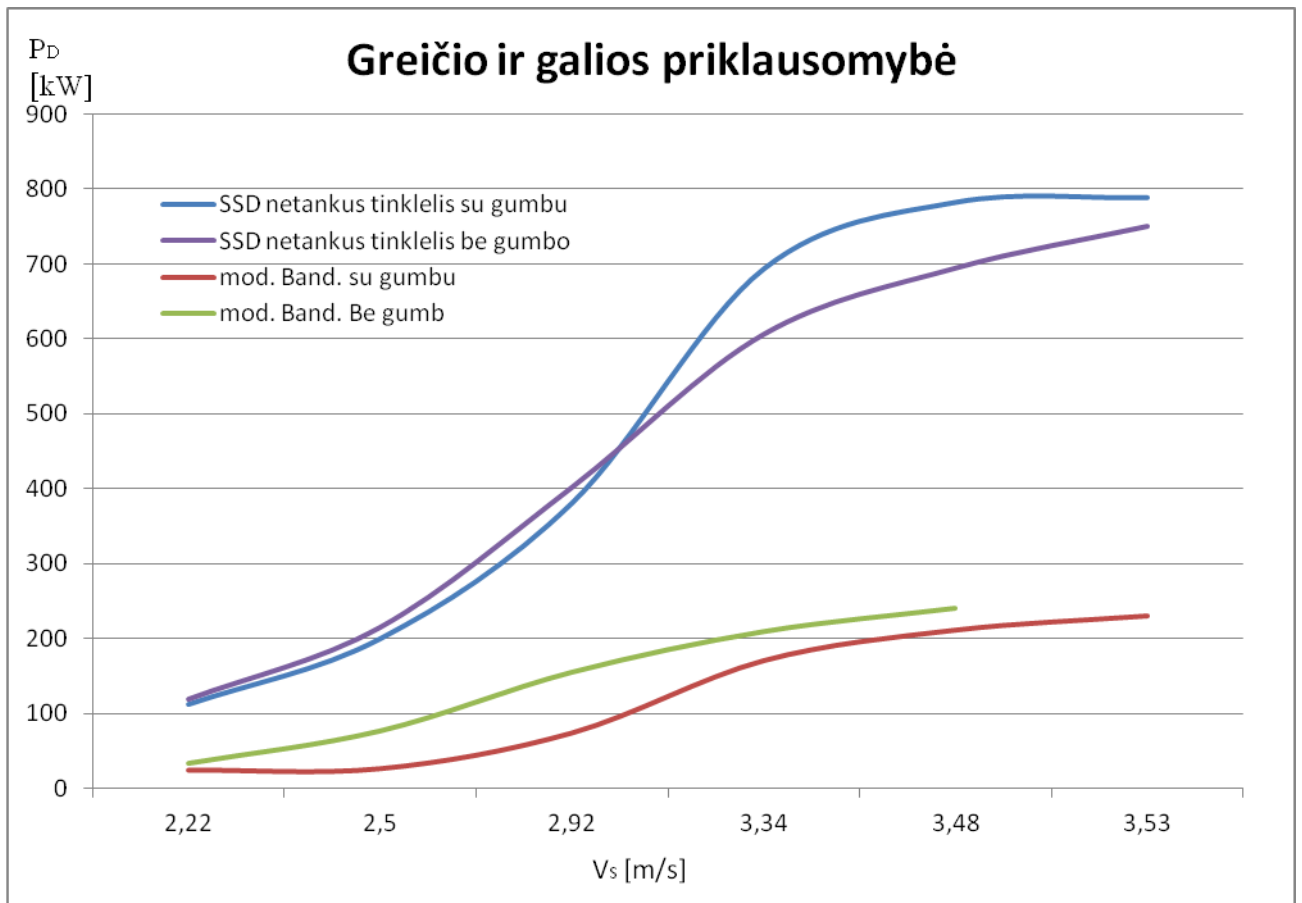
Vanduo išteka per  $X$  min. sienelę kuri apibrėžta, kaip išleidžianti vandenį ir oro srautą. Tokius pačius parametrus turi ir viršutinė sienelė. Atlikus šiuos veiksmus galima pamatyti kaip visi šie įvesti duomenis atsispindi programoje 22 pav.



22 pav. Programos apskaičiuotas korpusas

Šaltinis (sudaryta autoriaus)

Penktoje programos skiltyje pasirenkami parametrai, kuriuos apskaičiuos programa eksperimente. Iš duotų parametrų išrenkamas slėgis, pasipriešinimas, hidrauliniai duomenys. Norint teisingai pateikti apskaičiuotus duomenis juos reikia priskirti analizei. Analizės skiltyje galima pasirinkti, kaip programa pateiks duomenis 3D, 2D, grafinis ar tekstinis atvaizdavimas, mūsų atveju pasirenkamas tekstinis atvaizdavimas. Iš duomenų sudaromas greičio ir galios priklausomybės grafikas 23 pav.



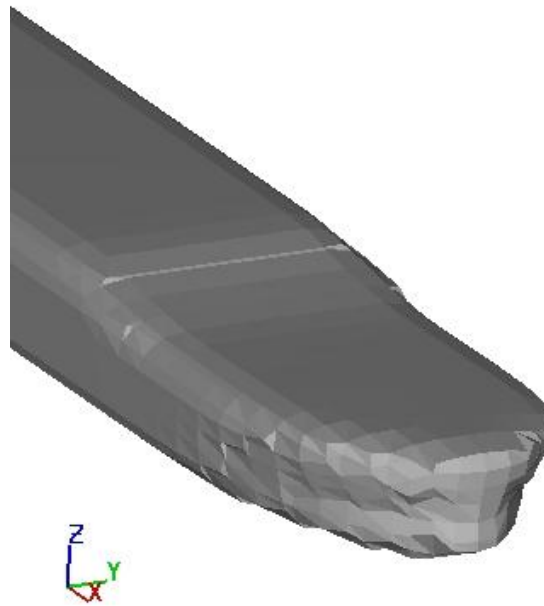
23 pav. Laivo pasipriešinimo grafinis atvaizdavimas

Šaltinis (sudaryta autoriaus)

Iš grafiko galime matyti kiek galios reikės kiekvienam greičiui išvystyti. Laboratoriniuose eksperimentų skaičiavimuose buvo įvertintas propulsinio komplekso naudingumo koeficientas. Propulsinio naudingumo koeficientai pateikti 1 priede atvaizduoti grafiškai. SSD skaičiavimų rezultatai niekada nebūna 100% patikimi, nes įvestuose duomenyse gali būti daug netikslumų. Matematinis problemos sprendimo modelis gali būti netikslus. Skaičiavimo tikslumas yra limituotas kompiuterio resursų galimybėmis. Tačiau iš grafiko galima spręsti, kad laivapriekinis gumbas didėjant laivo greičiui praranda savo efektyvumą.

#### 2.4. Skirtingų tinklelio tankumų pasipriešinimo palyginimas

Skirtingas tinklelio dažnumas gali įtakoti laivo pasipriešinimo galutinį rezultatą, todėl būtų tikslinga tai įvertinti ir į eksperimentą įvesti daugiau laivo korpusą kertančių linijų. Laivo laivapriekinė dalis programoje prieš padidinant tinklelio tankumą pateikiama 24 pav.



24 pav. Įprastinio tinklelio laivapriekio forma

Šaltinis (sudaryta autoriaus)

Iš 24 pav. galime pamatyti, kad laivo korpuso forma gali būti įvertinama nepakankamai gerai, nes korpusas nėra aptakios formos. Tokia laivo korpuso forma gavome kai laivą kirto 200 langelių X ašies kryptimi, 24 langeliai Y ašies kryptimi ir 10 langelių Z ašies kryptimi. Pačio stačiakampio, kuriame atliekamas eksperimentas parametrai yra tokie 300 m ilgio, 24 m pločio ir 7 metrų aukščio, ir jis sudarytas iš 48000 kvadratėlių.

Gaunamų rezultatų tikslumui padidinti, laivo korpusą kerta 4 stačiakampiai. Kiekvienas stačiakampis sutankinamas priklausomai nuo esamos padėties erdvėje, t.y. kuo arčiau laivo tuo mažesni kertančio kvadratėlio parametrai. Pirmasis stačiakampis turintis didžiausius matmenis yra 300 metrų ilgio, 24 metrų pločio ir 7 metrų aukščio, viso 86400 langelių visame tinkle. Šis tinklas nedaro didelės įtakos, jo dydis reikalingas vandens skysčiui nusistovėti, todėl buvo parinktas ganėtinai didelis tinklo tankumas. Antrasis tinklas, kurio matmenys yra tokie – 200 metrų ilgio, 20 metrų pločio ir 6,5 metrų aukščio. Šį tinklą sudaro 240000 tūkstančiai langelių. Visi tinkleliai išdėstyti erdvėje taip, kad skysčio dalelėms artėjant prie laivo korpuso, kompiuterinė programa geriau įvertintų pasipriešinimą. Trečiasis kertantysis tinklas sudarytas iš 737280 langelių, šis tinklas yra 120 metrų ilgio, 16 metrų pločio ir 6 metrų aukščio. Tinklelyje nustatytas maksimalus langelio dydis yra 0,25 m. Ketvirtasis tinklelis išsidėstęs arčiausiai laivo jo tinklelio dydis yra laivo gabaritiniai matmenys, o langelio dydis nedidesnis kaip 0,125 m. Ketvirtąjį tinklą sudaro 3784704 kvadratėlių kertančių korpusą. Visų tinklelių kertančiosios linijos geriau apibrėžia korpuso formą.



25 pav. Padidinto tinklelio laivapriekio forma

Šaltinis (sudaryta autoriaus)

Padidinus tinklelio tankumą laivo korpusą kerta daugiau linijų, todėl laivas tampa aptakesnis ir jo korpuso forma bus labiau įvertinta skaičiavimuose, tai galime matyti 25 pav.

11 lentelė. Laivo pasipriešinimo su laivapriekiniu gumbu rezultatai

Modelio greitis, km/h	Modelio greitis, m/s	Veleno pasisukimai, aps/min	Jėgainės galia $P_D$ , kW	SSD padidinto tankumo tinklelis, kW	Skirtumas, %
8	2,22	130,8	24	24,81	3,37
8,99	2,5	135,3	26	26,41	1,58
10,5	2,92	176,6	74	72,60	1,90
12,01	3,34	207,3	171	179,68	5,07
12,51	3,48	220,8	212	220,97	4,23
12,7	3,53	226,5	231	234,68	1,60

Šaltinis (sudaryta autoriaus)

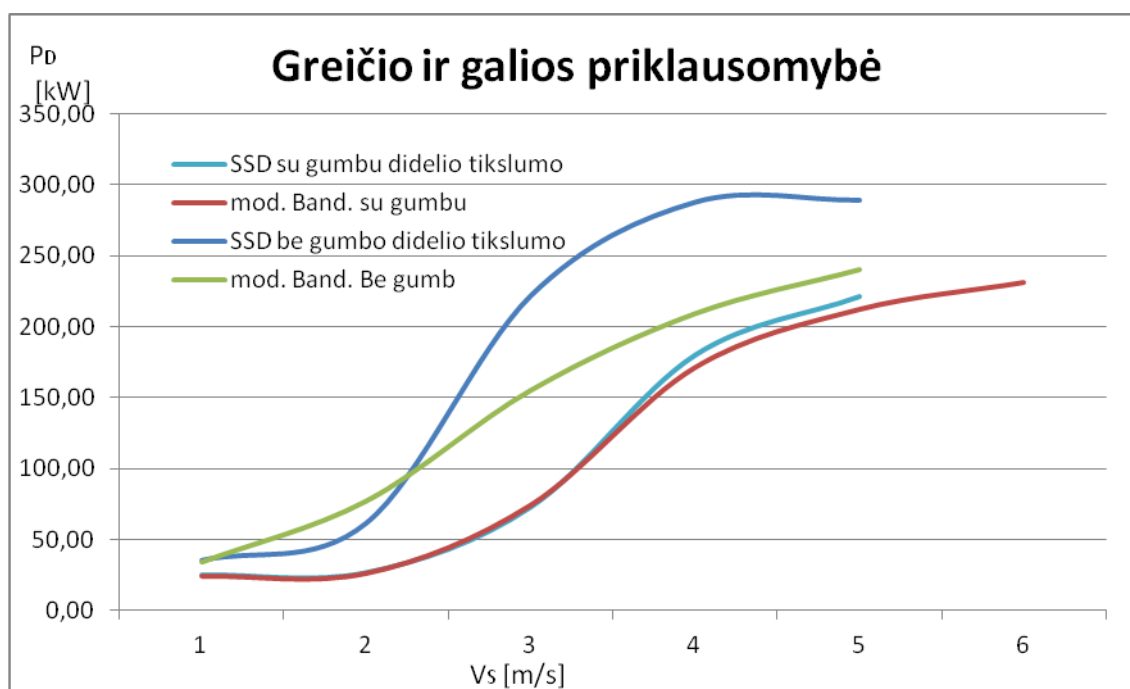
Iš 11 lentelės galime matyti nežymų skirtumą tarp padidinto tankumo tinklelio ir laboratorinių bandymų, skirtumas neviršijantis 5% ribos įrodo, kad laivo su gumbu eksperimentai padidinus tinklelio tankumą atitinka modelinius bandymų duomenis. Tokius programos parametrus galima naudoti tolesnėje tyrimų eigoje.

12 lentelė. Laivo pasipriešinimo be laivaprieikinio gumbo rezultatai

Modelio greitis, km/h	Modelio greitis, m/s	Veleno pasisukimai, aps/min	Jėgainės galia $P_D$ , kW	SSD padidinto tankumo tinklelis, kW	Skirtumas, %
7,99	2,22	132,9	34	35,66	4,88
9,99	2,5	171,7	77	61,91	19,60
12	3,34	207,5	155	221,97	43,21
12,49	3,48	223,8	209	287,87	37,74
12,7	3,53	228,5	240	291,93	21,64

Šaltinis (sudaryta autoriaus)

Atlikus laivo be laivaprieikinio gumbo pasipriešinimo testus pateiktus 12 lentelėje gavome nesutapimus pradedančius ryškėti didinant greitį, taip galėjo atsitikti dėl SSD programos kodo nestabilumo apskaičiavimo metu. Iš sudarytų lentelių matomi duomenys iš modelinių bandymų baseino su laivaprieikiniu gumbu (11 lentelė) ir be laivaprieikinio gumbo (12 lentelė). Programa apskaičiavus laivo pasipriešinimą, kurį sukelia labiau įvertinti laivo korpusai braižome variklio galios  $P_D$  priklausomybės nuo greičio  $V_S$  grafiką (26 pav.).



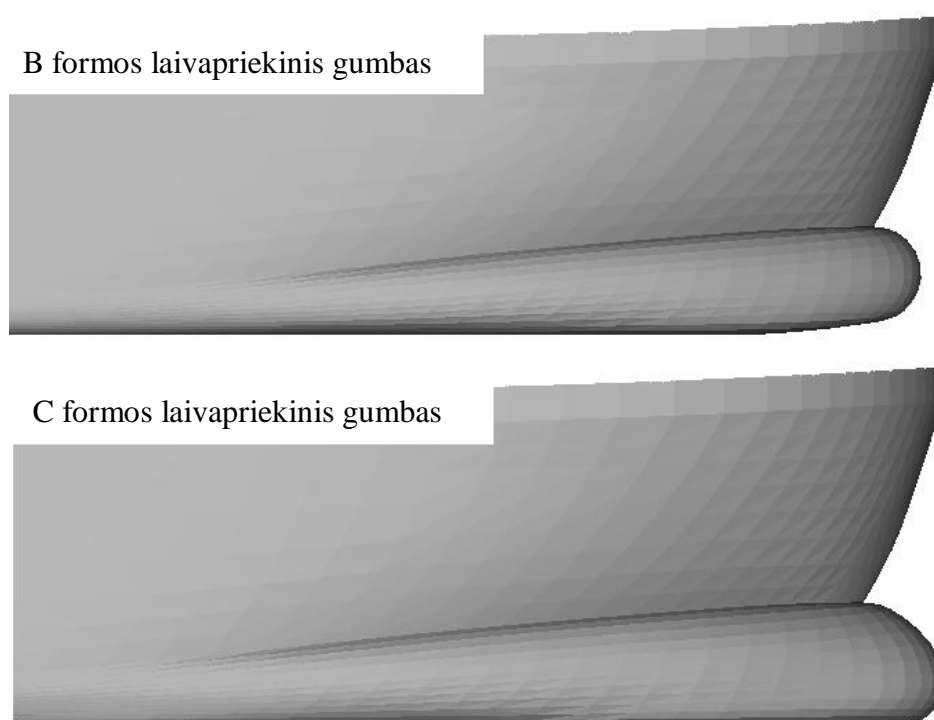
26 pav. Laivo pasipriešinimo grafinis atvaizdavimas

Šaltinis (sudaryta autoriaus)

SSD leistinų paklaidų ribose, tiksliai įvertina laivo su naujo tipo laivaprieikiniu apvadu pasipriešinimą eigumui sekliame vandenyje. SSD programoje gautų rezultatų duomenų be laivaprieikinio gumbo negalime įvertinti, nes jau nuo 8 km/h rezultatai pradeda nesutapti leistinų paklaidų ribose. Tiksliai įvertinti laivo pasipriešinimą be laivaprieikinio gumbo nėra tikslo, nes laivas toliau bus eksploatuojamas su laivaprieikiniu gumbu, kuris sumažina laivo pasipriešinimą.

## 2.5. Skirtingų laivapriekio formų pasipriešinimo įvertinimas

Laivo eksploatacijai svarbus pasipriešinimo parametras galėtų būti dar labiau sumažintas padidinant laivapriekinį gumbą. Lėtaeigiuose laivuose ( $Fr < 0,20$ ) dideli gumbai leidžia dalį laivapriekinio tūrio sukcentruoti arčiau kylio. Tuo pačiu KWL laivapriekyje yra siauresnė. Tai leidžia sumažinti skersinę laivapriekinę bangą - pagerėja laivapriekio aptekėjimas, nes vandens srautas nebėra nukreiptas link dugno, o tai sumažina sūkurių susidarymą prie laivo briaunos. (Venckus T., 2010, 20 p.) Šių bandymų etape laivapriekinio gumbo forma pailginta 3 metrais (žr. 27 pav.).



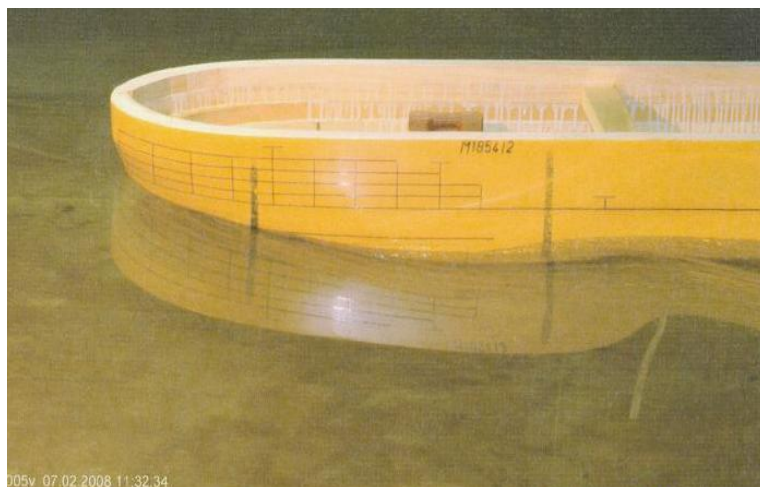
27 pav. Eksperimente naudotų laivapriekių formos

Šaltinis (sudaryta autoriaus)

B formos laivapriekis gumbas yra ovalo formos išsidėstęs per visą laivą. Tokia laivapriekio forma 10% efektyvesnė lyginant su laivo forma be laivapriekinio gumbo, laivui judant 10-11 km/h, didėjant laivo greičiui pasipriešinimas eigumui didėja, todėl gumbo įtaka darosi neigiama.

C formos laivapriekinis gumbas tai delta tipo laivapriekio formos gumbas, jis gaunamas prailginant laivo plokščio dugno ilgį 3m. Taip sumažinamas visas pasipriešinimas eigumui, nes sumažėja vandens dalelių greitis po plokščiu dugnu, todėl sumažėja plokščio dugno prisiurbimo efektas. Toks laivapriekis padidino laivo tūrį  $3,29 \text{ m}^3$ .

Dėl tokio prailginimo keičiasi laivo bangų sukeliamas pasipriešinimas.



28 pav. Tiriama laivo modelis bandymu baseine 3,53 m/s

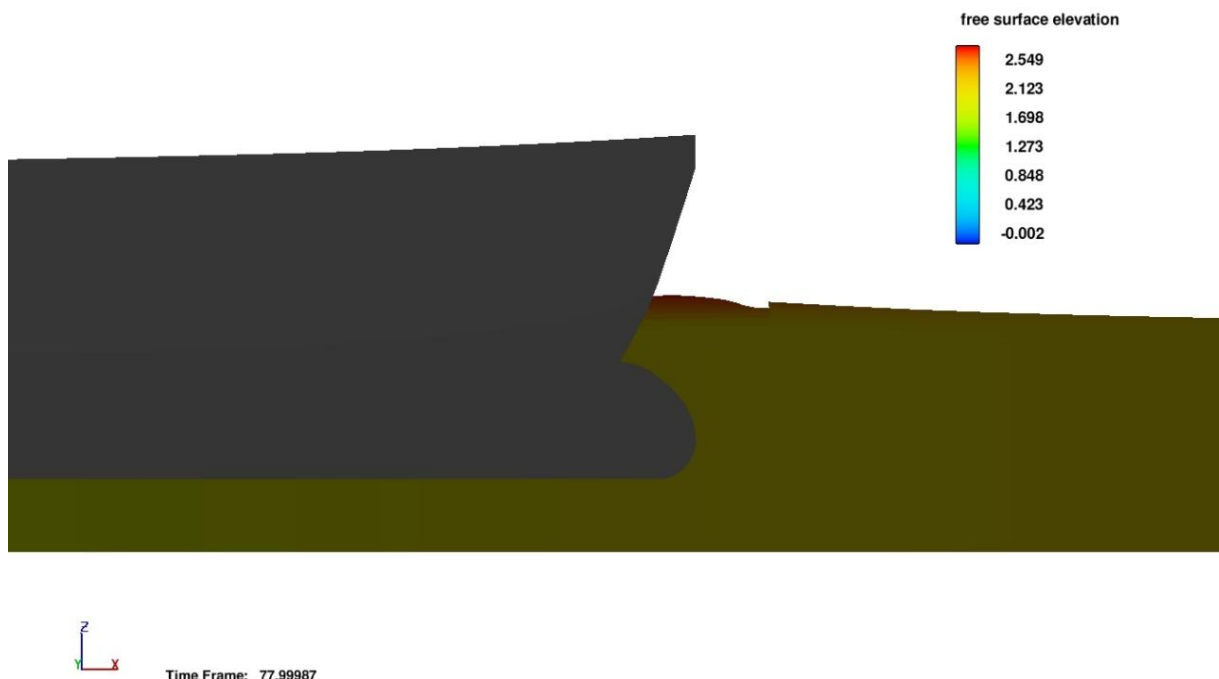
Šaltinis (Modelinių testų bandymas Duisburgo baseinas, 2008 m.)

28 pav. Pateiktas laivo modelis judantis 3,53m/s greičiu, ir jo sukeltos bangos. Įprastai sausakrūviai upiniai laivai vykdo laivybą 10-11 km/h, kai klirensas yra 1 m. Taip yra dėl plokščio dugno prisiurbimo efekto padarinių, bei ženkliai išaugančio pasipriešinimo. Palyginimui, laivo pasipriešinimas laivui judant 2,29 m/s reikalauja 72,60kW galios, o 3,34 m/s – jau 171 kW, dėl ko padidėja kuro suvartojimas. 29 pav. pateiktas laivo su B tipo laivapriekiniu gumbu SSD metodu gautas laivo pasipriešinimo bangos aukštis. Laivui judant 3,48m/s.



29 pav. Tiriamas laivas SSD programoje baseine 3,48 m/s

Šaltinis (sudaryta autoriaus)



30 pav. Laivas su C tipo gumbu SSD programoje 3,53 m/s

Šaltinis (sudaryta autoriaus)

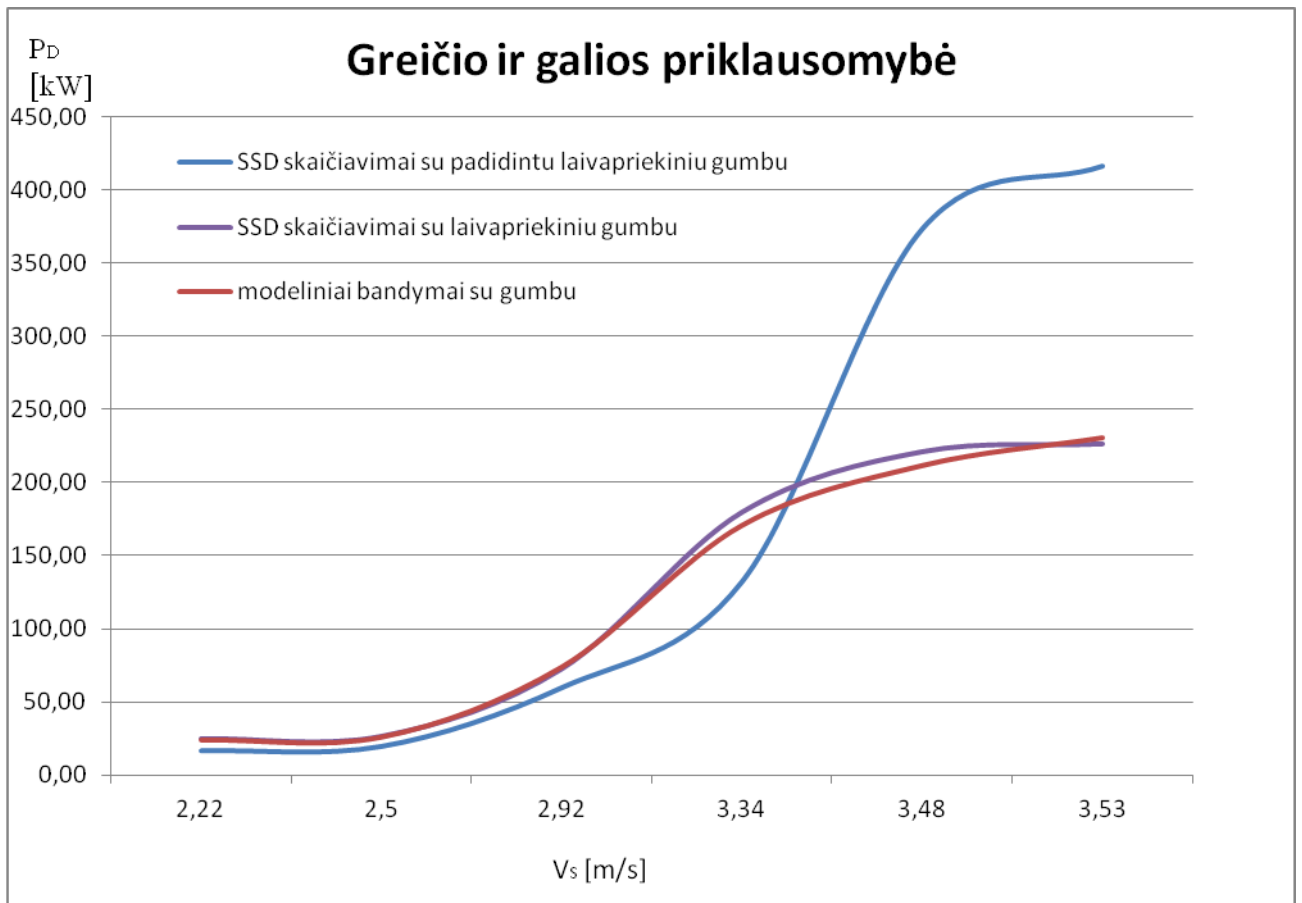
Iš 29 ir 30 pav. matome, kad bangos aukštis prie 3,48 m/s B tipo laivapriekiu yra 2,55, kai C tipo laivapriekis tokį bangos aukštį sukelia judėdamas 3,53 m/s greičiu. Iš pasipriešinimo duomenų pateiktų 2 priede buvo sudaryta palyginamoji galios ir greičio priklausomybės lentelė.

13 lentelė. Skirtingų laivapriekių formų vertinimas

Modelio greitis, km/h	Modelio greitis, m/s	Modeliniai bandymai, kW	SSD laivapriekinis gumbas, kW	SSD pailgintas laivapriekinis gumbas, kW
8	2,22	24	24,81	16,60
8,99	2,5	26	26,41	19,63
10,5	2,92	74	72,60	59,78
12,01	3,34	171	179,68	132,21
12,51	3,48	212	220,97	373,52
12,7	3,53	231	234,68	416,51

Šaltinis (sudaryta autoriaus)

Kad efektyviai parodyti skirtumus tarp laivapriekinių gumbų braižomas grafikas 31 pav.



31 pav. Skirtingų laivapriekių formų vertinimas

Šaltinis (sudaryta autoriaus)

Padidinto laivapriekinio gumbo efektyvumas sekliame vandenyje matomas tik greičių intervale nuo 2,22 m/s iki 3,41 m/s. Didėjant laivo greičiui su padidintu laivapriekiniu gumbu reikia daugiau galios tam pačiam greičiui pasiekti, negu bandymų baseine bandyto laivo modeliui su laivapriekiniu gumbu. Turint omenyje tai, kad seklių vandenų laivai paprastai eksploatuojami nuo 2,78 m/s iki 3,06 m/s, toks laivapriekio modifikavimas pasipriešinimo atžvilgiu bus efektyvesnis. SSD bandymu metu nustatyta, kad laivui su pailgintu laivapriekiniu gumbu išvystyti 2,92 m/s greitį reikės apytiksliai 59,78 kW galios. Kai, tuo tarpu, tam pačiam greičiui išvystyti laivui su laivapriekiniu gumbu bandymų baseino duomenimis reikės 74 kW. Įprastai laivo varikliui pasiekti 75 kW galingumą sunaudojama 20 l/h. Todėl 1000 km nuplaukti laivui su nepadidinto laivapriekinio gumbo forma reikės sunaudoti 19,81 l/h kuro, šį atstumą laivas įveiks per 95 valandas, tad viso sunaudos apie 1881,95 t kuro. Tam pačiam atstumui įveikti plaukiant tokiu pačiu greičiu laivas su padidintu laivapriekiniu gumbu sunaudos 16,01 l/h, viso nuotolio įveikimui - 1524,75 t kuro. Laivas su padidintu laivapriekiu sunaudos 19% mažiau kuro. Padidintas laivapriekinis gumbas sumažina korpuso pasipriešinimą eigumui, reikalingą variklio galingumą ir eksploatacines išlaidas. Tolimesnėje tyrimų eigoje reikėtų įvertinti daugiau laivapriekio formos modifikacijų, taip randant optimaliausią laivapriekinį gumbą.

## IŠVADOS

Laivo greitis yra vienas iš pagrindinių naudingumo rodiklių, todėl visiškai suprantama, kad norint jį pagerinti reikia mažinti vandens pasipriešinimą laivo judėjimui. Didžiausią įtaką laivo judėjimui sudaro trinties pasipriešinimas, jis gali būti sumažintas keičiant laivo formą. Laivapriekinis gumbas laivo priekyje sumažina bangavimą. Darbe pateikiamas naujo tipo laivapriekinis gumbas skirtas seklių vandenų laivams. Jo pasipriešinimo skaičiavimai atlikti SSD programa.

Išanalizavus sekliame vandenyje pasireiškiančius reiškinius, nustatėme kokie būna tipiniai reiškiniai, kokie reiškiniai pastebimi labiausiai, aprašėme šių reiškinių poveikį laivo eigumui.

Apžvelgus seklaus vandens reiškinių tyrimus ir jų vertinimą, nustatėme, kad egzistuoja siurbimo efektas, pablogėjęs laivo valdomumas ir kiti efektai, kuriuos vertino tokie mokslininkai kaip Barrass, Hooft, Norrbin. Tačiau jų skaičiavimo metodika skiriasi ir galutiniai rezultatai nesutampa.

Atlikus seklaus vandens reiškinių įtakos mažinimo galimybių analizę, pateikėme keletą variantų kaip būtų galima spręsti problemas susijusias su šiais reiškiniais. Darbe pasirinktas problemos sprendimo būdas – laivo korpuso formos keitimas.

Literatūros analizėje aprašėme laivapriekinį gumbą, pateikėme keletą forštevenio su gumbu užpatentuoatų pavyzdžių.

Laivapriekinio gumbo eigumo įtakos vertinimui pasirinkome SSD skaičiavimo metodikas, pateikiame šių metodikų skaičiavimo privalumus, formuluotes ir trūkumus lyginant su įprastinėmis skaičiavimo metodikomis ar bandymų baseinų eksperimentų vertinimais.

Išanalizavus laivo modelius su laivapriekiniu gumbu ir be laivapriekinio gumbo programoje Flow 3D nustatėme, kad rezultatai pirmuoju būdu, kai laivo korpusas nepakankamai gerai įvertinamas programoje gaunamas laivo pasipriešinimas neatitinkantis bandymų baseino rezultatų. Nustatėme, kad atliekant tokio tipo bandymus SSD programose reikalingas ypatingas tikslumas, kad rezultatų duomenys atitiktų realių bandymų rezultatus. Gautus duomenis pateikiame grafiškai. Sudarytu skaičiavimo tinkleliu Flow 3D programoje galima vertinti ir taip dar labiau tobulinti laivapriekinio gumbo ir viso laivo korpuso charakteristikas. Padidinus laivapriekinį gumbą trečiuoju bandymų etapu tyrimus atlikome SSD programoje. Gavome pasipriešinimo rezultatus 19% našesnius nei pradinė gumbo forma, tačiau tik atitinkamame greičių intervale nuo 2,22 iki 3,41 m/s. Greičiui didėjant laivapriekinio gumbo formos ilginimas pradeda augti ir tampa neigiamas ir neefektyvus jai lyginti su pradine laivapriekine gumbo forma. Tokių bandymų virtualioje bandymų erdvėje galima atlikti tiek kiek leidžia kompiuterio resursai ir vertinti juos tol, kol gaunamas geriausias variantas. Tik gavus tinkamiausią rezultatą būtų galima atlikti eksperimentus bandymų baseinuose ar išbandyti naujai statomiems laivams. Tokio tipo rezultatai atneštų praktinės naudos

vidaus vandenų laivams parenkant efektyviausią laivapriekinio apvado formą. Tokių eksperimentų pagalba būtų galima sudaryti seklių vandenų laivapriekinio gumbo optimizavimo tyrimų metodiką.

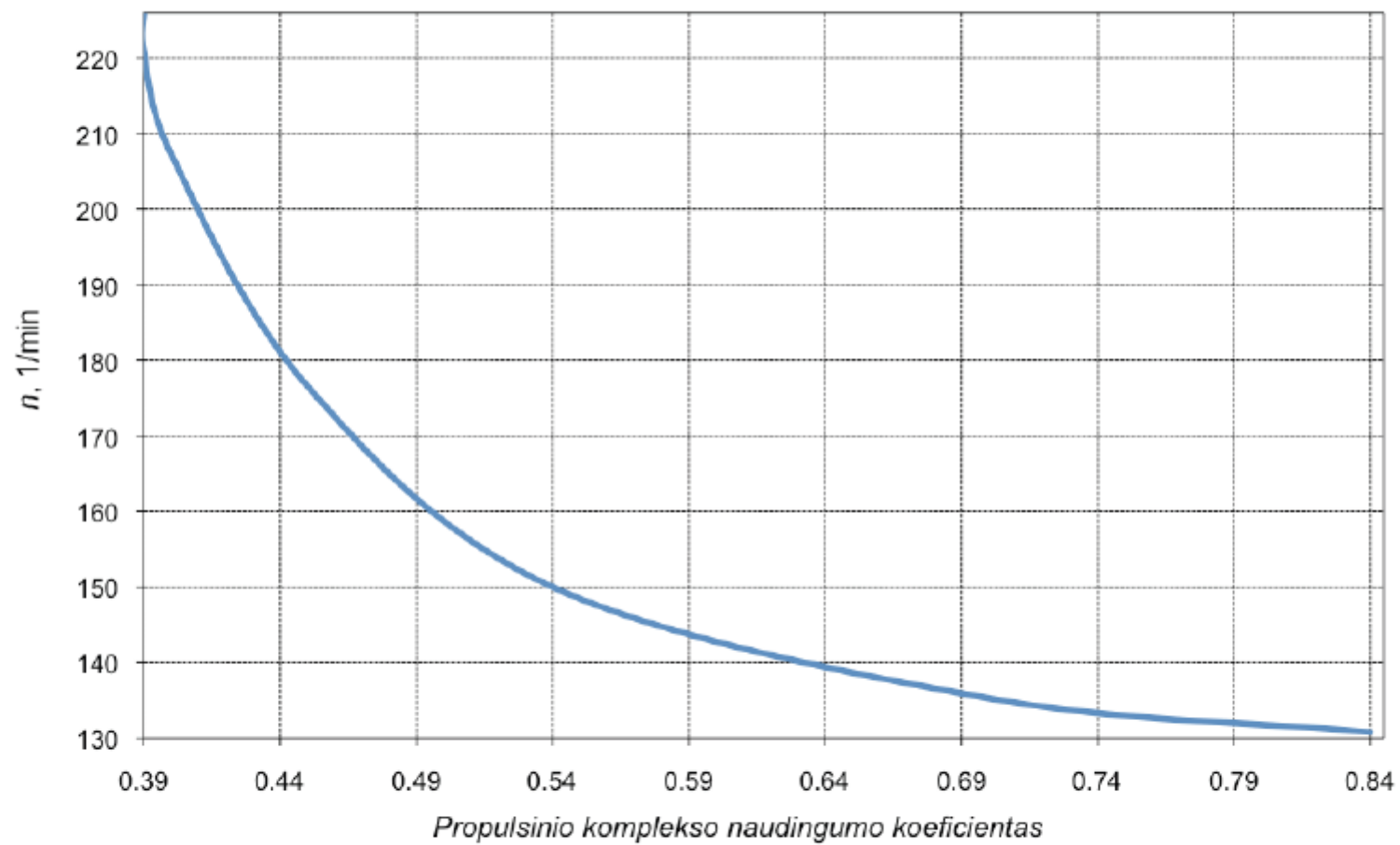
## LITERATŪRA

1. Beneš P. 2011 Ing, Kollarik R. Preliminary computational fluid dynamics (cfd) simulation of EIIB push barge in shallow water. Slovensko.
2. Briggs M. J. 2006. Ship Squat Predictions for Ship/Tow Simulator. USA. 2p.
3. Čerka J. 1997. Laivo teorija. Praktinis laivo jūrinių savybių nustatymas. Klaipėda: KU I-kl.
4. Čerka J. 2005. Laivo eigumas. Klaipėda: KU I-kl.
5. Djačkov V., Čerka J., Venskus T., Dijke H. 2009. A new type of bulbous bow resistance test in shallow waters. Transport means: proceedings of 13th international conference. 170-172 p.
6. Grigaliūnaitė-Vonsevičienė G. 2012. Mechanika, termodinamika, bangos. Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius: VGTU leidykla technika. 41 p.
7. Henn R., Sharma S. D. 2001. Influence of Canal Topography on Ship Waves in Shallow Water. Institute of Ship Technology. Germany. Duisburg.
8. Jacek J. 2008. Assessment of ship squat in shallow water using CFD. Poland: Gdansk University of Technology.
9. Kracht A. M. 1978. Design of bulbous bows. Transactions Vol. 86. Germany. 197-217 p.
10. Marine J. 2012. Computational Fluid Dynamics Based Bulbous Bow Optimization Using a Genetic Algorithm. Germany.
11. Metin T. 2001. Behavior of ships in shallow and restricted waters I.T.U. Naval Architecture and Ocean Engineering Faculty. Turkey.
12. Velde M. V. 2010. Squat and U.K.C briefing for marines. Belgium. 30 p.
13. Venckus T. 2010. Laivo su naujo tipo laivapriekiniu gumbu pasipriešinimo sekliame vandenyje įvertinimas. Magistro darbas. Klaipėda.
14. Ventura E. 2010. Bulbous Bow Design and Construction. Centre for Marine Technology and Engineering. Portugal. 10 p.
15. Waymouth G. D., Wilson R. V., Stern F. 2008. Development center for ship technology and transport systems. Modellversuche mit einem Tankmotorschiff. Germany: Duisburg.
16. Danklefsen N. 2008 m. Vidaus vandens kelių transportas, įvairiarūšiškumas ir logistika. Europos parlamentas [interaktyvus]. [žiūrėta 2013 m. balandžio 10 d.]. Prieiga per internetą: [http://circa.europa.eu/irc/opoce/fact\\_sheets/info/data/policies/transport/article\\_7271\\_lt.htm](http://circa.europa.eu/irc/opoce/fact_sheets/info/data/policies/transport/article_7271_lt.htm)
17. Djačkov V. 2011. Laivų projektavimas šiandien ir rytoj. [interaktyvus]. [žiūrėta 2012 m. sausio 26 d.]. Prieiga per internetą:

- <http://www.mokslasirtechnika.lt/mokslo-naujienos/laiv-projektavimas-siandien-ir-rytoj.html>>
18. Donald C.S. 2008. Principles of Naval Architecture. [interaktyvus]. [žiūrėta 2012 m.sausio 26 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.steelnavy.com/WavePatterns.htm>>
  19. Engelkamp P. 2013. Development Centre for Ship Technology and Transport Systems. [interaktyvus]. [žiūrėta 2012 m.vasario 15d.]. Prieiga per internetą: [http://www.dst-org.de/intro\\_e.htm](http://www.dst-org.de/intro_e.htm)>
  20. Europos Sąjungos vidaus vandenų transporto politika. 2006. Europos parlamentas. [interaktyvus]. [žiūrėta 2013 m. kovo 13 d.]. Prieiga per internetą: [http://www.rivertransport.lt/europos\\_upiu\\_transporto\\_politika/](http://www.rivertransport.lt/europos_upiu_transporto_politika/)>
  21. McDonough J. M. 2009. Lectures in elementari fluido dynamics. [interaktyvus]. [žiūrėta 2013 m. vasario 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.engr.uky.edu/~acfd/me330-lctrs.pdf>>
  22. Orrego S. 2009. Computer simulation of fluid using a modern tool for the study and analysis of fluids. [interaktyvus]. [žiūrėta 2012 m.vasario 15d.]. Prieiga per internetą: <http://www.indisaonline.8m.com/anteriores/77.htm>>
  23. Watts M. 2008. The official journal of the United Kingdom maritime pilots' association (UKMPA). [interaktyvus]. [žiūrėta 2012 m. sausio 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.pilotmag.co.uk/2008/02/01/squat-part-1/>>
  24. Weddell M. 2010. Hooked on Speed: What Made Normandie Go? [interaktyvus]. [žiūrėta 2012 m. sausio 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.fordham.edu/normandie/ship/MW1%20Hooked%20on%20Speed.html>

## **PRIEDAI**

1 priedas. Propulsinio komplekso naudingumo koeficiento  $\eta_D$  priklausomybė nuo sraigto apsisukimų skaičiaus  $n$ .



Grafikas sudarytas vadovaujantis eksperimento 08.026.01 (3.4 lent.) duomenimis.

## 2 priedas

Mažo tikslumo pasipriešinimo skaičiavimai be gumbo						
Pasispriešinimas R (N)						
Matavimo intervalas	Greitis m/s					
	2,22	2,5	2,92	3,34	3,48	3,53
1	761171	962026,3	1307891	1707248	1852259	1905491
2	96870,42	112306,7	114352,8	128184,3	134004,6	136123,8
3	111754,2	125780	148223	172604,9	179737,5	183916,8
4	37837,55	72733,38	87823,2	100315,1	117947,9	123240,9
5	17205,93	17247,94	28728,72	37250,07	64585,84	82922,77
6	6772,386	2986,015	37187	61895,04	77377,16	71652,1
7	36026,17	30594,68	46680,64	49157,83	82932,09	79202,77
8	39567,99	47932,27	58181,59	64924,59	99167,83	87340,67
9	39629,98	46558,5	55121,95	67828,31	106001,3	87469,1
10	25427,82	38393,51	50242,4	65579,69	91057,81	80437,98
11	20430,79	31525,64	34214,53	48114,99	72091	67104,64
12	8728,787	24190,76	21949,65	40426,61	61748,48	58584,69
13	20741,98	20799,62	17162,37	36819,53	57749,46	54087,41
14	24541,09	19188,24	16251,38	37480,89	57176,41	53133,13
15	18277,98	20122,89	21470,86	39692,07	57459,03	53397,1
16	13260,15	20855,07	26329,87	40697,43	57319,11	52150,11
17	12290,23	20835,76	29496,1	41230,89	57653,16	51887,73
18	12626,47	21725,37	30918,78	44285,26	61542,76	55304,22
19	13957,23	24053,46	34527,07	50330,79	66427,37	59100,17
20	16189,42	27740,01	41820,57	54980,08	72031,06	63970,84
21	19067,82	34296,02	48443,38	66536,26	79184,44	71647,36
22	24442,7	40744,29	58066,65	71030,83	84234,91	79422,69
23	29271,38	48132,96	63407,97	75056,48	83060,96	80052,51
24	33894,1	51944,54	65625,45	78124,29	84402,07	79564,68
25	36329,07	55872,33	68416,98	81778,2	85091,69	85336,19
26	39606,56	59161,93	71024,61	85234,76	87403,46	87222,29
27	42527,05	61637,99	71798,75	82145,94	86851,59	88662,07
28	45638,11	63727,49	73137,9	82062,23	85533,36	88928,53
29	47661,01	64975,59	73585,22	80902,63	84761,59	88650,32
30	49102,15	65866,69	72199,89	78544,54	83738,52	87346,88
31	50258,75	66442,38	70305,93	77502,17	83028,58	85945,39
32	50642,17	65628,34	68533,59	76656,14	82529,55	84973,56
33	50007,7	64013,27	67510,37	76254,06	81847,23	84526,5
34	48952,66	62978,31	66929,13	75591,89	81606,98	84515,13
35	47905,48	61968,07	66524,68	74864,76	81714,8	84407,59
36	46991,06	61027,43	66469,43	74021,25	81820,44	83792,31
37	46350,42	60232,46	66082,73	72925,77	81356,36	83059,08
38	45516,88	59749,1	65315,23	71928,51	80788,73	82279,5
39	44811,75	59419,43	64490,51	71005,15	80418,58	81648,23
40	44202,81	59241,05	63722,55	70318,42	80072,83	81091,72
41	43492,45	59112,88	63017,18	69839,98	79714,08	80661,5

42	42764,54	59075,39	62458,65	69436,56	79321,02	80379,67
43	42104,39	59175,83	61866,77	69324,32	78947,73	80237,89
44	41522,32	59252,84	61443,5	69489,98	78783,59	80190,79
45	40938,41	59230,63	61311,7	69698,88	78725,17	80344,02
46	40484,31	58982,05	61307,41	69899,41	78635,72	80472,39
47	40187,85	58582,86	61530,78	70193,56	78555,87	80739,48
48	39999,63	58141,07	62035,98	70553,32	78411,09	80934,2
49	39850,9	57815,29	62289,97	71145,14	78227,97	81119,31
50	39846,15	57638,42	62543,97	71220,11	78012,27	81222,27
51	39967,94	57536,95	62584,4	71438,8	77748,79	81147,72
52	40092,07	57526,5	62519,52	71710,32	77496,37	81029,13
53	40184,62	57624,09	62339,16	71705,21	77173,38	80652,72
54	40290,32	57654,65	62000,75	71890,02	76895,33	80204,64
55	40392,2	57615,9	61642,27	71949,07	76605,28	80024,17
56	40521,04	57878,17	61460,75	71957,51	76280,91	79925,3
57	40647,06	58090,97	61595,39	72032,48	75995,72	79609,02
58	40707,47	58329,02	61073,75	72062,66	75732,79	79159,88
59	40741,85	58528,73	61028,39	72045,92	75284,16	78824,31
60	40780,16	58644,28	61074,51	72052,17	74985,08	78473,6
61	40798,36	58608,77	60903,38	72563,89	74702,9	78665,31
62	40816,2	58409,65	60708,56	71974,97	74398,09	78661,38
63	40832,28	58160,92	60614,64	71929,95	74073,38	78243,62
64	40859,85	57883,43	60527,43	71815,53	73770,48	77745,81
65	40870,89	57620,89	60371,4	71680,91	73460,42	77374,91
66	40829,13	57164,67	60215,34	71598,85	73087,4	77058,1
67	40744,42	56753,3	59931,86	71428,23	72774,27	76738,44
68	40621,92	56328,11	59697,05	71248,53	72495,55	76400,17
69	40429,7	55929,31	59504,19	71043,1	72186,84	76187,91
70	40237,72	55565,14	59256,96	70843,56	71964,8	75875,41
71	39976,33	55227,7	58966,37	70882,69	71729,99	75607,92
72	39754,41	55043,02	58836,33	70360,55	71479,66	75238,35
73	39538,67	54920,49	58567,57	70014,57	71297,77	74905,57
74	39183,82	54810,27	58367,65	69746,53	71131,62	74604,38
75	38760,92	54770,55	58068,78	69483,07	71005,09	74195,34
76	38176,04	54776,22	57857,27	69230	70861,2	73848,02
77	37765,86	54711,33	57558,56	69007,77	70629,62	73404,85
78	37326,68	54631,61	57427,24	68746,58	70436,75	73074,02
79	36946,77	54513,93	57342,79	68501,9	70071,45	72675,16
80	36599,5	54188,69	57172,11	68273,19	69576,45	72469,04
81	36307,25	53721,84	56935,27	68057,73	69288,01	72336,2
82	36073,84	53190,66	56898,44	67843,67	68842,57	71976,2
83	35872,09	52956,66	56753,51	67649,67	68142,07	71592,38
84	35730,98	52440,17	56569,11	67442,73	67609,92	71310,16
85	35632,32	52029,83	56415,67	67261,55	67089,82	70967,27
86	35562,55	51674,72	56400,79	67099,21	66554,22	70689,54
87	35461,9	51337,66	56271,96	66962,44	66026,13	70391,88
88	35397,74	51064,95	56128,77	66782,25	65628,21	70168,5

89	35331,52	50886,52	55955,86	66621,95	65383,84	69905,66
90	35320,37	50707,55	55913,72	66413,63	65149,26	69677,7
91	35289,23	50529	55830,35	66272,13	64945,28	69501,27
92	35278,1	50383,91	55669,72	66128,77	64766,83	69288,51
93	35296,84	50249,85	55627,6	66011,63	64574,67	69116,31
94	35300,26	50125,13	55544,98	65887,2	64381,46	68920,59
95	35361,2	49967,52	55513,09	65761,91	64243,98	68752,06
96	35408,2	49808,27	55413,01	65654,49	64066,88	68565,23
97	35428,49	49695,5	55360,73	65520,49	63932,56	68423,84
98	35430,44	49552,45	55171,04	65361,74	63777,77	68284,67
99	35438,28	49428,79	55224,28	65231,63	63641,59	68101,9
100	35440,11	49352,87	55110,45	65080,17	63502	67997,45
101	35429,45	49281,42	54937,68	64891,69	63350,08	67862,64
102	35453,28	49270,63	55037,59	64777,38	63214,54	67758,66
vidurkis	42670,76	59261,72	63331,83	72646,51	77907,07	80847,31
kN	42,67076	59,26172	63,33183	72,64651	77,90707	80,84731
kW	118,4114	214,7164	402,0194	606,5984	695,1708	751,0289
nuad kof	0,8	0,69	0,46	0,4	0,39	0,38

Mažo tikslumo pasipriešinimo skaičiavimai su gumbu						
Pasispriešinimas R (N)						
Matavimo intervalas	Greitis m/s					
	2,22	2,5	2,92	3,34	3,48	3,53
1	715362,19	903546,5	1227585	1601733	1737584	1787452,2
2	103790,08	120203,6	123587,6	141830,6	148523,7	150963,38
3	127272,3	139134,1	160870,2	193828,7	199175,8	206839,47
4	71164,82	80103,86	104494,6	128010,5	149413,6	148970,88
5	22868,232	23235,24	34043,74	63626,15	69051,85	84029,336
6	536,82959	11157,73	47671,88	76887,85	83335,42	70070,883
7	16273,232	29079,64	73515,85	80078,88	104044,6	100652,86
8	26910,213	50561,96	73428,06	93206,09	111834,8	111821,51
9	26335,58	49113,37	77230,3	95428,29	113360	108570,11
10	39251,375	49369,91	70323,99	82042,37	107739,9	101384,1
11	17828,938	29871,85	53628,77	61693,79	88403,82	72814,766
12	16991,227	31409,36	43098,09	53644,2	76241,47	72246,531
13	20058,82	28507,75	38211,63	51073,56	71972,41	68810,523
14	15860,274	23236,44	33674,33	52295,86	70463,01	65933,125
15	10390,898	23705,53	34374,03	52553,37	71732,33	64869,059
16	18929,48	23729,3	33283,11	52030,76	70571,7	62485,219
17	18041,418	22744,63	33222,8	51638,2	72012,38	65706,953
18	18796,342	23238,5	34911,02	55925,07	75187,28	71538,031
19	19960,85	25203,34	37914,04	63353,25	76313,88	76791,266
20	21825,877	27992,18	41233,59	70631,1	79007,75	82545,656
21	21878,586	32772,77	47197,17	83859,16	85175,54	85651,711

22	29702,523	37892,88	54830,88	86462,63	91183,94	87877,859
23	30741,793	45611,72	57363,48	87314,02	91673,01	88056,43
24	40904,219	48618,36	59448,82	90073,73	93033,67	90875,172
25	37442,273	50766,09	64075,9	92562,47	94809,45	93189,641
26	45899,961	55269,25	64532,31	91294,29	95231,92	94443,344
27	47275,492	57852,51	67322,57	92257,65	94352,72	94298,664
28	44348,656	60331,17	68012,67	92509,34	93599,01	93059,484
29	44627,41	62496,73	70144,73	91386,98	92975,3	92579,43
30	53484,691	63879,17	68687,56	85636,52	92129,47	91497,969
31	50901,102	64725,36	67678,19	86428,11	89221,46	91281,023
32	48724,023	63414,88	66661,52	86600,19	89071,99	91077,781
33	50527,043	63048,37	65655,59	86093,52	89108,92	91209,328
34	49704,117	62572,8	64802	85904,41	88970,24	91443,211
35	48318,008	61039,06	63881,84	85941,19	89379,23	91725,023
36	52512,094	61796,97	63070,83	85667,22	89888,82	91697,266
37	62487,828	58822,79	62504,18	85012,98	90101,61	91505,812
38	43222,5	58495,5	62178,52	84426,17	90339,13	91299,562
39	57148,875	57410,79	61944,52	84041,45	90514,34	91101,125
40	59564,367	57787,34	61890,75	83752,11	90928,63	90965,625
41	55690,336	58304,77	61936,02	83629,27	91409,48	90814,297
42	52902,105	58063,65	62051,06	83687,36	92012,32	90730,734
43	53548,828	58482,96	62282,42	83767,55	91937,12	90724,094
44	52528,891	60170,91	62524,08	83922,55	92109,43	90656,367
45	51982,207	60984,03	62668,31	84298,29	92404,08	90602,125
46	51359,066	61194,53	62834,32	84667,38	92638,08	90656,438
47	51108,562	58533,89	63054,13	84972,48	92670,64	90621,734
48	50789,395	58682,65	63327,86	85155,15	92905,95	90618,109
49	50240,773	58487,91	63688,59	85339,62	93285,13	90652,5
50	49769,938	61181,69	63891,31	85735,53	93433,03	90678,469
51	49302,586	58445,27	63977,54	85861,97	93664,66	90680,156
52	49141,359	61088,9	64008,3	86404,2	93815,13	90648,062
53	48765,195	58331,64	64021,94	86555,5	94034,87	90665,305
54	48664,059	60857,22	64051,41	86559,98	94460,38	90706,875
55	48404,219	59524,77	64070,23	86780,31	94367,83	90713,461
56	48469,336	59082,43	64189,47	86943,19	94842,64	90606,047
57	48438,977	58643,91	64317,36	86663,52	95104,03	90536,328
58	48329,578	58864,77	64393,62	86804,37	95189,76	90414,719
59	48293,047	58907,66	64539,79	86883,29	95368,33	90358,297
60	48189,336	59044,02	64650,52	86835,45	95385,13	90031,43
61	48068,449	58928,32	64663,78	86734,04	95283,33	89795,195
62	47891,535	58867,73	64558,47	86752,95	95390,66	89603,25
63	47618,266	58793,95	64436,14	86772,56	94778,17	89280,805
64	47445,023	58760,61	64237,43	86791,41	94362,69	89117,516
65	47176,605	58703,18	63980,74	86725,06	94051,28	88776,742
66	46948,531	58734,09	63682,38	86574,4	93168,8	88466,391
67	46737,875	58755,93	63411,37	86402,52	92709,33	88272,078
68	46474,379	58666,99	63170,98	86233,09	92362,02	88084,891

69	46148,324	58615,45	62820,12	86095,39	91779,41	87932,492
70	45774,09	58517,5	62617,86	85909,12	91267,72	87891,391
71	45558,867	58399,06	62457,58	85713,52	90864,66	87166,445
72	45220,68	58287,4	62263,48	85404,54	90520,79	87133,766
73	44879,242	58119,23	62121,2	85282,51	90260,82	86958,281
74	44423,352	57942,82	62005,41	85030,4	90069,91	86751,57
75	44028,414	57719,68	61837,57	84893,11	89834,77	86508,836
76	43688,996	57506,07	61648,14	84651,02	89667,16	86349,367
77	43256,938	57224,24	61443,57	84485,35	89412,55	86200,562
78	42948,906	56949,43	61305,22	84324,06	89205,89	86026,125
79	42501,621	56621,93	61171,71	84126,27	88937,13	85965,008
80	42086,836	56245,99	61028,5	83959,27	88741,82	85733,297
81	41639,844	55938,72	60929,17	83740,78	88416,07	85705,07
82	41281,082	55623,8	60769,1	83512,28	88231,42	85377,875
83	40953,766	55337,98	60641,2	83340,73	87911,21	85398,531
84	40625,008	55085,74	62142,59	83118,6	87693,35	85093,016
85	40330,418	54853,54	60595,31	82972	87484,5	84902,922
86	40037,102	54670,26	59560,48	82769,39	87300,89	84887,68
87	39780,168	54544,02	59003,37	82636,48	87082,69	84781,18
88	39525,625	54414,57	58582,85	82499,43	86911,02	84375,109
89	39284,617	54286,24	58486,94	82350,61	86716,41	84308,703
90	39104,996	54180,8	58708,18	82245,91	86519,15	84098,445
91	38882,453	54046,29	58742,2	82094,36	86353,7	83931,328
92	38754,68	53943,77	58539,27	81981,91	86180,66	83699,461
93	38610,766	53833,4	58385,54	81809,4	86033,56	83591,422
94	38401,297	53761,04	58347,44	81812,91	85945,41	83456,945
95	38431,723	53690,15	58432,94	81667,21	85820,6	83380,109
96	38306,57	53651,13	58494,56	81584,36	85736,2	83246,211
97	38139,039	53618,7	58512,22	81284,44	85590,06	83168,172
98	38115,086	53596,71	58520,27	81088,82	85636,08	82953,344
99	37994,621	53582,64	58638,63	80931,12	85469,52	82706,922
100	37863,516	53543,09	58693,93	80870,33	85222,25	82575,078
101	37719,785	53511,48	58836,81	80511,05	85041,82	82461,773
102	37598,531	53573,88	58688,92	80453,3	84897,41	82367,781
vidurkis	40780,262	55358,22	60065,22	83001,65	87605,37	84822,78
kN	40,780262	55,35822	60,06522	83,00165	87,60537	84,82278
kW	113,16523	200,5733	381,2836	693,0638	781,7095	787,958
nuad kof	0,8	0,69	0,46	0,4	0,39	0,38

Didelio tikslumo aivapriekio pasipriešinimas be gumbo					
Pasispriešinimas R (N)					
Matavimo intervalas	Greitis m/s				
	2,22	2,5	3,34	3,48	3,53
1	6559994	5191609	11685766	12693590	13058451
2	97181,11	77490,76	150329,6	159657,4	164091,7
3	120611,9	102968,9	181628,9	190429,6	196796,8

4	87197,66	70769,2	142101	151066,3	156576,7
5	80648,31	63821,33	141459	153443,1	155523,7
6	85477,32	65943,73	147013,9	163937,1	165535,3
7	77418,57	59651,09	141963,8	155576	160611,3
8	70019,6	55623,77	131423,4	147341,8	151890,3
9	63086,98	49133,82	123697,7	137945,5	140611,1
10	55054,66	42506,18	113510,7	125369	131252,2
11	51255,11	40770	103138,5	116788,8	124620,8
12	43991,84	31873,16	103117,6	116830,4	125695,5
13	40501,7	25666,1	105049,2	114758,9	125868,8
14	41707,09	27514,19	106565,3	116793	127550,7
15	45539,15	31297,11	110209,8	120529,9	129525,1
16	48007,63	35908,88	111237,5	120306,8	127818,2
17	48020,23	38587,54	110860,1	121096,5	126861,4
18	50019,12	40672,86	111070,9	123396,3	125118,1
19	52427,88	43154,17	108918,4	122889	124582,6
20	54775,69	46445,57	107682	123543,8	124608,5
21	56659,33	48143,72	106784,2	122464,9	124029,6
22	58054,39	46933,99	104292,3	119466,6	121391
23	56268,59	45318,82	101578,6	117760,7	117965,3
24	54605,42	43054,14	99777,75	114574,7	112656,4
25	53387,83	40519,31	95790,58	109861,8	109592,8
26	50497,81	38933,05	91838,17	104302,5	103512,5
27	47070,95	35699,84	88651,17	99968,13	100082,6
28	43515,06	31752,02	84664,36	94230,19	95250,19
29	39924,31	28989,26	81278,11	91774,84	90183,88
30	36080,85	26093,63	78604,66	86588,8	85878,75
31	33076,05	23530,9	75864,73	83143,59	84268,88
32	31321,63	22323,2	74410,94	81627,34	78300,11
33	30313,16	21673	71359,8	78551,83	75069,8
34	29866,33	21548,6	69326,67	75967,26	72385,91
35	27440,1	21448,42	67173,51	73539,96	69240,59
36	26398,7	21239,51	64213,77	70808,63	66173,97
37	26717,61	21214,43	62154,04	67998,4	70401,02
38	24921,1	21331,31	59609,02	66244,48	59989,85
39	24242	20729,26	57212,23	64576,42	59019,16
40	25449,38	20120,91	55821,53	62916,97	56487,57
41	23082,1	19806,27	53402,78	61515,92	57244,23
42	23449,81	19052,57	51663,46	59877,68	52299,41
43	22909,32	19007,79	49836,2	58398,33	51121
44	22467,73	19368,73	47460,23	56850,35	49923,4
45	22521,06	19524,5	46727,41	55013,28	48582,8
46	22183,55	19956,17	45786,75	54121,31	46000,43
47	21436,57	20306,46	44227,9	54040,35	44489,52
48	21004,89	20087,16	43963,85	52957,49	43895,92
49	20534,06	20200,51	42353,86	52024,34	42715,86
50	19203,54	19653,68	41319,31	51057,45	40957,85

51	18553,27	19231,42	39725,15	50348,04	41242,44
52	18623,25	18697,81	39238,46	47978,02	39305,23
53	17525,59	18186,89	39192,61	46762,93	38827,42
54	17245	17688,91	37975,22	49147,77	36668,5
55	16578,4	17116,25	37720,23	47195,75	38781,55
56	16642,82	17337,74	36968,52	46515,06	35878,18
57	16880,34	18119,71	36931,79	49188,76	36387,1
58	18045,59	18734,9	37031,3	46275,09	34864,22
59	18312,15	19429,43	36965,72	46522,2	34872,35
60	18728,61	19184,56	37381,42	44779,06	34033,06
61	20221,97	18480,17	37655,93	44855,27	33155,75
62	20412,42	16673,77	38056,24	44607,77	32817,1
63	19988,29	14815,62	38243,02	42874,07	32509,22
64	19742,59	12812,36	38245,62	48501,59	32664,06
65	18756,56	10932,26	38489,81	42718,19	32141,46
66	17479,04	8948,467	38610,83	43017,63	32768,29
67	15776,98	7053,899	39104,39	44365,45	32325,11
68	15695,68	5815,36	39579,24	42512,24	32721,98
69	12247,79	5463,124	40208,72	42685,96	32647,97
70	11382,09	5938,53	41079,91	42024,49	32178,18
71	10653,05	5905,446	42143,14	43021,44	44553,62
72	11422,4	6590,599	42969,84	43848,59	32369,12
73	11824,31	7150,959	43258,85	43132,73	33266,66
74	10390,83	7408,426	43011,88	43779,44	33261,23
75	10130,63	7700,509	42322,81	45192,36	33729,38
76	11850,3	7789,807	40510,99	45327,78	34700,29
77	16202,86	7682,431	38263,43	44479,24	35121,07
78	12274,54	7096,413	36046,95	45839,36	35227,64
79	10937,26	7202,813	33923,93	46229,23	35031,78
80	10203,66	7263,466	32026,36	43691	35910,72
81	10336,02	6580,451	30528	43086,6	35939,02
82	9780,129	6488,018	29621,99	40363,39	34605,48
83	9151,191	5624,596	29169,32	40182,04	34365,07
84	8298,941	4718,004	29224,76	41998,15	33319,08
85	6797,251	4238,516	29495,37	34555,18	33783,32
86	8122,031	3192,5	29835,55	37575,48	32496,33
87	6474,525	2278,065	30088,97	36374,31	32986,34
88	6332,966	1667,595	30156,6	36003,19	32432,23
89	6021,103	873,0933	30099,68	36006,34	32921,26
90	4942,073	944,5176	29938,66	35208,16	31658,3
91	4569,74	531,9326	29663,68	35278,93	31566,43
92	3592,701	1162,701	29281,07	35569,03	31350,92
93	3697,044	1182,885	28917,91	36747,85	31701,21
94	3187,627	1819,476	28503,04	34302,07	30937,11
95	2727,112	2424,236	28056,5	34083,72	30366,38
96	2105,937	2893,218	27485,78	33903,13	31000,35
97	2126,111	3599,152	26827,34	33047,66	30307,76

98	2894,738	4196,134	26157,8	33292,32	29475,47
99	2581,498	4483,232	25422,09	32691,87	30998,39
100	2200,796	4543,027	24617,77	32109,54	31314,29
101	4046,974	4944,975	23891,68	31700,76	28638,57
102	3206,026	5306,753	23256,6	32822,25	29839,92
vidurkis	12850,22	17086	26583,42	32261,5	30319,81
kN	12,85022	17,086	26,58342	32,2615	30,31981
kW	35,65935	61,90579	221,9715	287,8719	289,2673
nuad kof	0,8	0,69	0,4	0,39	0,37

Didelio tikslumo laivapriekis su gumbu						
Pasispriešinimas R (N)						
Matavimo intervalas	Greitis m/s					
	2,22	2,5	2,92	3,34	3,48	3,53
1	26609130	33507770	8128578	10626362	11546318	67069248
2	91650,96	109259,7	141417,9	164234,4	10546318	179489,1
3	111363,6	127984	165019,1	199556	11146318	214609,9
4	83725,63	99539,31	131013,3	159670,1	11542318	180139,8
5	81756,2	97998,02	134898,2	162051,1	11546318	181106,4
6	74545,3	87846,95	131702,4	170098,3	183203,3	184609,6
7	62340,32	74424,41	119449	157742,3	209989,8	177283,4
8	53873,83	66355,53	104853,1	146626,6	173451,3	162416,5
9	47377,02	59856,99	96774,3	137399,2	178158,7	154996,6
10	45557,93	55388,04	88564,68	128180,4	179665,3	145130,5
11	41649,65	51383,61	80093,53	118576,1	174860,6	133080,1
12	33319,07	44790,62	76817,03	115476,8	156117,8	130059,3
13	28327,84	41558,41	76644,52	115361,9	154861,9	133586,3
14	32366,58	46229,59	80393,61	118860,5	143040,1	138339,2
15	36258,82	50291,06	83372,84	122090,5	133760	140002
16	38211,79	51521,1	84782,06	120842,6	130074,1	141038,4
17	37026,78	48286,34	83837,63	121615,6	129257	140420,5
18	35733,49	47189,39	82141,66	119196,5	130442,5	138270,6
19	37093,87	46490,07	79515,88	117007,2	132552,9	135538,2
20	36799,15	47184,71	78081,86	113408,6	132592,2	131587
21	36492,95	45595,07	75784,78	110158,7	130717,5	126347,8
22	34081,66	42765,99	71683,41	106803,8	125797,2	120907,6
23	32332,22	40275,25	68607,84	102724,9	122311,7	116932,8
24	27347,52	37697,48	65471,86	100386,9	117225,7	111568,5
25	23218,5	34613,08	61613,46	95978,14	112382,6	106067,8
26	20437,25	31180,92	57949,98	92935,84	108584,6	102287,3
27	17010,2	27005,23	55589,85	89327,96	105651,1	96587,57
28	14307,44	22789,9	52466,69	85355,92	101833,6	91568,48
29	12000,82	19702,3	48850,83	82363,1	98788,3	86651,69
30	9561,538	16692,38	46028,13	78695,73	95890,21	81676,16
31	7858,391	13426,39	43572,61	74452,89	92260,55	76466,84
32	8014,26	11034,88	40514,26	70873,79	88989,95	72450,61

33	8696,288	9399,495	38294,18	66910,92	85373,88	67488,43
34	9368,52	7163,808	34958,4	63755,07	82626,56	63258,18
35	11056,39	7227,374	32834,53	60235,52	78486,03	59040,06
36	13035,11	5260,131	30156,53	56757,25	75235,94	55616,52
37	14845,83	4106,185	28750,97	54486,22	72062,68	51908,78
38	15909,83	4118,253	26917,86	50940,69	69646,7	49012,06
39	16226,08	4798,282	25192,98	48908,45	66532,14	46246,58
40	16251,81	4960,046	23507,41	46475,48	63671,22	43357,79
41	16313,82	5956,338	22146	44327,33	60761,59	40704,13
42	16313,26	6896,411	20525,06	42204,65	58528,54	37980,04
43	16502,82	8513,919	18361,23	40120,75	55712,2	35894,31
44	16438,78	8826,475	17909,38	40656,56	54388,75	33601,5
45	16606,12	9635,424	16882,06	36496,94	50782,48	31737,92
46	16589,29	10084,87	15033,86	35094,09	48893,61	30538,98
47	16435,74	10768,29	14686,47	34315,91	47100,2	28631,86
48	15835,47	11103,13	14393,46	32466,41	45383,47	27893,12
49	15222,95	11049,13	14034,68	32673,63	44559,47	26203,08
50	14763,95	11182,66	12830,49	31390,14	40982,29	25253
51	14742,08	11454,5	12213,12	29171,95	39561,37	24325,29
52	15167,32	11287,81	12074,56	28480,92	37597,02	22951,73
53	16540,77	12400,17	10171,44	26855,77	35954,32	23279,43
54	19297,87	13307,6	9875,122	26165,44	34764,95	22471,41
55	22655,16	14771,26	10018,73	24814,27	33296,51	22356,65
56	24954,91	16699,77	9019,621	24408,27	31969,5	21705,99
57	24898,39	18972,93	9143,792	24414,21	31205,18	21744,47
58	22587,98	21279,54	9430,763	22292,48	30529,59	21285,03
59	19025,49	22132,74	9231,471	23134,04	29389,04	21228,66
60	15355,11	21933,52	9640,43	22326,63	17521,47	21747,15
61	12216,36	19737,08	11111,39	23403,94	26885,36	22216,65
62	8942,398	17407,41	11784,11	21379,42	27055,24	22718,81
63	6204,895	13689,62	12080,61	22196,7	25612,51	23212,8
64	3937,992	11010,38	13007,79	21853,8	24428,28	23706,8
65	2454,953	7984,139	13211,03	21083	24073,63	24200,79
66	2708,115	5012,043	12561,31	21774	23407,88	24694,79
67	4150,945	2965,953	11207,45	22163,5	23529,31	23279,43
68	6372,659	2136,916	9157,545	23931,06	22938,95	22471,41
69	8408,215	2456,657	8076,155	24698,52	23086,92	22356,65
70	10103,79	4545,48	6178,398	26187,17	23029,81	21705,99
71	10228,21	6328,969	4346,994	26432,62	23484,79	21744,47
72	9936,546	8500,503	3071,073	26560,26	24755,59	21285,03
73	9131,114	9978,371	2304,348	26764,87	24200,59	21228,66
74	8465,481	10772,78	2268,905	25339,41	25830,57	21172,29
75	8103,046	10388,87	1695,829	24299,21	26754,81	21115,92
76	6605,915	10945,38	1756,226	22762,11	27521,16	21059,55
77	5076,231	10545,83	1867,477	21642,79	28061,27	21003,18
78	3887,051	10115,77	1704,641	20327,62	28472,53	20946,81
79	3324,168	9549,251	2061,491	19449,52	29026,95	20890,44

80	2367,554	8979,162	1576,807	19226,18	29207,28	24694,79
81	1158,057	8120,327	1407,237	18668,3	28215,8	23279,43
82	303,9463	7598,856	1056,348	18555,5	27304,48	22471,41
83	785,7168	6915,129	892,668	18485,7	26242,13	22356,65
84	2343,916	6111,895	720,8008	18337,79	24692,9	21705,99
85	3055,943	5961,731	321,7734	18428,53	23881,97	25750,61
86	4028,174	4856,701	134,3887	18439,38	23187,69	26205,46
87	4952,634	4136,194	120,6348	18013,47	22624,24	26660,31
88	4982,485	3479,324	611,0664	17290,85	22503,59	27115,16
89	5506,513	2648,19	741,3965	17271,26	22619,17	27570,01
90	5369,237	2329,817	1061,226	17142,35	22831,54	28024,86
91	4859,106	2196,38	1139,656	16228,93	22728,91	28479,71
92	3997,178	2347,688	1276,991	16182,46	22948,52	28934,55
93	3207,045	1860,037	1278,898	15648,21	22812,75	29389,4
94	2177,159	2302,523	1509,733	14976,43	22467,38	29844,25
95	822,105	2523,222	1693,692	14701,89	22193,37	30299,1
96	230,8032	2837,085	1726,52	14020,51	21928,29	30753,95
97	1637,487	3251,636	1916,389	13515,1	21657,06	31208,8
98	2974,903	3945,43	2027,878	13023,33	21304,9	31663,65
99	2742,447	4053,105	2230,534	12489,81	20771,51	32118,5
100	3360,183	5077,539	2189,466	12282,09	20552,98	32573,35
101	3514,624	4977,346	1933,139	12018,43	20034,53	33028,2
102	3391,363	6090,976	2088,022	11327,9	19904,04	33483,04
vidurkis	8939,902	7289,499	11436,6	21518,04	24764,22	25263,58
kN	8,939902	7,289499	11,4366	21,51804	24,76422	25,26358
kW	24,80823	26,41123	72,59755	179,6756	220,973	234,6853
nuad kof	0,8	0,69	0,46	0,4	0,39	0,38

Didelio tikslumo pasipirešinimo skaičiavimai C tipo laivapriekiniam gumbui						
Pasispriešinimas R (N)						
Matavimo intervalas	Greitis m/s					
	2,22	2,5	2,92	3,34	3,48	3,53
1	4640299	5876456	8010143	10486959	11719939	11372868
2	93622,34	112073,9	142732,6	170136,3	185215,3	181665,5
3	116952,6	133683,4	165644,3	198405,5	213332,8	211517,1
4	76098,69	92467,44	119711,1	157323,1	173961,6	172560,4
5	66082,77	79927,81	111163,5	144836,8	160950,1	158036,4
6	69192,66	86236,93	114898,5	155063	170881,1	165395,2
7	65214,02	81620,47	109908,9	151961,4	167540,2	163467,7
8	56414,49	72691,36	100306,4	140980,1	160223	152188
9	49755,83	65445,38	92248,16	131005,3	152749,6	146801,2
10	43413,43	57267,49	81510,13	123453,9	143654	138201,7
11	42307,97	54114,89	74325,54	113430,1	128359,3	129517,4
12	36364,63	46339,62	68600,39	109179,5	129441,6	126026,8
13	29936,82	39698,1	67628,2	107692,8	131135,5	127044,6
14	29062,44	41079,26	69163,41	110696,6	136215	129736

15	31636,18	44753,03	73293,65	113597	138055	130229
16	36387,47	47525,67	74867,92	112377,8	137961,4	132548,8
17	39759,28	49754,79	74206,16	111661,1	135808,2	131651,1
18	41905,91	52237,38	74613,86	112814,2	135580,2	130545,4
19	44316,47	55936,33	75801,88	111992,1	134834,3	129715,1
20	47578,36	57690,45	79104,84	108677,5	131442,3	128739,4
21	50453,45	59320,88	80463,36	106755,3	130780	124688,3
22	49141,76	60291,42	78603,53	104121,6	130113,6	121145,3
23	46961,42	58293,67	78118,14	100992,6	126451,7	116413,4
24	44163,11	56393,32	78915,95	98265,33	122627,3	113536,6
25	41878,7	53730,95	78151,9	94661,5	116000,2	108734,6
26	39548,94	51727,8	73017,06	90943,13	110188,9	105439,5
27	36205,01	46550,15	69061,31	87468,47	104602,2	101133,3
28	32593,92	41946,37	67579,76	83947,11	100598,9	98435,03
29	29754,42	37720,11	59638,88	82179,47	95499,61	93646,4
30	26312,45	35067,81	61592,58	80023,27	92006,14	90345,8
31	22584,56	31933,37	57061,59	76259,78	88482,09	87083,6
32	20763,03	28785,58	54585,27	74432,71	85296,44	86076,35
33	19921,47	27720,74	49440,46	72939,56	82414,02	81567,11
34	20017,02	24985,33	49638,36	72020,88	80675,5	79894,43
35	20181,7	23545,59	43402,59	68117,52	79675,85	78452,9
36	20577,43	21831,1	41055,6	66533,2	68633,59	76093,64
37	21002,85	21446,59	37189,38	64212,8	71939,16	73725,02
38	21692,15	20950,28	34962,77	61099,18	68788,02	70950,07
39	21692,91	22368,56	32927,97	58790,58	68536,75	68581,3
40	21775,41	22193,66	29885,02	57868,91	65108,11	66913,89
41	21994,65	21380,03	28616,56	55360,4	62913,74	64836,31
42	21823,8	20862,73	27347,86	51812,18	62236,94	62976,55
43	21906,2	21247,44	25376,06	49741,06	59410,68	61564,73
44	22419,04	21312,48	25517,36	48119,37	57366,44	61001,12
45	23051,68	20926,87	23787,56	45560,93	56684,45	58998,09
46	23794,82	20884,82	23849,3	44960,04	54316,83	57675,66
47	24468,59	20550,31	22885,71	42879,07	55352,92	56440,53
48	24966,26	20865,37	21040,79	41046,59	52134,7	55394,51
49	25200,21	20102,75	19984,49	39929,99	53309,34	54612,46
50	25052,98	19637,54	19691,48	38276,89	50238,52	54138,54
51	24534,65	18968,71	19702,56	38071,39	50136,22	53348,26
52	24228,88	19058,81	18734,15	34917,55	48638,6	52381,01
53	23966,91	19490,19	17933,57	34428,27	47244,43	51883,07
54	23914,56	19261,93	17339,79	32711,23	46890,17	50924,1
55	23792,02	18770,02	17122,21	31080,61	45736,89	50203,84
56	23969,8	19050,89	16256,91	31379,7	46253,18	50239,7
57	25100,97	18889,61	16139,06	28354,81	44158,39	49737,06
58	25900,2	19790,15	15917,69	28094,7	43825,57	49122,82
59	26233,35	20628,17	15385,51	27391,66	43447,3	48655,66
60	25101,88	20839,68	14999,33	27633,36	43893,67	48504,35
61	23959,41	21239,95	15828,14	25809,72	42674,25	48231,61

62	21609,28	21022,86	16843,13	25728,42	41973,33	48171,69
63	19444,89	21454,37	17891,88	25805,87	42045,09	48325,36
64	17069,64	19603,84	19175,72	25370,17	41989,06	48373,09
65	15226,73	18332,04	20285,28	25213,71	41501,48	48811,99
66	13156,28	17575,24	16959,86	24639,75	42522,57	49188,4
67	11634,91	13451,48	21404,12	27259,02	42158,7	49800,42
68	10917,06	13097,32	20739,21	25558,97	42599,29	50846,59
69	11083,46	11162,83	19604,53	26859,55	42306,98	51628,05
70	11089,44	10173,25	16911,93	26547,85	42620,45	51553,51
71	11788,17	8743,223	17166,34	26974,85	42520,06	52626,02
72	12569,2	8177,283	13587,24	27572	44130,3	54228,76
73	13456,33	7782,006	11597,16	28055,73	44212,19	56123,39
74	13779,84	8288,147	10093,39	29580,44	45378,78	58554,65
75	13878,19	7936,472	9353,648	28146,23	45288,13	58656,39
76	13689,25	7904,927	9076,53	27907,11	47087,54	58845,51
77	13130,15	7827,782	9614,658	26509,71	48373,27	59414,19
78	12934,89	7058,958	9755,701	27047,72	47867,13	57294,9
79	12989,57	6843,381	10503,04	25553,77	48524,9	57502,2
80	12149,75	6291,405	10682,77	22596,86	48111,23	56098,77
81	11823,3	6018,522	11491,46	19061,86	46988,38	54328,93
82	11285,89	5795,97	11749,99	20444,55	46504,13	52887,68
83	10669,93	5238,552	11967,6	20278,94	46187,72	51723,22
84	9730,717	5179,503	12366,79	19832,36	45115,45	50709,66
85	8774,023	4547,089	11010,42	19256,69	44630,81	50057,42
86	7914,374	4145,393	12572,51	20074,06	44676,38	49632,53
87	6616,902	3475,25	11611,53	18611,25	43388,1	49471,71
88	5663,826	2174,132	12280,72	18901,6	42761,73	49704,84
89	5066,828	1342,314	11214,38	18266,68	42824,7	49339,53
90	4405,291	443,1475	11541,75	18100,98	42977,53	48448,71
91	4600,217	168,4453	10161,1	17758,08	42303,59	48881
92	4553,507	985,6523	9921,774	16579,64	42338,99	48186,8
93	4632,629	1493,673	10229,56	16910,49	42083,41	47495,87
94	4697,823	1683,684	9918,337	16029,85	41914,17	46929,2
95	5252,395	1873,603	8622,347	16042,43	41079,48	46459,21
96	5316,148	1771,571	7003,812	15103,29	40849,09	45026,22
97	5819,707	1655,769	7565,224	15109,33	40135,93	44858,8
98	6633,087	1534,013	7470,875	14332,59	39694,31	44035,02
99	6580,607	1325,846	7298,764	14058,25	38967,2	43158,63
100	6752,276	1126,514	7114,596	14078,91	38205,17	42745,11
101	6888,424	807,626	7071,458	13476,99	37982,07	42544,54
102	7502,652	284,1006	6892,941	12760,47	37686,72	42439,77
vidurkis	5981,706	5418,499	9416,783	15833,97	40786,94	46016,88
kN	5,981706	5,418499	9,416783	15,83397	40,78694	46,01688
kW	16,59924	19,63224	59,7761	132,2137	373,5225	416,5118
nuad kof	0,8	0,69	0,46	0,4	0,38	0,39