

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS

Jūrų technikos fakultetas

Laivo inžinerijos katedra

Andrej Šilov

**PROJEKTUOJAMO LAIVO
EIGUMO PRAKTINIO
VERTINIMO GALIMYBIŲ
TYRIMAS**

Laivų projektavimo ir statybos studijų programos
magistro baigiamasis darbas

Klaipėda, 2013

MAGISTRO BAIGIAMOJO DARBO LYDRAŠTIS

Pildo magistro baigiamojo darbo autorius

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

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

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

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

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

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

Baigiamasis darbas įregistruotas katedroje
(data)

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

Pildo Laivo inžinerijos katedros, kuriojančios studijų programą, vedėjas

Magistro baigiamąjį darbą ginti
(įrašyti – leidžiu arba neleidžiu)

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

Recenzentais skiriu
(įrašyti recenzento vardą, pavardę)

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

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

SANTRAUKA

Šilov A. Projektuojamo laivo eigumo praktinio vertinimo galimybių tyrimas. Laivo inžinerijos magistro studijų programos baigiamasis darbas. Darbo vadovas: dr. doc. J. Čerka, Klaipėdos universitetas: Klaipėda, 2013. – 53 p.

Raktažodžiai: vandens pasipriešinimas, modeliniai bandymai, automatizuota simuliacinė programa FLOW 3D.

Darbe analizuojami laivo pasipriešinimo nustatymo būdai, metodai. Aprašomas praktiškai atliktas karinio laivo 5415 pasipriešinimo modelinis bandymas, bei pateikiami bandymo rezultatai. Naudojantis FLOW 3D simuliacine programa modeliuojamas virtualus laivo 5414 pasipriešinimo bandymas, bei pateikiami virtualaus bandymo rezultatai. Taikant dažnai naudojamus praktikoje apytikrius vandens pasipriešinimo skaičiavimo metodus vertinamas vandens pasipriešinimas laivo 5415 judėjimui. Palyginami apytikrių skaičiavimo metodų, bei realaus ir virtualaus pasipriešinimo eksperimentų rezultatai. Padaromos išvados, kaip tikslingai parinkti optimalų laivo eigumo preliminarus vertinimo metodą laivo projektavimo metu.

SUMMARY

A. Silov. Ship powering practical assessment of feasibility study on design stage. Ship engineering master degree project. Project supervisor dr. doc J. Čerka, Klaipeda University: Klaipeda, 2013. – 53 page.

Keywords: water resistance, modeling test, automated simulation FLOW 3D program.

The most used ship's resistance research techniques and methods were analyzed in current work. Were described war ship 5415 practical resistance modeling test and submitted test calculations. Using automation simulation program FLOW 3D were created a virtual ship resistance test and also submitted test calculations. Using approximate water resistance calculation methods was evaluated water resistance of the vessel 5415. Were compared the result of approximate resistance calculation method's, real and virtual resistance test experiment's. Were made conclusions, how to select the most optimal ship powering preliminary assessment method on the design stage.

Laivų projektavimo magistro studijų (621H52001) baigiamasis darbas

Užduotis studentui: *Andrej Šilov*

Temos pavadinimas: Projektuojamo laivo eigumo praktinio vertinimo galimybių tyrimas

Darbo sudėtis

Įvadas

1. Teorinė dalis

1.2. Problemos analizė

1.3. Laivo eigumo teorinio vertinimo galimybės klasikinės teorijos pagrindu (*praktinis realizavimas – likusio pasipriešinimo metodas, bangavimo pasipriešinimo metodas* ⇔ *AutoPower pagrindu*)

1.4. Laivo eigumo teorinio vertinimo galimybės hidrodinaminės teorijos pagrindu (*praktinis realizavimas – CFD skaičiavimas*)

2. Empirinė dalis

2.1. Eksperimento planas arba programa (*tikslas, tyrimo objektas, reikalavimai modeliui, reikalavimai laboratorijai, reikalavimai matavimo įrangai, eksperimento eiga, rezultatų apdorojimo metodika*)

2.2. Modelio gamyba ir paruošimas eksperimentui

2.3. Reikiamos laboratorinės įrangos parinkimas

2.4. Eksperimentinis tyrimas

2.5. Eksperimento rezultatų apdorojimas

3. Rekomendacijos išankstiniam laivo pasipriešinimo vertinimui

Išvados

Literatūra

Darbo vadovas (-ė):
(vardas, pavardė, parašas)

LENTELIŲ SĄRAŠAS

1 lentelė. Eigumo tyrimui parinktų laivų tipai.....	19
2 lentelė. Tiriamojo objekto DTMB 5415 parametrai.....	33
3 lentelė. Fizikinių dydžių kitimo santykiai.....	35
4 lentelė. Modelinio bandymo pasipriešinimo rezultatai.....	43
5 lentelė. Natūralaus laivo pasipriešinimo priklausomybė nuo greičio R1.....	44
6 lentelė. Natūralaus laivo pasipriešinimo priklausomybė nuo greičio R2.....	46
7 lentelė. Eksperimentų rezultatų palyginimas.....	48

PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Pasienio sluoksnis	14
2 pav. Išilginio pilnumo koeficiento priklausomybė nuo Fr skaičiaus.....	16
3 pav. Likutinio ir trinties pasipriešinimo priklausomybė nuo ψ	17
4 pav. Vandens pasipriešinimo priklausomybė nuo δ	18
5 pav. Haroldo likusio pasipriešinimo nustatymo grafikas.....	22
6 pav. Santykinio laivo ilgio priklausomybė nuo laivo vandentalpos.....	23
7 pav. CFD ir bandymo baseino testo kainų ir rezultatų tikslumo prognozavimo grafikas...	26
8 pav. Fizinio bei virtualaus modelinių bandymų rezultatų palyginimas.....	27
9 pav. Kreno kampu palyginimo rezultatai gauti realaus eksperimento metu ir naudojant CFD programinę įrangą.....	28
10 pav. Modelio tinklelio kūrimas.....	29
11 pav. Korpuso paviršius pritaikius sukurtą tinklelį.....	30
12 pav. Greičio ir slėgio kitimas šalia laivo korpuso.....	30
13 pav. Bandymo baseinas.....	31
14 pav. (K) Bangų slopintuvas, (D) Bangų generatorius.....	32
15 pav. <i>Qualisys</i> judesio fiksavimo kamera.....	32
16 pav. Tiriamasis objektas DTMB 5415.....	33
17 pav. (K) Automatizuotas modelio išpjovimas, (D) užbaigtas modelis.....	34
18 pav. Laivo modeliai ir ant jų paviršiaus žymimos linijos - atitinkančios španhautus ir vaterlinijas.....	35
19 pav. Nuosavų svyravimų eksperimentas.....	36
20 pav. Krenavimo bandymas atliekamas panaudojant inklinografą.....	37
21 pav. Dinamometro kalibravimas.....	38
22 pav. KHL laboratorijoje naudojami dinamometrai.....	39
23 pav. Greičio fiksavimo sistema.....	40
24 pav. Pasipriešinimo bandymo schema.....	40
25 pav. Pirmuoju ir antruoju metodu gautų pasipriešinimo rezultatų palyginimas.....	46
26 pav. Rezultatų palyginimo grafikas.....	

TURINYS

IVADAS	9
I PROBLEMOS ANALIZĖ	11
1.1. Vandens pasipriešinimo susidarymas ir dedamosios dalys	11
1.2. Bangavimo pasipriešinimo (Holtropo) metodas	19
1.3. Likusio pasipriešinimo metodas.....	21
1.4. CFD praktinis realizavimas.....	24
II EMPIRINĖ DALIS	31
2.1. Eksperimento tikslas, laboratorinės įrangos apžvalga	31
2.2. Modelio gamyba ir paruošimas eksperimentui	33
2.2.1 Matavimo prietaisų kalibravimas.....	37
2.3. ITTC reikalavimai pasipriešinimo eksperimentui	38
2.4. Eksperimentinis tyrimas	41
2.5. Pasipriešinimo eksperimento rezultatų apdorojimas	42
2.6. Eksperimentų rezultatų įvertinimas	47
IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS	50
LITERATŪRA	52
PRIEDAI	54

IVADAS

Laivininkystė Žemėje egzistuoja jau keletas tūkstančių metų, tačiau burlaivių laikais mokslo apie laivo eigumą nebuvo, bet žmonės jau žinojo apie vandens pasipriešinimą. Dar senovėje laivų korpusų formos turėjo aptakius apvadus, tai rodo, jog žmonės turėjo pradinį supratimą apie judančių skystyje kūnų pasipriešinimą. (А. Готман, 2010).

Pirmu moksliniu darbu apie vandens pasipriešinimą laikomas Leonardo Da Vinčio „Apie judėjimą ir vandens matavimą“. Darbas buvo parašytas XV amžiaus pabaigoje, tačiau publikuotas tik po 300 metų jau po autoriaus mirties.

1687 metais I. Niutonas sukūrė teoriją apie judančių kūnų pasipriešinimą skystoje aplinkoje, kur jis pasiūlė suskirstyti pasipriešinimą į tris dalis: vandens tankis, dalelių sukibimas, trintis.

Ypatinga vietą ir svarbą vertinant laivo jūrines savybes turi eksperimentiniai tyrimai. Tai vienas iš pagrindinių etapų kuriant naujus laivus, laivinę techniką, gerinant laivų jūrines bei eksploatacines savybes (Čerka J., 2009).

1756 metais anglų mokslininkas Berdas pirmas atliko modelinį eksperimentą 10 metrų bandymo baseine.

1871 metais Viljamas Frūdas pastatė pirmąjį bandymo baseiną su vežimu, bei pasiūlė pirmąjį mokslinį metodą modelinių bandymų rezultatams perskaičiuoti į natūrinius. Remiantis šiuo metodu visas pasipriešinimas dalinamas į dvi dalis: trinties pasipriešinimas, kurį reikia apskaičiuoti matematiškai ir likutinis pasipriešinimas, kurį Frūdas pasiūlė modeliuoti.

Pagrindinės priežastys, dėl kurių reikia atlikti modelinius arba natūrinius laivo jūrinių savybių tyrimo eksperimentus, yra:

- patikimų teorinių metodų laivo jūrinėms savybėms įvertinti nebuvimas;
- ne visuomet įmanomas išorinių veiksnių poveikio tikslus teorinis įvertinimas;
- būtinybė patikrinti naujas skaičiavimų metodikas, naujas teorijas;
- siekis gauti duomenų naujiems empiriniams skaičiavimo metodams (Čerka J., 2009);

Nuo XV amžiaus, kai vandens pasipriešinimą pradėjo nagrinėti kaip atskirą mokslą, sukurta daugybė pasipriešinimo skaičiavimo metodų, teorijų. Dar neseniai natūriniai eksperimentai buvo laikomi pačiais patikimiausiais bei efektyviausiais, tačiau šiais laikais, kai technologijos vystosi ypač sparčiai ir skverbiasi praktiškai į visas gyvenimo ir gamybos sferas, neišvengiamai plečiasi ir laivų projektavimo automatizuotos sistemos. Per paskutinį dešimtmetį atsirado labai daug įvairiausių programų skirtų ne tik laivų korpusui, įrangai, bet ir laivo jūrinių savybių eksperimentų modeliavimui.

Flow-3D - viena populiariausių pasaulyje programų skirtų hidrodinamikos uždaviniams spręsti. Flow-3D leidžia modeliuoti įvairius skysčio tekėjimo procesus, todėl gali būti naudojama ir laivo pasipriešinimui modeliuoti. Taigi šiuolaikinės kompiuterinės technologijos suteikia galimybę su virtualiu modeliu elgtis lyg su realiu objektu, imituoti įvairiausias realias situacijas (Flow 3D, 2005).

Baigiamojo darbo tikslas:

Projektuojamo laivo eigumo preliminarus vertinimo optimalios metodikos sudarymas.

Šiam tikslui realizuoti numatomi tokie darbo uždaviniai:

1. Išanalizuoti laivo eigumo preliminarus vertinimo problemą.
2. Išanalizuoti bei atlikti fizinį eksperimentą 5415 laivo modelio pasipriešinimui nustatyti.
3. Išanalizuoti bei atlikti matematinį CFD (Computational Fluid Dynamics) eksperimentą 5415 laivo modelio pasipriešinimui nustatyti.
4. Išanalizuoti apytikrius pasipriešinimo skaičiavimo metodus.
5. Palyginti laivo eigumo vertinimo metodus.
6. Remiantis eksperimentų rezultatais nustatyti koks laivo pasipriešinimo nustatymo metodas optimalus ir duoda patikimus rezultatus.

Pasirinkti tokią baigiamojo darbo temą lėmė galimybė atlikti mokslinę tiriamąją praktiką Kelvino hidrodinamikos laboratorijoje Stratklaido (Strathclyde) universitete. Šioje laboratorijoje yra bandymų baseinas, aprūpintas įranga, leidžiančia tirti laivo jūrines savybes susijusias su laivo stabilumu, eigumu ir supimusi. Laboratorijoje atlikome praktiką, per kurią dalyvavome vandens pasipriešinimo, supimosi, bangų poveikio eksperimentuose. Praktiškai atlikome vandens pasipriešinimo eksperimentą fiksuodami ir apdorodami bandymo rezultatus.

I. PROBLEMOS ANALIZĖ

1.1. Vandens pasipriešinimo susidarymas ir dedamosios dalys

Laivo eigumo kokybė turi didžiausią įtaką laivo plaukiojimo saugumui, bei ekonominiams rodikliams. Kaip jau žinoma, laivo jūrines savybes tiria mokslas laivo teorija, kuris susideda iš dviejų dalių: statikos ir dinamikos. Būtent laivo dinamika tiria laivo eigumo charakteristikas.

Laivo eigumas – tai savybė pasiekti reikiamą greitį sunaudojant kuo mažiau galios. Plaukdamas laivas patiria vandens ir oro pasipriešinimą. Kadangi vandens tankis yra maždaug 800 kartų didesnis už oro tankį, laivui plaukiant nedideliu $10 \div 20$ mazgų greičiu, vandens pasipriešinimas gerokai didesnis už oro. Sprendžiant laivo eigumo uždavinius būtina atsižvelgti į vandens pasipriešinimą laivo judėjimui ir suprojektuoti optimalų varytuvą. Laivo eigumas priklauso nuo dviejų tarpusavyje susijusių dalykų: vandens ir oro pasipriešinimo laivo judėjimui bei laivų vartytuvų. Laivo eigumo skaičiavimų tikslas – nustatyti vandens ir oro pasipriešinimą laivo judėjimui bei parinkti tokius propulsinio komplekso parametrus, kad pagrindinio variklio galia būtų efektyviai naudojama. Vandens ir oro pasipriešinimas nustatomas, remiantis modelių bandymų rezultatais arba apskaičiuojamas taikant apytikslius metodus.

Vandens pasipriešinimas – tai vandens spaudimas ir trintis į laivo korpusą jam judant. Kadangi vandens spaudimas veikia kiekvieną laivo korpuso povandeninės dalies, visų po vandeniu esančių atsikišusių dalių paviršių, galima sakyti, kad trintis priklauso nuo laivo išmatavimų, povandeninio korpuso švarumo ir šiurkštumo. Vandens pasipriešinimas taip pat priklauso nuo laivo povandeninės dalies korpuso formos, bangavimo. Baigiamajame darbe analizuosime bei modeliuosime laivo pasipriešinimą, todėl turime susipažinti su laivo pasipriešinimo nustatymo teoriniais bei eksperimentiniais metodais (V. Stonkus, 2009).

Praktikoje dažniausiai naudojami 5 laivo pasipriešinimo nustatymo metodai:

1. Analitinis arba CFD skaičiuojamosios skysčių dinamikos metodas - naudojant šį metodą sprendžiamos hidrodinamikos lygtys, kad nustatyti vandens prie laivo paviršiaus greičio ir slėgio dydžius esant konkrečiam užduotam laivo greičiui. Šis metodas ilgai nebuvo taikomas. Laivo pasipriešinimą dažniausiai skaičiavo naudojantis pasienio sluoksnio teorija, kuri reikalauja eksperimentinių duomenų. Šiandieninės skaičiavimo technologijos leidžia paskaičiuoti klampumo pasipriešinimą pasienio sluoksniui, bei bangavimo pasipriešinimą.

2. Modeliniai bandymai atliekami testuojant konkretaus laivo modelį. Šie bandymai iki šių dienų išlieka patys patikimiausi, bet ir patys brangiausi, bei užtrunka ilgai. Laivo 5415 vandens pasipriešinimui nustatyti naudosime šį metodą, todėl detaliau jį apžvelgsime žemiau.

3. Natūralaus dydžio tiriamo laivo buksyravimo bandymas: atliekamas buksyruojant vieną laivą kitu. Vykdomi gana retai, nes didelių tonažų stambiagabaritiniais laivams sunku arba tiesiog neįmanoma parinkti buksyravimo laivą. Buksyravimo bandymai atliekami patikrinti modelių bandymų rezultatus.

4. Propulsiniai bandymai: tai pastatytų laivų bandymai nustatant laivo greitį prie skirtingų pagrindinio variklio darbo režimų. Jie neleidžia tiesiogiai nustatyti laivo pasipriešinimą, bet leidžia patvirtinti arba paneigti atliktų laivo eigumo skaičiavimo teisingumą. Šis būdas leidžia išsiaiškinti paklaidų priežastis, bei įnešti pataisymus ir patobulinti skaičiavimo metodikas.

5. Apytikriai metodai - metodai, kurie pagrįsti serijinių eksperimentų statistiniais duomenimis. Šie metodai nereikalauja tikslios informacijos apie laivo korpusą, bei naudojami pradinėse projektavimo stadijose. Apytikrius metodus galima suskirstyti į grupes: viso pasipriešinimo skaičiavimą, likusio pasipriešinimo skaičiavimą, bangavimo pasipriešinimo skaičiavimą, bei pasipriešinimo skaičiavimą pagal prototipo duomenis. Viso pasipriešinimo skaičiavimai yra mažai patikimi, nes vienu metu įvertinti Frūdo, Reinoldso ir kitų laivo povandenines dalies faktorių įtaka praktiškai neįmanoma. Likusio pasipriešinimo skaičiavimai leidžia pasiekti gana patikimų rezultatų, nes jų paklaida gali būti susieta tik su likusio pasipriešinimo nustatymo netikslumais, o trinties ir išsikušusių dalių pasipriešinimas nustatomas taip pat patikimai, kaip ir modelių bandymų metu. Bangavimo pasipriešinimo metodas, kaip ir likusio, yra gana patikimas, bet reikalauja nemažai pradinės informacijos apie laivo povandeninės dalies architektūrą. Pasipriešinimo skaičiavimas pagal laivo prototipą yra vienas patikimiausių metodų, tačiau reikalauja tinkamo laivo-prototipo. Visi apytikriai metodai sudaryti remiantis modelių bandymų rezultatais. Baigiamajame darbe taikysime apytikrį bangavimo pasipriešinimo (Holtropo) ir likusio pasipriešinimo skaičiavimo metodus bei apskaičiuosime 5415 laivo pasipriešinimą, todėl šiuos metodus apžvelgsime detaliau (Войткунский И., 1988).

Projektuojant būsimo laivo korpusą būtina išspręsti dvi pagrindines problemas:

a. Kuo tikslesnis laivo viso pasipriešinimo įvertinimas užduotai laivo korpuso formai. Šiai problemai išspręsti naudojamo aukščiau minėti pasipriešinimo nustatymo metodai.

b. Optimalių laivo formos apvadų parinkimas. Šiai problemai spręsti atliekami bandymo eksperimentai su įvairių formų apvadais.

Vandens pasipriešinimo nustatymo metodų šiai dienai egzistuoja nemažai. Kiekvienas iš jų turi savo privalumų bei trūkumų. Pagrindinis kiekvieno metodo faktorius tai rezultatų patikimumas ir kaina. Pasaulinės laivų statybos rinkos lyderiai formos korpuso pasipriešinimui nustatyti naudoja patikimiausią, bet tuo pačių brangiausią metodą - bandymų baseinus. Kai projektuojamojo laivo modelis, sumažintas tam tikru masteliu, testuojamas bandymo baseine. Lietuvos laivų statytojai

bandymo baseino bei reikiamos įrangos eksperimentui atlikti šiuo metų neturi, todėl tokio tipo laivo pasipriešinimo nustatymo metodika Lietuvoje nenaudojama. Kaip alternatyvą bandymo baseinui, galima būtų naudotis CFD programine įranga. CFD (Computational Fluid dynamics) - tai skysčio dinamikos modeliavimo programa, kurią naudojant galima modeliuoti virtualius pasipriešinimo, laivo stovumo, eigumo, denio užliejamumo ir kitus eksperimentus. Darbo eigoje bandysime nustatyti ar gali CFD programinė įranga rezultatų patikimumo atžvilgiu prilygti fiziniams modelių bandymams.

Prieš apžvelgiant vandens pasipriešinimo metodus privalome išsiaiškinti, kaip susidaro vandens pasipriešinimas, nuo ko jis priklauso bei iš ko jis susideda.

Laivui judant jį veikia vandens pasipriešinimo jėga. Todėl tam, kad aprūpinti laivo eigą, būtina pridėti tokio pat didumo, bet priešingos krypties jėgą, kuri vadinama naudingąja trauka. Įrenginys skirtas tokiai traukai sukurti vadinamas varytuvu.

Pasipriešinimo jėga, kuri veikia laivo korpusą, priklauso nuo laivo formos, jo greičio, bei skysčio fizinių savybių. Vanduo - tai nesuspaudžiama aplinka, kurios tankis praktiškai nepriklauso nuo temperatūros arba slėgio. Gėlo vandens tankis $\rho=1000 \text{ kg/m}^3$, suraus vandens tankis $\rho=1025 \text{ kg/m}^3$. Žymesnę įtaką pasipriešinimui turi tokia vandens savybė kaip klampumas, kuris priklauso nuo temperatūros. Būtent dėl vandens klampumo atsiranda trinties jėga.

Laivui plaukiant, dėl vandens klampumo arti laivo korpuso esančios vandens dalelės juda lėčiau, nei tos, kurios yra toliau nuo laivo korpuso. Tokiu būdu susidaro vandens sluoksnis kuris vadinamas pasienio sluoksniu. Iš hidrodinamikos žinome, jog tokio pobūdžio reiškiniai paklusta Reinoldso panašumo dėsniai ir vertinami Reinoldso skaičiumi:

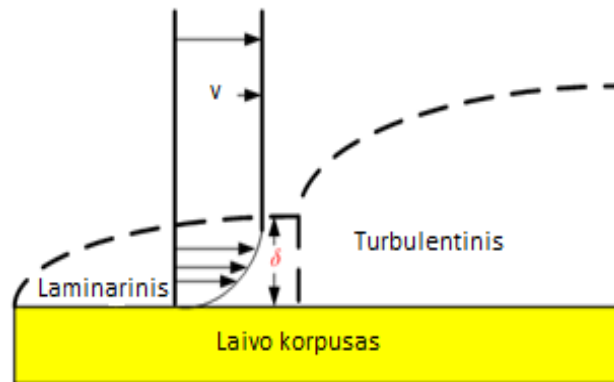
$$\text{Re} = \frac{vL}{\nu}, \quad (1)$$

čia v - laivo greitis, m/s;

L - laivo ilgis, m;

ν - vandens kinematinio klampumo koeficientas.

Vandens tekėjimo režimas gali būti laminarinis ir turbulentinis. Laminarinis tekėjimas susidaro laivapriekyje, bei vandens dalelės juda išilgai laivo korpuso, dėl ko jų judėjimo trajektorija analogiška laivo korpuso formai. Turbulentinis tekėjimas susidaro arčiau laivagalio, esant tokiam tekėjimui vyksta įvairių krypčių chaotiškas vandens srautų judėjimas. Dėl to žymiai padidėja vandens kiekio pernešimo intensyvumas, kaip rezultatas padidėja trinties koeficientas C_{tr} . Kai Re skaičius yra mažesnis už Re_{kr} (kritinį) vyksta laminarinis tekėjimas, kai Re didesnis už Re_{kr} - turbulentinis. Laminarinio tekėjimo perėjimas į turbulentinį vadinamas perėjimo režimu (1 pav.).



1 pav. Pasienio sluoksnis

Viena iš svarbiausių hidrodinamikos problemų - tai perėjimo iš laminarinio į turbulentinį režimo nustatymas. Toks perėjimas įvyksta palaipsniui, kai kaitaliojantys vyrauja abu režimai.

Vandens pasipriešinimas laivo judėjimui priklauso ne vien tik nuo Re skaičiaus, bet ir nuo laivo greitaeigiškumo, kurio charakteristika yra Frūdo skaičius Fr .

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}} \text{ arba } Fr_{\nabla} = \frac{v}{\sqrt{g\nabla^{1/3}}}, \quad (2)$$

čia v - laivo greitis, m/s;

g - laisvojo kritimo greitis, m/s^2 ;

L - laivo ilgis, m;

∇ - tūrinė vandentalpa, m^3 .

Galima išskirti tris laivo judėjimo režimus:

1. Hidrostatinis režimas - kai $Fr_{\nabla} \leq 1$, esant tokiam režimui laivo greitis nėra didelis, todėl didelės įtakos laivo grimzlės pokyčiui šis režimas neturi.

2. Pereinamasis režimas - kai $1 < Fr_{\nabla} \leq 3$, didėjant laivo greičiui hidrodinaminės jėgos didėja palyginus su hidrostatinėmis (Archimedo), todėl sumažėja laivo tūrinė vandentalpa bei sumažėja vidutinė laivo grimzlė.

3. Gliseravimo režimas - kai $Fr_{\nabla} > 3$, esant tokiam režimui laivo korpusas praktiškai pradeda slysti vandens paviršiumi ir laivo svorinė vandentalpa bus lygi vertikaliai hidrodinaminei jėgai, kuri veikia laivo korpusą (Мирохин В., Жинкин Б., Зилман Г., 1989).

Pagal Frūdo skaičių galime spręsti apie laivo greitaeigiškumą. Lėtaeigių laivų trinties pasipriešinimas R_{tr} mažai priklauso nuo korpuso formos, pagrinde, nuo laivo paviršiaus sudrėkinto ploto Ω .

Trinties pasipriešinimas atsiranda dėl to, jog pasienio sluoksnyje arti laivo korpuso, dėl vandens klampumo tarp atskirų vandens dalelių, judančių skirtingais greičiais, susidaro tangentiniai įtempimai. Matematiškai trinties pasipriešinimą galima aprašyti sekančia formule:

$$R_{tr} = \int_{\Omega} \tau \cos(\tau, v) d\Omega, \quad (3)$$

čia τ - elementari trinties jėga, veikianti paviršiaus plotelyje $d\Omega$;

v - srauto greitis.

$$\text{arba } R_{tr} = (C_{tr} + C_s) \Omega \frac{\rho v^2}{2}, \quad (4)$$

čia C_{tr} – trinties koeficientas, apskaičiuojamas arba parenkamas iš žinyų;

C_s – laivo korpuso švarumo ir šiurkštumo įtakos koeficientas;

Ω – laivo sudrėkinto paviršiaus plotas, m^2 ;

ρ – vandens masės tankis, t/m^3 ;

v – laivo greitis, m/s .

Laivo sudrėkinto paviršiaus plotas skaičiuojamas Semekos formule:

$$\Omega = Ld[2 + 1.37(\delta - 0.274)] \frac{B}{d}, \quad (5)$$

Pagal šią formulę skaičiuojamas laivų, turinčių didelį pilnumo koeficientą, trinties pasipriešinimas. Greitaeigių laivų, turinčių nedidelį pilnumo koeficientą (mažesnę kaip 0,65), sudrėkintas laivo paviršiaus plotas skaičiuojamas Muragino formule:

$$\Omega = Ld(1.36 + 1.13\delta) \frac{B}{d}, \quad (6)$$

Žvejybos laivų pasipriešinimas skaičiuojamas Jerošino formule:

$$\Omega = Ld \left[\left(1 + 0,5 \frac{B}{d}\right) (0,55 + 1,52\delta) \right], \quad (7)$$

čia L – laivo ilgis, m ;

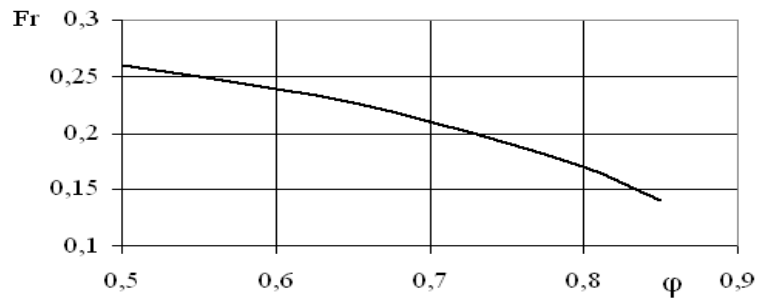
B – laivo plotis, m ;

d – laivo gramzda, m ;

δ – laivo korpuso pilnumo koeficientas.

Trinties dydis priklauso nuo povandeninės laivo korpuso dalies paviršiaus švarumo, šiurkštumo. Korpuso paviršius gali būti nelygus. Jei laivas jūroje yra ilgesnį laiką, povandeninė laivo korpuso dalis apauga įvairia jūros augmenija ir jo paviršius tampa nebelygus, todėl gerokai padidėja trinties pasipriešinimas.

Vidutinio greičio laivams įtakos vandens pasipriešinimui labiausiai turi korpuso formos tipas, esant tokiems greičiams optimalios laivo korpuso formos charakteristikos keičiasi ypač intensyviai (2 pav.). Todėl būtina parinkti optimalų variantą, nes jeigu esant konkrečiam pilnumo koeficientui laivo greitis yra didesnis, tai reikia stengtis sumažinti bangavimo pasipriešinimą R_b , jei mažesnis - klampumo trintį.



2 pav. Išilginio pilnumo koeficiento priklausomybė nuo Fr skaičiaus (Сопротивление движению судов, 2007)

Greitaeigiems laivams didžiausią įtaką turi bangavimo pasipriešinimas R_b . Laivui plaukiant, vandens masė laivo priekyje patiria laivo korpuso spaudimą. Stumiamo vandens masė laivo priekyje pasikelia arba nusileidžia, sukeldama bangavimą. Iš pusiausvyros padėties išvestos vandens dalelės, dėl sunkio jėgos veikimo, pradeda judėti apskritimu. Bangavimas, kurį plaukdamas sukelia laivas, skiriamas nuo vėjo ar kitų jėgų sukulto bangavimo. Laivui plaukiant jo sukeltos bangos būna dviejų tipų: laivapriekio ir laivagalio. Laivo priekyje bangos atsiranda už forštevenio, laivagalio – prieš achterštevenį.

Bangavimui sukelti sunaudojama energijos, šį pasipriešinimą vadiname bangavimo pasipriešinimu. Matematiškai jis skaičiuojamas formule:

$$R_b = \int_{\Omega} p_n d\Omega, \quad (8)$$

čia p_n - elementarų plotelį $d\Omega$ veikiantis slėgis.

$$\text{arba } R_b = C_b \Omega \frac{\rho v^2}{2}, \quad (9)$$

čia C_b – bangavimo pasipriešinimo koeficientas.

Laivui plaukiant, korpusą apteka vandens srautas, tačiau vandens dalelių greičiai laivapriekyje ir laivagalyje yra didesni nei ties midelio. Atitinkamai susidaro slėgio pokyčiai, kurių suma ir yra viena iš formos pasipriešinimo dalių. Formos pasipriešinimas atsiranda ir dėl pasienio sluoksnio atitrūkimo laivagalyje, nes artėjant prie laivagalio slėgis didėja ir vandens dalelės juda su neigiamu pagreičiu. Hidrodinaminis pėdsakas - viena iš formos pasipriešinimo atsiradimo priežasčių, kai laivagalyje susidaro sukuriuojantis vandens srautas, kuriame slėgis mažesnis nei aplinkiniame sraute.

Formos pasipriešinimas apskaičiuojamas pagal formulę:

$$R_f = C_f \Omega \frac{\rho v^2}{2}, \quad (10)$$

čia C_f – laivo formos pasipriešinimo koeficientas.

Formos pasipriešinimas priklauso nuo laivo korpuso formos, jo išmatavimų santykių (L/B , B/T , L/V , x_c/L).

čia V – tūrinė vandentalpa, m^3 ;

x_c – vandentalpos centro aplikatė, m .

Kadangi laivo korpuso apvadai nėra labai aptakūs ir vanduo, aptekėdamas laivo korpusą, išsikišusias povandeninės laivo korpuso dalies detales, įrangą ir nelygumus, sudaro vandens sūkurius. Didėjant laivo greičiui, sūkurių daugėja. Išsikišusios povandeninės korpuso dalys ir įranga – tai vairas, nukreipiamoji mova, pavairavimo įranga, bortiniai kiliai, sraigto veleno kronšteinai ir kt. Sūkuriams sukurti prarandama dalis energijos, šis pasipriešinimas vadinamas sūkuriniu pasipriešinimu. Visa tai sudaro laivo formos pasipriešinimą.

Vienas iš svarbiausių laivo geometrinių rodyklių, kuris turi įtakos vandens pasipriešinimui yra santykinis laivo ilgis ψ .

$$\psi = \frac{L}{\nabla^{1/3}}, \quad (11)$$

čia L - laivo ilgis, m ;

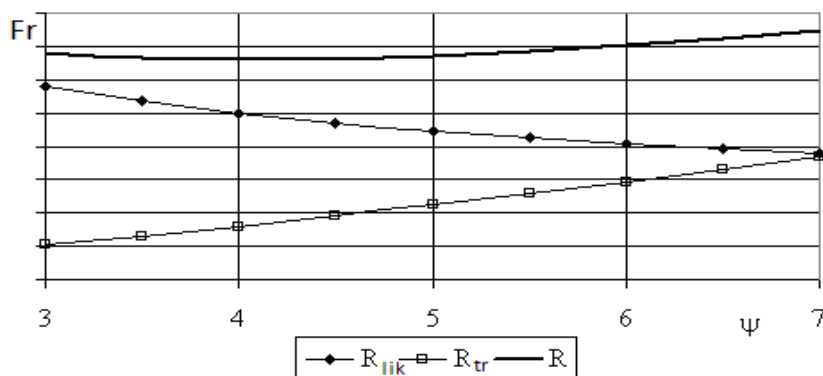
∇ - tūrinė vandentalpa, m^3 .

Didinant ψ , didėja sudrėkinto paviršiaus plotas, bei trinties pasipriešinimas, bet mažėja likutinis pasipriešinimas R_{lik} . (3 pav). Likutinis pasipriešinimas skaidomas į formos ir bangavimo pasipriešinimą:

$$R_R = R_f + R_b \text{ arba } R_R = (C_f + C_b) \Omega \frac{\rho v^2}{2}, \quad (12)$$

Viljamas Frūdas 1870 metais pasiūlė suskaidyti visą laivo pasipriešinimą į dvi dalis: trinties ir likutinį.

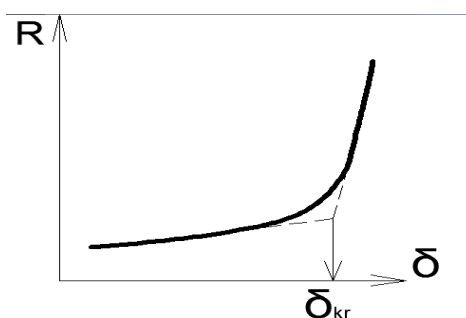
$$R = R_{tr} + R_R \text{ arba } R = (C_f + C_b + C_{tr} + C_s) \Omega \frac{\rho v^2}{2}, \quad (13)$$



3 pav. Likutinio ir trinties pasipriešinimo priklausomybė nuo ψ (Сопротивление движению судов, 2007)

Kitas svarbus rodiklis - tai išilginio pilnumo koeficientas φ , kuris charakterizuoja vandentalpos pasiskirstymą pagal laivo ilgį. Jeigu $\varphi=1$, tai vandentalpa išilgai laivo pasiskirsto tolygiai, jeigu $\varphi=0$, tai visa vandentalpa sukoncentruota per midelinį španhautą. Realiausiai kai $\varphi=0.5$, tada visa vandentalpa pasiskirsto konusoidės pavidalu. Šis koeficientas apibūdina španhautų rikiuotės formą ir daro didelę įtaką likusiam pasipriešinimui R_{lik} . Kuo didesnis φ koeficientas, tuo pilnesnis laivagalis, o tai reiškia, kad pasipriešinimas auga.

δ - vandentalpos pilnumo koeficientas, kuris turi ženkliai įtaką laivo eigumui. Pastebėta, kad pasiekus tam tikrą šio koeficiento reikšmę pasipriešinimas R žymiai padidėja (4 pav). Šia ribą priimta vadinti kritine δ_{kr} .



4 pav. Vandens pasipriešinimo priklausomybė nuo δ .

Dažniausiai δ_{kr} nustatomas brėžiant liestines abiem R kreivės dalims, tačiau gali būti apskaičiuotos taikant sekančias formules:

$$\delta_{kr}=1.23-2.44Fr, \quad (14)$$

$$\text{arba } \delta_{kr}=1.23-2.44Fr+0.14(10Fr-2.3)^3, \quad (15)$$

Vandentalpos centro padėtis laivo atžvilgiu x_c/L . Lėtaeigių laivų vandentalpos centro padėtis yra pasislinkusi į laivapriekį, nes jų bangavimo pasipriešinimas nereikšmingas, todėl reikia pasirūpinti apie formos pasipriešinimo mažinimą. Greitaeigių laivų vandentalpos centro padėtis bus labiau į laivagalį, nes jų laivapriekis turi būti siauresnis, kad sumažinti bangavimo pasipriešinimą R_b . Sąlyginai tarient, lėtaeigių laivų korpusas turi būti lašo formos, o greitaeigių - ašmens formos.

Viena iš svarbiausių laivo korpuso formos charakteristikų laivo pločio ir grimzlės santykis B/d . Praktiškai visiems jūriniam laivams parenkamas remiantis pradiniu laivo stovumu. Padidinus šį santykį, padidėja ir vandens pasipriešinimas (C.B. Антоненко, 2007).

Daugelis šiuolaikinių laivų turi bulbo formos laivapriekį, kuris skirtas pasipriešinimui mažinti. Pagrindė bulbo laivapriekio forma naudojama greitaeigiams laivams, kurių $Fr>0.25$. Esant palankioms sąlygoms bulba gali sumažinti net iki 15-18 % vandens pasipriešinimo. Mūsų tiriamojo laivo DTMB 5415 laivapriekis bulbo formos, todėl atliekant pasipriešinimo skaičiavimus turėsime į tai atsižvelgti.

Projektuojant būsimą laivą svarbiausia užduotis yra optimalių parametrų ir laivo korpuso formos charakteristikų nustatymas. Tokių charakteristikų daug ir kiekviena iš jų daugiau ar mažiau įtakoja laivo eksploatacinėms savybėms: eigumui, stovumui, statybos technologijai.

1.2. Bangavimo pasipriešinimo (Holtropo) metodas

Laivo pasipriešinimo prognozavimas pradinėse projektavimo stadijose yra vienas iš svarbiausių etapų būsimą laivą eigumui bei varomajai jėgai įvertinti. 1982 metais Holtropas ir Menenas sukūrė skaitmeninį laivų pasipriešinimo nustatymo metodą, kur visas pasipriešinimas yra suskaidytas į atskirus komponentus. Kiekvienas pasipriešinimo komponentas buvo greičio ir korpuso formos parametrų funkcija.

Holtropas ir Menenas atliko statistinį modelinių bandymų rezultatų, kuriuos paėmė iš Niderlandų bandymo baseino archyvo, įvertinimą. Vertinimas buvo atliekamas taikant regresijos analizės metodus, siekiant sukurti skaitmeninį laivų pasipriešinimo vertinimo metodą. Bangavimo pasipriešinimas priklauso nuo Frūdo skaičiaus, bei laivo povandeninės dalies architektūros, remiantis tuo buvo atlikta apie 334 laivų modelių bandymų, keičiant jų geometrines charakteristikas. Viso buvo atlikta apie 1707 vandens pasipriešinimo matavimų. Tyrimams atlikti buvo parinkti skirtingų tipų laivai su skirtingų parametrų diapazonu (1 lentelė).

Eigumo tyrimui parinktų laivų tipai. 1 lentelė

Laivo tipas	L/B	B/d	ϕ	Fr max
Tankeris, sausakruvis	$5.1 < L/B < 7.1$	$2.4 < B/d < 3.2$	$0.73 < \phi < 0.85$	0.24
Generalinių krovinių laivas	$5.3 < L/B < 8.0$	$2.4 < B/d < 4.0$	$0.58 < \phi < 0.72$	0.30
Žvejybinis laivas, vilkikas	$5.9 < L/B < 6.3$	$2.1 < B/d < 3.0$	$0.55 < \phi < 0.65$	0.38
Konteinervežis, fregata	$6.0 < L/B < 9.5$	$3.0 < B/d < 4.0$	$0.55 < \phi < 0.67$	0.45
Kiti	$6.0 < L/B < 7.3$	$3.2 < B/d < 4.0$	$0.56 < \phi < 0.75$	0.30

Pagal Holtropo ir Meneno metodiką visas pasipriešinimas laivo judėjimui apskaičiuojamas sekančiai:

$$R = R_F(1 + k_1) + R_{AP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A, \quad (16)$$

čia R_F - trinties pasipriešinimas, skaičiuojamas pagal ITTC-1957 formulę;

$(1 + k_1)$ - laivo korpuso formos faktorius arba formos pasipriešinimo proporcingumo koeficientas;

R_{AP} - išsikišusių dalių (vairo, achterštevenio, šoninių kilių ir kt.) pasipriešinimas;

R_W - bangavimo pasipriešinimas;

R_B - laivapriekinio bulbo pasipriešinimas;

R_{TR} - transinio laivagalio pasipriešinimas;

R_A - korpuso šiurkštumo pasipriešinimas.

Trinties pasipriešinimas $R_F(1 + k_1)$ sudaro apie 63 % viso pasipriešinimo, o bangavimo pasipriešinimas R_W apie 27 % viso pasipriešinimo, todėl išsamiau apžvelgsime būtent šias pasipriešinimo dalis.

$(1+k_1)$ yra formos faktorius, kuris parodo santykį tarp klampumo ir techniškai lygios ekvivalenčios plokštės trinties pasipriešinimų. Jo skaitinė reikšmė nustatoma iš eksperimento rezultatų. Formos faktorius priklauso nuo sekančių laivo charakteristikų: laivo povandeninės dalies formos, laivapriekio ir laivagalio formos, vaterlinijos formos, vandentalpos centro padėties, cilindrinės dalies. Holtropas ir Menenas formos faktoriui apskaičiuoti pasiūlė sekančią formulę:

$$(1+k_1) = c_{13} \left\{ 0.93 + c_{12} \left(\frac{B}{L_{lg}} \right)^{0.92497} 0.95 - \varphi^{-0.521448} 1 - \varphi + x_c^{0.6906} \right\}, \quad (17)$$

čia φ - išilginio pilnumo koeficientas;

L_{lg} - vaterlinijos laivagalinės dalies ilgis;

x_c - vandentalpos centro abscisė;

c - laivo korpuso formos rodikliai.

Laivagalinės dalies ilgį rekomenduojama apskaičiuoti formaliai kaip laivo korpuso formos rodiklį:

$$\frac{L_{lg}}{L} = 1 - \varphi + \frac{0.06\varphi x_c}{4\varphi - 1}, \quad (18)$$

Laivo korpuso formos rodiklis c_{12} įvertina santykio d/L įtaką formos pasipriešinimui:

$$c_{12} = \left(\frac{d}{L} \right)^{0.22844}, \text{ jei } d/L \geq 0,05 \quad (19)$$

$$c_{12} = 48.20 \left(\frac{d}{L} \right)^{0.2078} + 0.479948, \text{ jei } 0,02 < d/L < 0,05 \quad (20)$$

$$c_{12} = 0.479948, \text{ jei } d/L \leq 0,02. \quad (21)$$

Rodiklis c_{13} įvertina laivagalio formos įtaką:

$$c_{13} = 1 + 0.003c_{lg}, \quad (22)$$

čia c_{lg} - laivagalio formos rodiklis, kurio reikšmė gali būti nuo -25 (plokščiadugnis laivagalis) iki +10 (U formos laivagaliniai španhautai).

Kaip minėjome aukščiau bangavimo pasipriešinimas R_w priklauso nuo laivo greitaeigiškumo (Fr) ir nuo laivo korpuso formos charakteristikų (L/B , B/d , ϕ). Holtropas šią priklausomybę išreiškė:

$$R_w = c_1 c_2 c_5 \nabla \rho g \cdot \exp(m_1 Fr^{-0.9} + m_2 \cos(\lambda Fr^{-2})), \quad (23)$$

čia c - koeficientai, kurie įvertina laivaprieikinio bulbo, bei trancinio laivagalio įtaką bangavimo pasipriešinimui;

∇ - laivo tūrinė vandentalpa;

m_i , λ - laivinių bangų susidarymo ir interferencijos įtakos faktoriai.

Viena rimčiausių Holtropo metodo problemų, jog metodas buvo sukurtas remiantis ištirtų laivo korpuso duomenimis. Tačiau būna specifinių ypatingų korpuso formų, kurių nėra šio metodo duomenų bazėje, dėl ko rezultatai gali būti nepatikimi (I. Ortigosa, 2008).

Šiai dienai sukurta nemažai automatizuoto projektavimų programų, kurios gali įvertinti laivo pasipriešinimą remiantis Holtropo Meneno metodu. Viena tokių programų - AutoPOWER. AutoPower - tai viena iš AutoShip programos dalių, kuri skirta korpuso pasipriešinimui ir būsimos jėgainės galiai įvertinti. Būtent Autopower programos pagalba įvertinsime mūsų tiriamojo objekto DTMB 5415 laivo pasipriešinimą remiantis Holtropo Meneno metodika. Įvedus visą mums žinoma informaciją apie laivo korpusą automatiškai gaunamos skaitinių laivo pasipriešinimo bei naudingosios galios reikšmių priklausomybė nuo laivo greičio.

Empirinėje dalyje atlikus laivo DTMB 5415 eigumo vertinimą, turėsime pirmus rezultatus, kuriuos vėliau palyginsime su kitų metodų gautais rezultatais (likusio pasipriešinimo, CFD Flow 3D, bei realaus modelinio eksperimento rezultatais).

1.3. Likusio pasipriešinimo metodas

Pirmose laivo projektavimo stadijose, kai dar nėra laivo teorinio brėžinio, būtina operatyviai įvertinti laivo pigumą būsimo laivo eksploatavimo užduotims patenkinti. Todėl būtina sudaryti apytikrį laivo pasipriešinimo skaičiavimo metodą, kai yra ne visa informacija apie laivo korpuso formos charakteristikas. Visi apytikriai metodai remiasi į modelinių bandymų rezultatų apdorojimą, kai yra braižomi formos charakteristikų priklausomybės grafikai. Tokie grafikai padeda įvertinti laivo pasipriešinimą, bet neleidžia patobulinti rezultatų.

Likusio pasipriešinimo metodas - tai apytikris antros grupės pasipriešinimo skaičiavimo metodas. Šis metodas yra apytikris, nes priimta manyti, jog likutinio pasipriešinimo koeficientas C_R visiems geometriškai analogiškiems laivams esant vienodam Frūdo skaičiui yra toks pat. (Войткунский И., 1988).

Pagrindinė likusio pasipriešinimo metodo esmė tame, jog likusio pasipriešinimo koeficiento C_R reikšmė nagrinėjamam laivui yra:

$$C_R = C_{R0} k_1 k_2 \dots k_n, \quad (24)$$

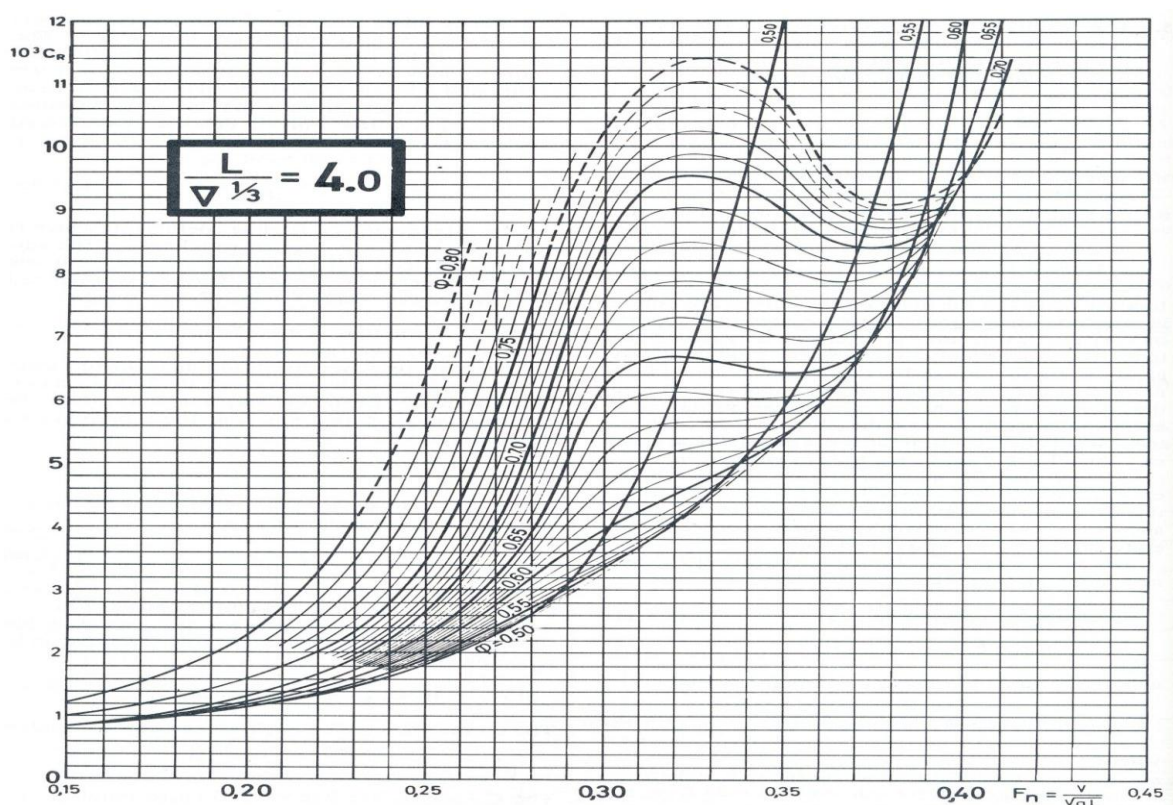
čia $C_{R0} = f(\delta, Fr)$ - bazinio serijinio laivo likutinio pasipriešinimo koeficientas;

k_i - formos įtakos koeficientai, kurie priklauso nuo korpuso formos parametrų: L/B , $L/V^{1/3}$, B/d , x_c/L ir kiti.

Iš formulės 12 ($R_{lik} = (C_f + C_b) \Omega \frac{\rho v^2}{2}$) žinome, jog likusiam pasipriešinimui apskaičiuoti būtina žinoti laivo suvilgyto paviršiaus plotą Ω , kuris priklausomai nuo laivo greitaiegiškumo randamas iš Semekos (5), Muragino (6) ir Jerošino (7) formulių. Tolesnė C_R skaičiavimo metodika priklauso nuo pasirinktos laivų tipo serijos.

Nuo 1965 iki 1974 metų mokslininkai Gulhameris ir Harvaldas kūrė empirinį pasipriešinimo skaičiavimo metodą „Laivo pasipriešinimas“, kuris buvo paremtas daugybės modelinių bandymų rezultatų apdorojimu. Metodas nereikalauja daugybės korpuso parametrų charakteristikų ir naudojamas likusio pasipriešinimo skaičiavimui. Haroldas pristatė grafiką (5 pav.) likusiam pasipriešinimui nustatyti trijų funkcijų parametrais:

1. $L/V^{1/3} = \psi$ - santykinis laivo ilgis, šiam atvejui lygus 4.
2. ϕ - išilginio pilnumo koeficientas;
3. Frūdo skaičius Fr .



5 pav. Haroldo likusio pasipriešinimo nustatymo grafikas (Lutzen, M., 2012)

Koeficientas pateikiamas be korpuso formos korekcijos, be bulbos įtakos ir vandentalpos centro aplikatės x_c . Šiems parametrams Haroldas pasiūlė kitas pataisas. Todėl likusio pasipriešinimo koeficiento kreives turi būti koreguojamos pagal:

- x_c padėtis ($\Delta C_{R,x_c}$);
- korpuso forma ($\Delta C_{R,form}$);
- B/d nuokrypis nuo 2.5 (C_R kreives duotos esant B/d=2.5), ($\Delta C_{R,B/d \neq 2.5}$);
- Bulbos forma ir dydis ($\Delta C_{R,bulb}$);

Tada likutinis pasipriešinimas bus lygus:

$$C_R = C_{R,diagramos} + \Delta C_{R,x_c} + \Delta C_{R,form} + \Delta C_{R,B/d \neq 2.5} + \Delta C_{R,bulb}, \quad (25)$$

Harvaldas pasiūlė x_c koregavimą pasislinkusį į laivapriekį nuo midelinio španhauto, todėl koregavimas visada bus teigiamas, kas automatiškai padidina likutinį pasipriešinimą.

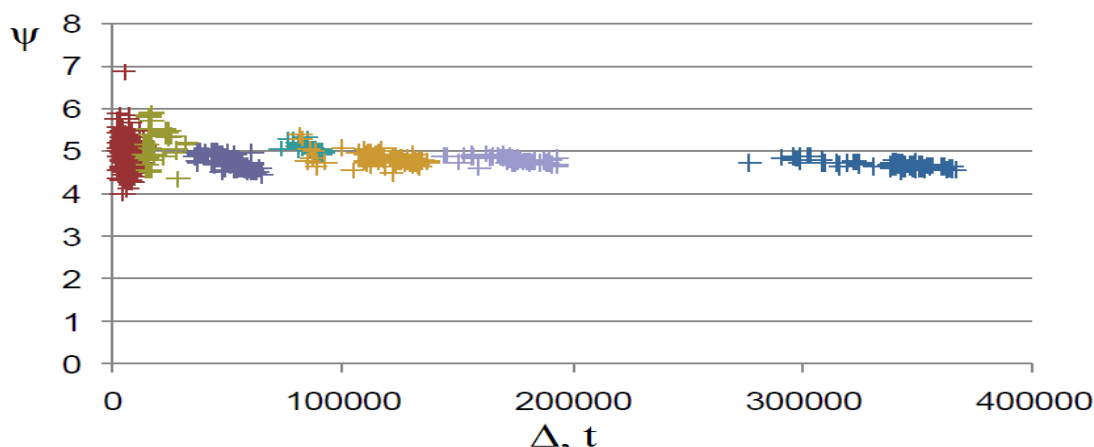
B/d santykiui koreguoti Haroldas pasiūlė sekantį variantą: koregavimas nedaromas kai B/d=2.5, kitu atveju $\Delta C_{R,bulb} = 0.16(B/d - 2.5)10^{-3}$, (26)

Korpuso formos koeficiento koregavimas vykdomas tik tada, kai laivagalis ar laivapriekis yra maksimume U ar V formos.

Laivapriekiui - maksimumas U: $-0,1 \cdot 10^{-3}$; maksimumas V: $+0,1 \cdot 10^{-3}$;

Laivagaliui - maksimumas U: $+0,1 \cdot 10^{-3}$; maksimumas V: $-0,1 \cdot 10^{-3}$;

Bulbo formos laivapriekis gana populiarius sprendimas mažinant laivo pasipriešinimą. Moderniausios bulbos gali sumažinti laivo pasipriešinimą net iki 15-20 %. Bulbos formos koregavimui Haroldas siūlo priimti, jog laivas turi standartiškos formos bulbą, kurios skerspjūvio plotas ne mažesnis kaip 10% nuo midelinio španhauto skerspjūvio. Bulbos koregavimas, kaip ir C_R priklauso nuo trijų aukščiau minėtų parametrų: santykinio laivo ilgio ψ , išilginio pilnumo koeficiento ϕ , bei Frūdo skaičiaus Fr. Birių krovinių laivams ir tankeriams ψ koeficientas skirtinguose diapazonuose pasiskirsto sekančiai (6 pav.).



6 pav. Santykinio laivo ilgio priklausomybė nuo laivo svorinės vandentalpos (Lustzen M., 2012)

Iš grafiko matome, jog Small tipo laivų santykinio laivo ilgio vidurkio koeficientas lygus 4,88; Handysize - 5,13; Handymax - 4,66; Panamax - 5,05; Aframax - 4,78; Suezmax - 4,77; VLCC -4,65.

Tačiau labiausiai bulbos koregavimas priklauso nuo Frūdo skaičiaus. Tam, kad pakoreguoti bulbą, Haroldas atliko eksperimentą, kurio metų naudojant savo metodą, jis surado visą C_R likutinio pasipriešinimo koeficiento reikšmę ir atėmė ją iš modelinių bandymų metodu rastų C_R reikšmių. Tą skirtumą jis ir priėmė už koregavimą. Tokiam koregavimui jis pasiūlė tiesinę funkciją:

$$\Delta C_{R,bulb} = \max(-0.4; -0.1 - 1.6Fr), \quad (27)$$

Šiai dienai egzistuoja nemažai automatizuoto skaičiavimo programų, kurių dėka galima greitai ir gana patikimai atlikti pasipriešinimo skaičiavimus paremtus vienu iš daugybės egzistuojančių metodų. Mūsų nagrinėjamam objektui DTMB 5415 mes panaudosime skaičiavimo programą, kuri remiasi į likusio pasipriešinimo metodą bei pateiksime rezultatus. Atlikę laivo DTMB 5415 eigumo vertinimą apytikriu likusio pasipriešinimo metodu, turėsime antrus DTMB 5415 laivo pasipriešinimo rezultatus.

1.4. CFD praktinis realizavimas

Kaip pasiekti geriausią laivo dizainą ir tuo pačiu metu būti novatoriška laivų projektavimo įmone arba statykla? Su šia problema susiduria šiandienos laivų projektavimo įmonės, kurios egzistuoja nuolat globaliai sunkėjančioje laivų statybos rinkoje. Anksčiau laivų projektuotojai pasikliaudavo anksčiau pastatytų laivų konstrukcija. Dizaineriai kopijavo prieš tai sukurtus laivų konstrukcijų sprendimus, dėl ko progresas beveik nesivystė. Per pastaruosius dvidešimt metų kompiuterinių programų dėka projektuotojai lengvai gali vizualizuoti savo kūrinį bei atlikti hidrodinaminius skaičiavimus. Viena iš tokių priemonių, kuri aktyviai naudojama laivų projektavime, skaičiuojamoji skysčių dinamikos programa CFD (Computational Fluid Dynamics). Šis įrankis gali apskaičiuoti laivo hidrodinaminius uždavinius remiantis modelinių laivo modelio ir sraigto įvairių serijų bandymų rezultatais.

Skaičiuojamoji skysčių dinamika prasideda nuo vienos pagrindinės Navje-Stokso lygties. Ši lygtis yra susieta su netiesine diferencialine lygtimi, kuri aprašo srautą. Pirmoji prielaida yra ta, jog skystis yra nespūdas, kas veda prie kitos skysčio masės išsaugojimo lygties.

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + f, \quad (28)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (29)$$

čia ρ - tankis, kg/m^3 ;

μ - trinties koeficientas, kuris aprašo klampumą;

f - yra išorinės masės jėgos arba svorio jėga.

Navje-Stokso lygtis yra skysčio impulso išsaugojimas pagal antrąjį Niutono dėsnį. Tam, kad Navje-Stokso lygtis būtų arčiau skaitmeninio sprendimo ji pertvarkoma pagal Reinoldso Navje-Stokso (RANSE) lygtį:

$$\rho \bar{v} \cdot \nabla \bar{v} = -\nabla \bar{p} + \mu \nabla^2 \bar{v} + \bar{f} - \rho \nabla \bar{v} \bar{v}', \quad (30)$$

Tolesnis formulės pertvarkymas susijęs su trinties jėgos ir potencialaus srauto supaprastinamu ir vadinasi srauto greičio potencialo arba Laplaso lygtimi:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = 0, \quad (31)$$

Jeigu išorinės jėgas sudaro tik svorio jėga, lygti galima užrašyti sekančiai:

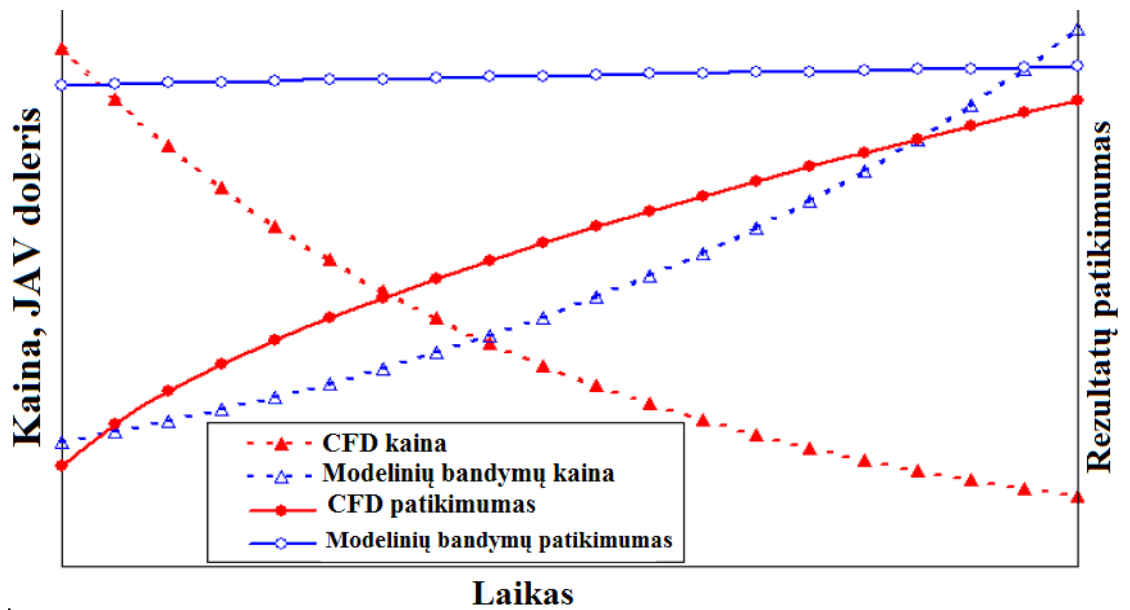
$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2} (\nabla \phi)^2 - gz + \frac{1}{\rho} p = \text{const.} - \text{išraiška gerai žinoma ir vadinama Bernulio lygtimi.} \quad (32)$$

Egzistuoja du pagrindiniai CFD skysčio dinamikos skaičiavimo metodai: ribinių ir baigtinių elementų metodai. Abu elementai išskaido skystį į daugybę elementų, kurie aprašomi lygtimis. Ribinių elementų metodas naudojamas skysčio srauto potencialui skaičiuoti, o baigtinių elementų metodas naudojamas RANSE skaičiavimams. RANSE naudojamas apskaičiuoti srautui aplink laivo korpusą. Baigtinių elementų metodas arba tinklelio metodas yra universaliausias ir yra pagrįstas baigtinių elementų skirtumu. Baigtinių elementų skirtumą sudaro tinklelis kuris apima tiriamąją sritį. Nuo sudaryto tinklelio tankio ir formos priklauso rezultatų patikimumas. Jeigu sudarytas retas netikslus tinklelis, tai ir rezultatai gali turėti dideles paklaidas (Vangbo P., 2011).

Šiandienai sprendžiant sudėtingus CFD uždavinius egzistuoja daugybė kompiuterinių programų kaip: Flow3D, Flow Vision, Ansys, ShipFlow. Automatizuotų projektavimo bei skaičiavimo programų atsiradimas, skirtų hidrodinamikos uždaviniams spręsti, davė galimybę modeliuoti hidromechaninius procesus. FLOW 3D viena iš programų leidžiančių modeliuoti hidromechanikos procesus, tarp jų ir laivo pasipriešinimą.

Flow 3D - tai viena iš CFD (Computational Fluid Dynamics) paketo programų skirtų skysčio hidrodinamikai modeliuoti.

Naudojant Flow 3D programą įmanoma vandens pasipriešinimo rezultatus gauti daug greičiau bei pigiau. Tačiau lieka neatsakytas vienas iš svarbiausių klausimų, į kurį mums teks atsakyti darbo eigoje: ar FLOW 3D programos rezultatai patikimi?



7 pav. CFD ir bandymo baseino testo kainų ir rezultatų tikslumo prognozavimo grafikas
(Vangbo P., 2011)

Mokslininkas Couser 2002 metais sudarė apytikrį CFD ir bandymo baseino testo kainų ir rezultatų tikslumo prognozavimo grafiką (7 pav.). Tai tik prognozavimo grafikas, todėl jis neturi būti priimtas už tikslūs duomenis. Kaip matome iš grafiko, bandymo baseino testų kaina laikui bėgant kils, o rezultatų patikimumas keisis nežymiai į gerąją pusę dėl naujos įrangos arba matavimo prietaisų paklaidų sumažėjimo. CFD, kaip naujovė pradžioje kainavo brangiai, tačiau rezultatų patikimumas buvo nepatenkinamas. Tik laikui bėgant vykstant kompiuterių modernizacijai, parametrų tobulinimui rezultatų patikimumo kreivė augs. Course mokslininko manymu CFD arčiausiu laiku bus daug optimesnis bei pigesnis metodas laivo pasipriešinimo nustatyti.

CFD tai yra kompiuterinė programa, kuri vis dar padaro nemažai klaidų lyginant su modeliniais bandymais.

Pripažintos klaidos kurios įtakoja CFD metodo skaičiavimo rezultatų patikimumui:

- Fizinė modelio paklaida, kuri gali atsirasti dėl modelio kūrimo supaprastinimo.
- Kompiuterių suapvalinimo paklaida, susijusi su informacijos apdorojimu ir saugojimu.
- Diskretizavimo klaida - viena iš svarbiausių bei įtakingiausių skaičiavimo rezultatams klaidų, kuri susijusi su modelio tinklėlio kokybe. Yra daug dalykų kurie įtakoja tinklėlio kokybei: tinklėlio tankis, proporcijos, raiška, ir t.t. Diskretizacija yra taikoma skysčio mechanikos skaičiavimų pagrindinės lygties aproksimacijų apskaičiavimui nagrinėjamame skysčio regione. Skaičiavimų masyvas yra apibrėžiamas baigtiniu skaičiumi langelių. Jeigu naudojamas šiurkštus tinklėlis, tam kad paskaičiuoti slėgio priklausomai nuo greičio kitimą, tai rezultatai greičiausiai bus nepatikimi.

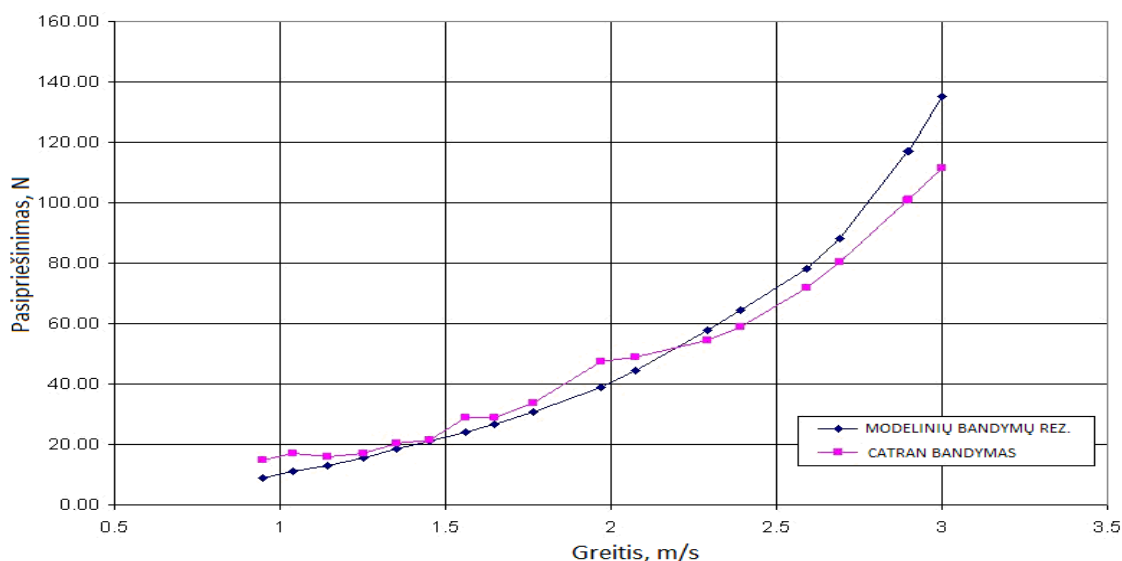
DTMB 5415 yra populiarius modelis tyrimams atlikti. Sankt Peterburgo Laivų statybos Jūrų technikos fakulteto studentai atliko vieną iš populiariausių eigumo rezultatų patikimumo tyrimų. Studentai tyrinėjo jų pačių CFD pagrindu sukurtos programos CATRAN galimybes bei rezultatų tikslumą.

CATRAN - programa skirta skysčio judėjimui modeliuoti bei hidromechanikos uždaviniams spręsti. Ši programa leidžia spręsti laivo eigumo klausimus ir gauti sekančias charakteristikas:

- pasipriešinimo priklausomybė nuo laivo greičio;
- laivo korpuso keliamoji jėga;
- hidrostatinės korpuso jėgos;
- laivo nusėdimo priklausomybė nuo laivo greičio;
- bangavimo vizualizacija konkrečiam laivo greičiui;
- slėgio pasiskirstymas laivo korpuso atžvilgiu;
- laivą veikiančios jėgos eksploatacijos metu.

CATRAN programa pakrauna laivo geometriją iš CAD (Computer Aided Design) sistemos bei leidžia nustatyti reikiamas objekto charakteristikas. Rezultatai pateikiami dvimačių ir trimačių grafikų pavidale. Rezultatų patikimumo nustatymui programą testavo laivo David Taylor Model Basin eigumo charakteristikų nustatyme. Analogiško laivo eigumo charakteristikas nustatysime FLOW 3D programine įranga.

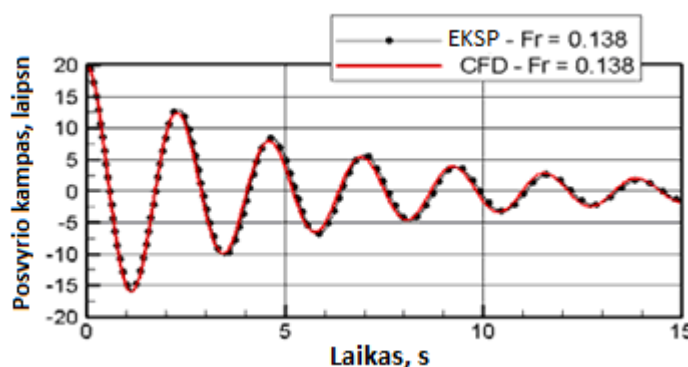
Eksperimento eigoje buvo gauti patenkinami rezultatai. Rezultatų patikimumo etalonų priėmė realaus fizikinio modelinio bandymo rezultatus. Rezultatai buvo palygini ir pateikti grafiko pavidalu (8 pav.).



8 pav. Fizinio bei virtualaus modeliųjų bandymų rezultatų palyginimas (CATRAN в судостроении, 2004)

Kaip matome iš grafiko buvo paimtas laivo greičio diapazonas nuo 1 iki 3 m/s. Rezultatai skiriasi nežymiai. Bendra rezultatų paklaida ne daugiau kaip 5 procentai.

DTMB 5415 buvo plačiai naudojamas įvairiuose hidrodinaminėse tyrimuose ITTC organizacijos nariu, visų pirma dėl CFD rezultatų patikimumo patvirtinimo. Vienas tokių tyrimų buvo atliktas IIHR ir INSEAN nariu. Naudojant DTMB 5415 modelį buvo tirtas laivo supimasis naudojant bortinius kilius. Bortiniai kiliai sumažina supimosi amplitudę iki 2 kartų. Pirmą buvo atliktas realaus modelio fizikinis eksperimentas, bei naudojant CFD programą sumodeliuotas virtualus bandymas esant tam pačiam Frūdo skaičiui $Fr=0.138$. Už etaloną priėmė realaus eksperimento metu gautus rezultatus bei palygino su gautais CFD programine įranga. Rezultatai buvo stebinantys, nes jų paklaida buvo nedaugiau kaip 2-3 procentai (9 pav.).



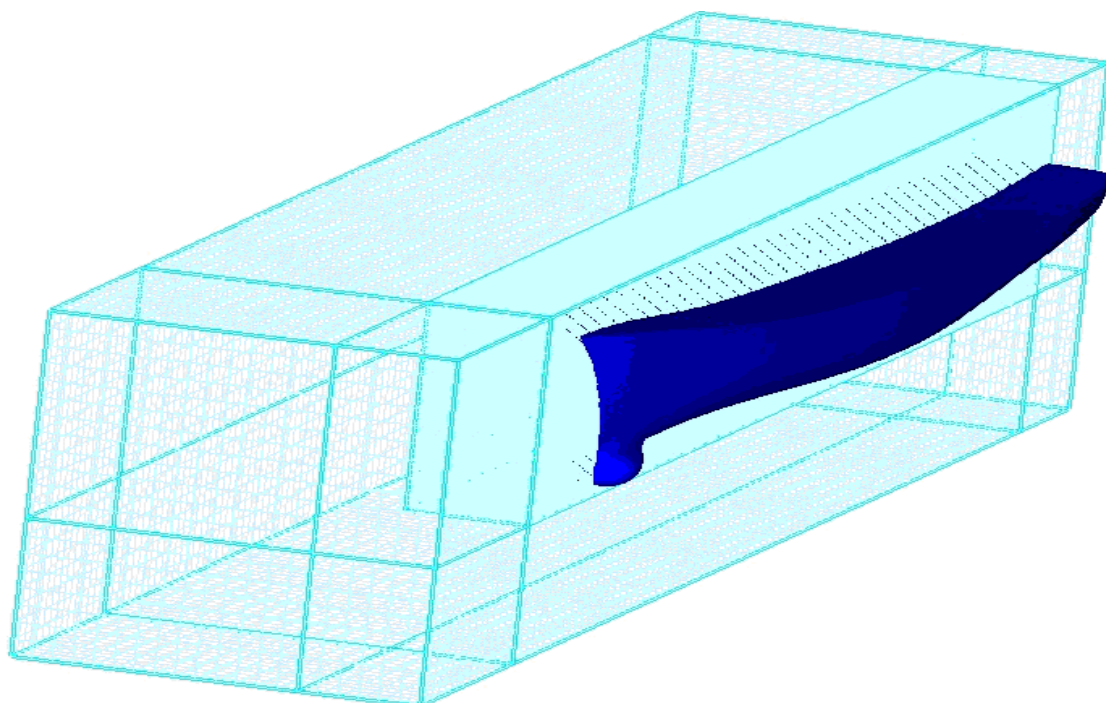
9 pav. Kreno kampu palyginimo rezultatai gauti realaus eksperimento metu ir naudojant CFD programinę įrangą (The specialist Committee on Detailed Flow Measurements, 2011)

DTMB 5415 laivo modelis ne vieną kartą buvo testuojamas bandymo baseine matuojant korpuso pasipriešinimą be išsikišusių dalių ir sraigto. Analogiškai kaip ir mūsų darbe, realaus eksperimento rezultatai buvo lyginami su FLOW 3D programos rezultatais siekiant išsiaiškinti FLOW 3D programos rezultatų patikimumą. FLOW 3D programos pagrindas - tai tiriamojo objekto tinklelio sudarymas. Pagrindė skaičiavimo rezultatai priklauso nuo tinklelio dydžio, tankumo, glotnumo. Kanados mokslininkai tyrė tinklelio įtaką laivo DTMB 5415 pasipriešinimo rezultatams. Buvo išbandyti 5 tinkleliai pradedant nuo 500 000 iki 2 200 000 elementų kiekio. Pastebėta, jog tobulinant tinklėlį rezultatų paklaida sumažėjo nuo 60 % iki 20 % (Ema Muk Pavic, Shin Chin, Don Spencer, 2006).

CFD skysčio tekėjimo analizės pagrindiniai veiksniai:

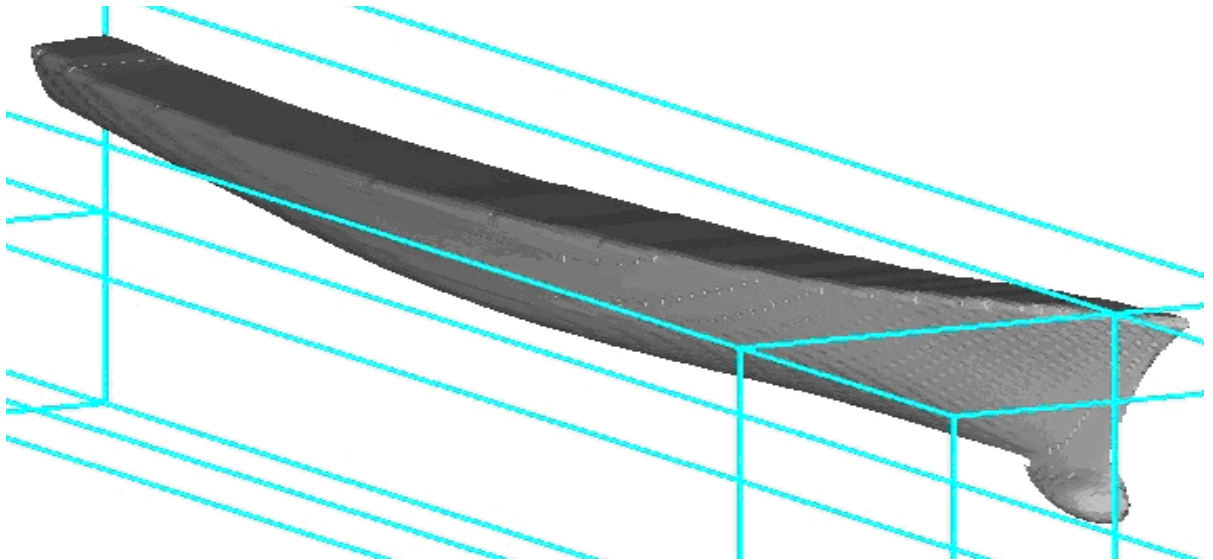
1. Geometrinio modelio kūrimas. Mūsų atvejuje laivo DTMB 5415 3D modelis buvo apdorotas naudojant AutoShip programinę įrangą (1 Priedas). Straipsnis apie *Autoship* programinės įrangos taikymą laivų projektavime buvo skaitytas 2012m., gegužės 18d. 8 - toje mokslinėje konferencijoje „Technologijos mokslo darbai Vakarų Lietuvoje“. Autoriai: G. Šerlinskis, A. Šilov.

2. Nauja simuliacija Flow 3D programoje galima pradėti pasinaudojus įrankių *Add New simulation*. Užrašomas simuliacijos pavadinimas.
3. Skyriuje *Model Setup/Physics/Gravity* nustatomas laisvojo kritimo pagreitis $9,81 \text{ m/s}^2$.
4. Skysčio savybių nustatymas. Skysčio klampumas užduodamas *Viscosity and turbulence* skyriuje.
5. Skyriuje *Fluids/Material/Fluids database* užduodamas kaip medžiaga gėlas vanduo, kuriuo temperatūra $15,3 \text{ C}^\circ$.
6. *General* skyriuje užduodame simuliacijos laiką 120 sekundžių.
7. Skyriuje *Meshing and Geometry* importuojame į CFD Autoship programoje apdorotą 3D laivo modelį, kurio mastelis 1:1 lyginant su realiu laivu. Šiuo tinklu yra apibrėžiamas skaičiavimų masyvas. Tinklas yra sudalinamas į tam tikrą skaičių langelių, šie langeliai gaunami nurodant tam tikrą skaičių pjūvių išilgai koordinatinių ašių. Kuo tankesnis tinklas tuo langelių ribojami tūriai yra mažesni ir tuo geriau yra atvaizduojama korpuso geometrija, tačiau esant didesniai skaičiui langelių padidėja skaičiavimų laikas. Visu pirma, nurodome tinklo ribas ir sudaliname į nurodytą skerspjūvių skaičių. Tinklo parametrus pasirenkame pagal naudojamo kompiuterio techninius parametrus.
8. Sukuriamas tinklas naudojantis *Mesh/add mesh block* (10 pav.).



10 pav. Modelio tinklo kūrimas

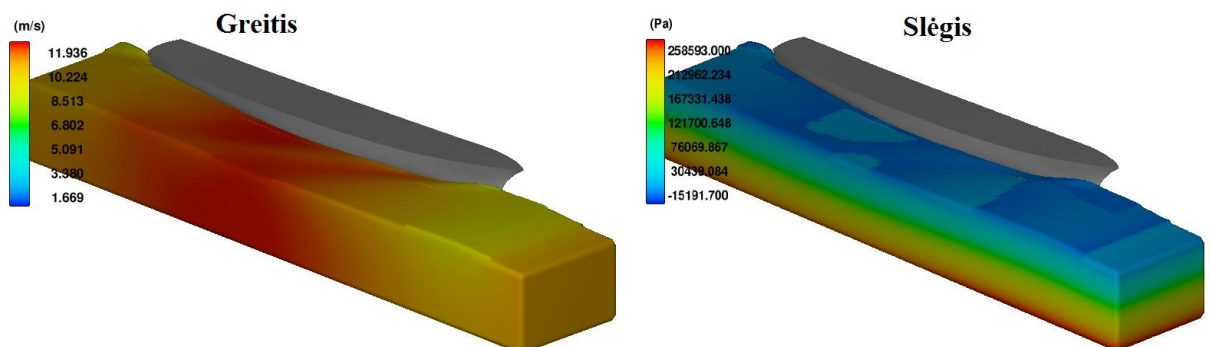
Sukūrus ir panaudojus tinklą galime pamatyti, kaip Flow 3D supranta mūsų modelio korpusą. Kaip minėjome, korpuso geometrijos kokybei bei rezultatų tikslumui turi įtakos tinklo tankumas.



11 pav. Korpuso paviršius pritaikius sukurta tinklę

9. Modelio greitis užduodamas *Initial global* skyriuje.

10. Simuliacijos paleidimas atliekamas *Simulation/run simulation* skyriuje. Paleistą simuliaciją galime stebėti realiu laiku ir matyti kaip keičiasi vandens greitis arba slėgis šalia laivo modelio (12 pav.). Simuliacijos rezultatus galima peržiūrėti grafinio arba teksto pavidalu.



12 pav. Greičio ir slėgio kitimas šalia laivo korpuso

Pirmoje darbo dalyje išsiaiškinome, jog visas vandens pasipriešinimas susideda iš atskirų dalių: trinties, bangavimo ir likusio pasipriešinimo. Detaliau apžvelgėme likusio, bangavimo (Holtropo) bei CFD pasipriešinimo nustatymo metodikas, kurias praktiškai panaudojus antroje darbo dalyje įvertinsime laivo 5415 modelio vandens pasipriešinimą. Kiekvienas laivo pasipriešinimo apytikrio apskaičiavimo metodas turi savo apribojimus ir rekomendacijas. Norint naudoti pasirinkta metodiką yra rekomenduojama, kad laivas atitiktų metodikos reikalavimus. Tačiau kartais vienas ar keli parametrai nepatenka į nustatytas ribas, tada naudojant šį metodą būtina atsižvelgti į tai, kad apskaičiavimu tikslumas gali pablogėti ir rezultatai gali būti nepatikimi.

2. EMPIRINĖ DALIS

2.1 Eksperimento tikslas, laboratorinės įrangos apžvalga

Vandens pasipriešinimo laivo modelio judėjimui eksperimento tikslas - nustatyti modelio korpuso pasipriešinimą esant skirtingiems modelio greičiams.

Eksperimento atlikimo eiga:

- modelio gaminimas;
- matavimo prietaisų parinkimas, derinimas;
- dinaminis modelio balansavimas;
- eksperimento atlikimas;
- rezultatų apdorojimas, analizė.

Modeliniai bandymai yra patikimiausias metodas tiriant šiuolaikinių laivų hidrodinamines charakteristikas. Šie bandymai aktualiausi glisiruojantiems, greitaeigiems bei kelių korpusų laivams. Modeliniams bandymams atlikti sukurti specialūs įrenginiai: bandymo baseinai, hidrolotakai, cirkuliaciniai baseinai, aerodinaminiai ir kavitaciniai vamzdžiai, kavitaciniai ir ledo baseinai. Kadangi tiriamą 5415 laivą testuosime bandymo baseine, apžvelgsime šiuo eksperimento įrenginius bei laboratorinę įrangą.

Magistro studijų praktiką teko atlikti Kelvino hidrodinamikos laboratorijoje, todėl apžvelgsime jos įrangą. Kelvino hidrodinamikos laboratorijoje esantis bandymų baseinas yra aprūpintas įranga, leidžiančia tirti laivo jūrines savybes susijusias su laivo stabilumu, eigumu ir supimusi. Dauguma mokslinių hidrodinaminių eksperimentų atliekami Kelvino hidrodinamikos laboratorijoje, kuri įsikūrusi Vakarų Škotijos mokslo parke, Glazgo mieste. Šioje laboratorijoje yra atliekami pirmosios ir antrosios pakopos studentų moksliniai projektai, tyrimai bei komerciniai bandymai. Pagrindiniai bandymai atliekami laboratorijoje yra laivo stovumo tyrimai, bangų įtaka laivo stabilumui, vandens pasipriešinimas laivo judėjimui. Pastaruoju metu laboratorija atlieka bangų bei potvynių energija naudojančių įrenginių skirtų pramonei bandymus. Kelvino hidrodinamikos laboratorijos bandymų baseino ilgis 76m., plotis 4.6m., gylis 2,5m. (13 pav.)



13pav. Bandymo baseinas

Vežimas, kurio parametrai 5m x 5m., įrengtas kompiuterizuotas valdymo pultas, maksimalus vežimo greitis 5m/s.

Klavišinis bangų generatorius, kuris generuoja reguliarias ir nereguliarias bangas iki 0,5m aukščio priklausomai nuo vandens lygio (14 (B) pav.)

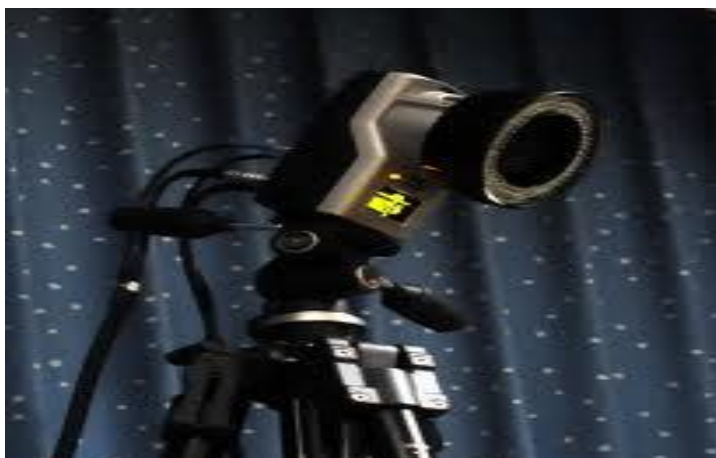


14 pav. (A) Bangų slopintuvas, (B) Bangų generatorius (autorius nuotrauka)

Tanko gale įrengtas dirbtinis aukštos kokybės paplūdimys (14 (A) pav.), kuris sugeria iki 95 procentų bangų energijos, todėl bangų atspindėjimas minimalus.

Duomenų gavimo įranga: modulinė duomenų surinkimo ir valdymo sistema, iki 64 įvesties bei 20 išėjimo kanalų, duomenų ėmimo dažnis iki 60 kHz.

Bandomi laivo modeliai paprastai gali siekti iki 4m ilgio. Laivų modeliai ir kiti plaukuojantys įrenginiai yra vertinami taikant realiu laiku veikiančią bekontaktę infraraudonųjų spindulių 4-rių kamerų sistemą. Ant testuojamo objekto montuojami keturi jutikliai, kuriuos filmuoja atskiros keturios *Qualisys* kameros (15 pav.)



15 pav. *Qualisys* judesio fiksavimo kamera

- pasipriešinimo jėgos matavimo dinamometrai.
- 3 AXOS skysčio greičio matavimo sistema.

2.2 Modelio gamyba ir paruošimas eksperimentui

Mokslinio darbo tiriamasis objektas David Taylor Model Basin 5415 laivas (16 pav.). DTMB 5415 laivo modelis buvo sukurtas 1980 metais kaip JAV karinio jūrų laivyno korpuso dizaino tyrimams. Realiai laivas neegzistuoja.



16 pav. Tiriamasis objektas DTMB 5415 (Jones D., 2010)

Tiriamąojo objekto DTMB 5415 parametrai pateikti 2 lentelėje.

2 lentelė

Laivo tipas	-	Karinis (greitaeigis)
Bendras ilgis, L	m	142,18
Laivo ilgis tarp statmenų, L _{pp}	m	141,97
Laivo plotis, B	m	19,00
Grimzlė, d	m	6,15
Vandentalpa, V	m ³	8706,8
Suvilgyto paviršiaus plotas, Ω	m ²	2995,0
Vaterlinijos plotas, SWL	m ²	
Vandentalpos pilnumo koeficientas, δ	-	0,51
Išilginio pilnumo koeficientas, φ	-	0,62
Midelinio španhauto pilnumo koeficientas, β	-	0,82
Vaterlinijos pilnumo koeficientas, α	-	0,77
Vandentalpos centro aplikatės poslinkis nuo midelio į laivagalį, x_c	%	-0,51
$(1 + k_1)$ - laivo korpuso formos faktorius arba formos pasipriešinimo proporcingumo koeficientas	-	1,160
Skersinis bulbos plotas	m ²	4,0
Eksploatacinis laivo greitis	mazgai	20,0

DTMB 5415 modelio prototipą tyria ir eksploatuoja sekančios institucijos:

- INSEAN - Italijos tyrimų institutas, aktyviai dalyvauja laivų statybos ir inžinerijos srityje pagal nacionalinį Italijos mokslinių tyrimų tarybos paramą. DTMB 5415 modelio mastelis 1:24.83.

- IIHR - gerai žinomas pasaulyje mokslo švietimo centras, kuris sutelkia dėmesį į hidraulinės inžinerijos ir skysčio mechanikos problemas. Centras įsikūręs JAV Maxwell Stanley hidrodinamikos laboratorijoje. DTMB 5415 modelio mastelis 1:46.58.
- FORCE - garsus Kanados bandymų centras, kuris nagrinėja potvynių ir atoslūgių energijos technologijas. DTMB 5415 modelio mastelis 1:35.48. (US Navy Combatant, DTMB 5415, 2008).

Pagrindinis reikalavimas laivo modeliui yra geometrinis panašumas. Modelio korpuso gaminimui laboratorijoje naudojamos šios medžiagos: medis, poliuretano putplastis, anglies /stiklo pluoštas. Modeliai gaminami pasitelkus CAD/CAM procesą, todėl forma išpjaunama automatizuotai (17 (A) pav.), pagal turimą brėžinį. Atlikus išpjovimą toliau modelis užbaigiamas ranka. Modelio korpuso paviršius turi būti pakankamai švelnus, jo apdirbimui naudojamas 300-400 šiurkštumo markės šveitimo popierius. Nušveitus modelį, jis yra padengiamas specialia danga ir nudažomas dažais (17 (B) pav.).



17 pav. (A) Automatizuotas modelio išpjovimas, (B) užbaigtas modelis

Išilgai modelio ant jo korpuso nubrėžiami španhautai (18 pav.). Dažniausiai yra naudojama dešimties španhautų numeravimo sistema, pradedant nuo laivagalio nuliniu ir užbaigiant dešimtuoju laivapriekyje. Jeigu reikalingi papildomi tarpiniai španhautai, jie žymimi skaičiais su dešimtąja dalimi 9.5, 9.6 ir t.t. Vaterlinijos taip pat yra sužymimos ant modelio paviršiaus, vaizduojama linija atitinkanti apkrauto laivo grimzlę ir neapkrauto laivo grimzlę. Modelio korpusas turi atitikti nustatytą toleranciją, kuri jo pločiui, grimzlei yra taikoma $\pm 1\text{mm}$ ir ilgiui $\pm 0,05\%L$.



18 pav. Ant laivo modelių paviršių žymimos linijos - atitinkančios španhautus ir vaterlinijas

Modelio paruošimas eksperimentui priklauso nuo eksperimento tipo ir eksperimento tikslo. Jeigu eksperimento tikslas yra išmatuoti pasipriešinimo jėgas veikiančias laivo modelį, tuomet laivo masių pasiskirstymas išilgai ir skersai laivo turi būti kuo tikslesnis lyginant su realaus dydžio laivu. Prototipo fizikinių dydžių santykiai su laivo modeliu pateikiami 3 lentelėje.

Fizikinių dydžių kitimo santykiai

3 lentelė

Dydis	Prototipo	Idealaus modelio	Praktinio modelio
Laivo ilgis	L	L/λ	L/λ
Vandens tankis	ρ	ρ/c	ρ/c
Laikas	t	$t/\lambda^{1/2}$	$t/\lambda^{1/2}$
Masė	m	$m/c\lambda^3$	$m/c\lambda^3$
Greitis	v	$v/\lambda^{1/2}$	$v/\lambda^{1/2}$
Pagreitis	a	a	a
Jėga	F	$F/c\lambda^3$	$F/c\lambda^3$
Vandentalpa	V	$V/c\lambda^3$	$V/c\lambda^3$
Momentas	M	$M/c\lambda^4$	$M/c\lambda^4$
Slėgis	P	$P/c\lambda$	$P/c\lambda$
Dažnis	ω	$\omega/\lambda^{1/2}$	$\omega/\lambda^{1/2}$
Inercijos momentas	I	I/λ^4	$Ie/c\lambda^5$
λ -prototipo ir modelio ilgių santykis; c- Prototipo ir modelio vandens masių tankių santykis; e- Prototipo ir modelio elastingumo modulio santykis;			

Atliekant vandens pasipriešinimo eksperimentus pakanka, kad laivo inercijos spindulys ir vertikalus svorio centras atitiktų realaus laivo reikšmes tik tam tikrame mastelyje. Priklausomai nuo laivo inercijos spindulio reikšmės laivo modelio supimosi periodas gali būti vienodas arba skirtis

nuo realaus laivo. Kai šie dydžiai yra apytikriai vienodi, laikoma, kad elementarios laivo korpuso masės pasiskirsčiusios vienodai.

Laivo inercijos spindulys - tai atstumas nuo laivo svorio centro iki taško, kuriame yra sukoncentruota visa laivo (modelio) masė. Laivo ir modelio inercijos charakteristikos bus vienodos, kuomet modelio ir realaus laivo supimosi periodai bus vienodi, o masės inercijos momentas skirsis tam tikru masteliu, to pasiekama taikant nuosavų svyravimų eksperimentą (19 pav.).



19 pav. Nuosavų svyravimų eksperimentas

Laivo modelis keltuvo pagalba yra užkeliamas ant specialios prizmės, kurios konstrukcija modeliui leidžia laisvai svyruoti. Laivo modelyje įtaisoma konstrukcija su išdėstytais tam tikros masės svoriais, jų padėtis išilgai laivo yra koreguojama, taip kartu keičiasi ir svyravimų periodas. Svyravimų periodas yra apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{I}{W \cdot g \cdot GM}}, \quad (33)$$

$$I = \frac{T^2 \cdot W \cdot g \cdot GM}{4\pi^2}, \quad (34)$$

čia g - laisvojo kritimo pagreitis, m/s^2 ;

GM - laivo metacentrinis aukštis, m ;

W - laivo masė, kg ;

T - svyravimų periodas, s .

Eksperimento metu inklinografo pagalba yra išmatuojami svyruojančios sistemos svyravimai ir nustatomas svyravimų periodas. Duomenys yra apdorojami ir paskaičiuojamas sistemos inercijos momentas. Pačios prizmės inercijos momentas yra atimamas iš visos sistemos inercijos momento, taip gaunamas tik modelio inercijos momentas. Žinant laivo modelio inercijos momentą, jo inercijos spindulys yra apskaičiuojamas taip:

$$k = \sqrt{I \cdot W} , \quad (35)$$

čia I – laivo inercijos momentas $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

W – laivo masė, kg .

Krenavimo bandymas praktiškai atliekamas visiems modeliams, nes būtina nustatyti vertikalų svorio centro padėtį ir prireikus keisti norima linkme. KH laboratorijoje šis eksperimentas atliekamas panaudojant elektroninį inklinografą. Eksperimentas atliekamas tipiškai: laivo modelio centre yra uždedamas inklinografas ir bortų kraštuose uždedami vienodo dydžio svoriai (20 pav.). Vieną iš šių svorių nuėmus laivas pradeda svyruoti, eksperimento rezultatai fiksuojami ir apdorojami „Spike2“ programine įranga. Šiuo būdu atliekamas eksperimento privalumas būtų: rezultatų tikslumas ir neilga eksperimento trukmė.

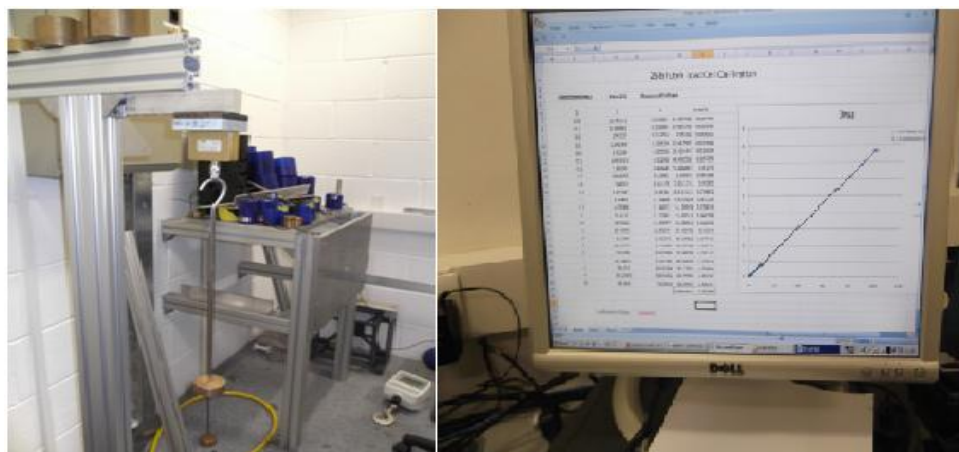


20 pav. Krenavimo bandymas atliekamas panaudojant inklinografą

2.2.1 Matavimo prietaisų kalibravimas

Prietaisai naudojami eksperimento rezultatams fiksuoti turi būti suderinti. Prietaisai yra kalibruojami pagal etaloninius svorius, elektrinius pulsus arba pagal kitą suderintą prietaisą. Kalibravimo diagramose pateikiamos prietaisu išmatuoto dydžio priklausomybė nuo etaloninio dydžio (pvz. Įtampos priklausomybė nuo derinimui naudojamos masės). Eksperimentams, tokiems kaip vandens pasipriešinimas, dinamometro derinimas yra vienas iš svarbiausių etapų pasiruošiant eksperimentui. Kalibravimas turi apimti kuo ilgesnę eksperimentui naudojamų prietaisų tarpusavio sąveikos grandinę (signalų stiprintuvas, filtras, A/D konverteris).

Dinamometras yra kalibruojamas ant vertikalaus stendo naudojant etaloninius svorius ir fiksuojamas įtampos kitimas, dažniausiai naudojami metaliniai tam tikros masės svoriai (21 pav.).



21 pav. Dinamometro kalibravimas

Šis kalibravimas atliekamas uždedant ant laikiklio žinomo dydžio masę ir užrašomas įtampos pasikeitimas, taip atliekama su visais derinimui naudojamais svoriais. Turint informaciją apie įtampų kitimus priklausomai nuo uždėto svorio yra apskaičiuojamas koreliacijos koeficientas. Šis koeficientas yra naudojamas įtampos pavertimui į svorio matavimo vienetus ir apskaičiuojamas pagal šia formulę (Кочин В. Мороз В., 2009):

$$c = \frac{1}{n} \sum \frac{F}{V}, \quad (36)$$

čia n - matavimų skaičius;

V - prietaisu matuojamas dydis, įtampa V ;

F - kalibravimui naudojamo dydžio svoris, N .

Prietaisų derinimas yra neatskiriama bet kokio eksperimento programos dalis. Tik tinkamai ir kruopščiai paruošus prietaisus ir įrangą galima tikėtis patikimų rezultatų.

2.3. ITTC reikalavimai pasipriešinimo eksperimentui

Pasipriešinimo bandymas atliekamas norint nustatyti modelio korpuso pasipriešinimą esant konkrečiam modelio greičiui. Šiuo tikslu modelio pasipriešinimas ir jo greitis yra matuojami vienu metu. Pasipriešinimo jėga arba horizontali dedamoji jėga priešinga modelio judėjimui į priekį nustatoma matuojant modelio vilkimo jėgą.

Laivo modelis turėtų būti gaminamas pagal ITTC rekomenduojama procedūrą 7.5-01-01-01. Ypatingas dėmesis skiriamas laivo modelio paviršiaus šiurkštumo, apdailos, modelio dydžio aspektams. Reikalaujama, kad laivo modelis būtų ko didesnis atsižvelgiant į bandymo baseino

matmenis. Pagal ITTC rekomendacijas modelis turi būti testuojamas viena arba abiem sekančiomis sąlygomis:

1. Laivo modelis testuojamas be išsikišusių dalių. Šis bandymas skirtas nustatyti modelio korpuso formos pasipriešinimo koeficientams.
2. Laivo modelis testuojamas su išsikišusiomis dalimis. Šis bandymas skirtas pasipriešinimo koeficiento padidėjimo nustatymui dėl korpuso priedų.

Laivo vilkimo jėga turėtų būti pridėta ko arčiau sraigto veleno linijos, siekiant užtikrinti kuo realesnį poveikį. Prie modelio turi būti pritvirtintas pasipriešinimo dinamometras taip, kad matuotų tik horizontalią pasipriešinimo jėgą. Prie laivo turi būti montuojamos vadinamos „nukreipiančiosios“, kurios modeliui judant neleidžia jam nukrypti nuo kurso arba linguoti. Modelis turi būti montuojamas lygiagrečiai vežimo bėgių linijos. Pagal ITTC reikalavimus lygiagretumo nustatymo paklaida gali būti ne daugiau kaip 0,05 %. Būtina atsižvelgti, kad matuojamų įrenginių kabeliai, kurie pritvirtinti prie modelio, neturėtų jokios įtakos modelio pasipriešinimo jėgos matavimui. Iš žemiau esančios schemos matome iš ko susideda pasipriešinimo bandymas (24 pav.). Yra matuojami sekantys dydžiai: modelio greitis, visas modelio pasipriešinimas, grimzlė pokytis ir diferentas, vandens temperatūra. Pagal ITTC reikalavimus pasipriešinimo dinamometras turi išmatuoti horizontalią vilkimo jėgą 0,2 % arba 0,05 N tikslumu.



22 pav. KHL laboratorijoje naudojami dinamometrai

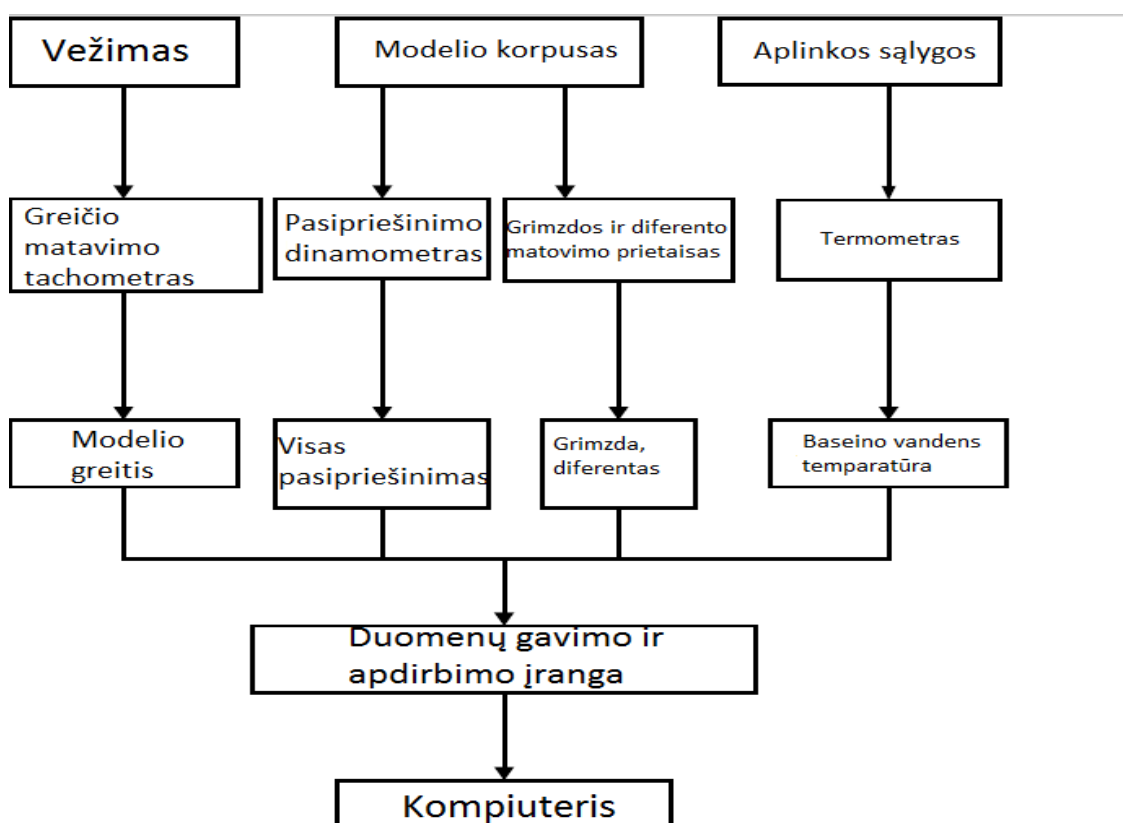
Modelio greitis matuojamas dviem būdais: a) matuojant vežimo greitį žemės atžvilgiu naudojant optinius skaitmeninius jutiklius; b) matuojant vežimo greitį vandens atžvilgiu naudojant srovės matuoklį. Modelio greitis turi būti išmatuotas nedidesne kaip 0,1 % paklaida nuo maksimalaus greičio arba 3 mm per sekundę tikslumu.

Modelio ir vežimo greitis KH laboratorijoje matuojamas įrenginiu, kuris paremtas elektromagnetinės indukcijos dėsnio. Vežimėliui judant tam tikru greičiu yra sukamas prietaiso rotorius taip yra generuojama elektros srovė. Konverteris priima įtampą ir perskaičiuoja ją į greičio matavimo vienetus (23 pav.).



23 pav. Greičio fiksavimo sistema

Diferentas ir grimzlės pokytis matuojamas optiniais prietaisais. Pagal ITTC reikalavimus vandens temperatūra turi būti išmatuota puse modelio grimzlės gylyje termometru.



24 pav. Pasipriešinimo bandymo schema

Apžvelgę modelinio bandymo įrangą galima teigti, jog automatizuota duomenų fiksavimo sistema leidžia atlikti eksperimentus pagal ITTC reikalavimus, kas šiandienai yra patikimiausias ir sėkmingiausias darbų sąlygų kriterijus bet kokiam bandymo baseinui.

2.4 Eksperimentinis tyrimas

Pagal ITTC rekomendacijas prieš kiekvieną bandymą būtina įsitikinti, jog visi matavimo prietaisai rodo nulį. Modelis velkamas tokiu pat Frūdo skaičiaus greičiu kaip ir visavertis realus laivas. Pasirenkamas reikiamas modelio greitis, kuris pasiekiamas vežimo pagalba. Svarbu, kad greitis neviršytų konkretaus pasirinkto greičio, o jei viršija - sumažinti, nes turės įtakos bangavimo pasipriešinimas.

Rezultatų fiksavimas gali būti dvejų tipų: a) pasiekus pastovų reikiamą greitį; b) pradedant nuo tada, kai modelis yra ramioje būsenoje. Imama vidutinė rezultatų vertė esant pastoviam testuojamam greičiui. Kartais net esant pastoviam greičiui galima pamatyti žymius rezultatų pokyčius. Tokį reiškinį sukelia bangavimo pasipriešinimas. Jei tokių svyravimų įtaka rezultatams žymi, tai apskaičiuojamas jų vidurkis. Tokių svyravimų periodas apskaičiuojamas sekančiai:

$$T=4v\pi/g,$$

čia v - modelio greitis, m/s.

(37)

Maksimalios ir minimalios rezultatų vertės kartų su vidutinėmis bei standartiškais nuokrypiais yra išsaugomi po kiekvieno bandymo. Pagal ITTC QM 7.5-02-02-02 rekomendacijas būtina atsižvelgti į likusias po kiekvieno bandymo sroves, esančias vandens paviršiuje. Todėl tam, kad išvengti rezultatų paklaidų būtina įsitikinti kad vanduo yra nusistovėjęs. Greitis, modelio pasipriešinimas, grimzlės pokytis ir diferentas turi būti matuojami atliekant kiekvieną naują bandymą.

Pasipriešinimo testo rezultatai turi būti pateikti ataskaitoje, kurioje turi būti sekanti informacija:

- Modelio specifikacija: modelio identifikavimo numeris, modelio mastelis, pagrindiniai modelio matmenys, sudrėkinto paviršiaus plotas;
- Bandymo atlikimo vieta;
- Bandymo baseino parametrai: ilgis, plotis, gylis;
- Eksperimento laikas; kiekvieno bandymo laikas ir data;
- Vandens temperatūra, tankis;
- Modelio formos faktorius;
- Kiekvieno greičio pasipriešinimas, grimzlės pokytis.

Norint užtikrinti rezultatų patikimumą, bei paties pasipriešinimo eksperimento eigos tikslumą, būtina atsižvelgti į ITTC pasipriešinimo eksperimento metodiką.

2.5 Pasipriešinimo eksperimento rezultatų apdorojimas

Bandymų rezultatai yra apdorojami taikant šias formules:

$$C_{TM} = \frac{R_T}{0.5\rho S v^2}, \quad (38)$$

čia C_{TM} - viso pasipriešinimo koeficientas;

ρ - vandens masės tankis;

S - modelio povandeninės dalies plotas;

R - visas pasipriešinimas;

v - modelio greitis.

$$C_R = C_{TM} - C_{FM}(1+k), \quad (39)$$

čia C_R likusio pasipriešinimo koeficientas;

C_{FM} - techniškai lygios plokštės trinities pasipriešinimo koeficientas;

(1+k) - formos faktorius.

$$C_{FM} = \frac{0.075}{(\lg R_n - 2)^2}, \quad (40)$$

čia R_n - Reinoldso skaičius

$$C_{TM}(\text{Re}, Fr) = (1+k)C_{FM}(\text{Re}) + C_w, \quad (41)$$

čia C_w - bangavimo pasipriešinimo koeficientas.

Formos faktorius surandamas iš grafiko (angl. Prohaska plot) vaizduojančio C_{FM} priklausomybę nuo Fr^4 arba apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$(1+k) = \frac{C_{TM}}{C_{FM}}, \quad (42)$$

Ši formulė taikoma mažiems frūdo skaičiams nuo 0,1 iki 0,2.

Praktikos vietoje gavome karinio laivo 5415 modelinio bandymo pasipriešinimo rezultatus, kuriuos eigoje išanalizuosime bei palyginsime su kitais rezultatais gautais apytikriais metodais ir virtualaus modelinio eksperimento metų (2 Priedas).

Bandymo Nr.	Greitis, m/s	Pasipriešinimas, N
1	1.05	3.131
2	1.22	4.162
3	1.31	4.834
4	1.39	5.417
5	1.48	6.318
6	1.57	7.319
7	1.66	8.395
8	1.74	9.390
9	1.83	10.634
10	1.92	12.362
11	2.01	14.775
12	2.09	17.455
13	2.26	24.095

Tam, kad pasipriešinimo modelinio eksperimento rezultatus galima būtų palyginti su jau gautais kitų metodų rezultatais, juos būtina perskaičiuoti į natūrą. Studijų metu susipažinome su dvejais perskaičiavimo metodais, kuriuos ir panaudosime.

Pirmasis metodas. Metodas pagrįstas pasipriešinimo skaidymu į dedamąsias dalis: trinties ir likusio. Priimama, kad esant modelio ir natūros Frūdo skaičių lygybei, iki galo modeliuojamas likęs pasipriešinimas C_R . Kartu bus vienodi modelio ir natūros likusio pasipriešinimo koeficientai, jei $Fr_m = Fr$. Tai Frūdo metodas arba likusio pasipriešinimo metodas.

Eksperimento rezultatų apdorojimo eiliškumas yra toks:

$$Re_{m1} = \frac{v_{m1} L_m}{\nu_m} = 2,572 \cdot 10^6, \quad (43)$$

čia v_{m1} - modelio vilkimo greitis, m/s;

L_m - modelio ilgis, m;

ν_m - vandens kinematinio klampumo koeficientas modeliui (vandens temperatūra bandymo baseine $t=15,3^\circ\text{C}$., tada klampumo koeficientas $\nu_m=1,138 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$).

Apskaičiuojamas modelio klampumo pasipriešinimo koeficientas C_m :

$$C_{m1} = \frac{2R_{m1}}{\rho_m v_{m1}^2 \Omega_m} = 4,93 \cdot 10^{-3}, \quad (44)$$

čia R_m - modelio pasipriešinimas, kN;

ρ_m - vandens masės tankumas bandymų baseine, kg/m³;

Ω_m - modelio suvilgytojo paviršiaus plotas, m².

Apskaičiuojamas modelio trinties pasipriešinimo koeficientas:

$$C_{Fm1} = 0,455(\lg Re_{m1})^{-2,58} = 3,77 \cdot 10^{-3}. \quad (45)$$

Apskaičiuojamas likusio pasipriešinimo koeficientas C_R :

$$C_{R1} = C_{m1} - C_{Fm1} = 1,16 \cdot 10^{-3}. \quad (46)$$

Apskaičiuojamas natūros objekto greitis:

$$v_1 = v_{m1} \sqrt{k} = 7,498 \text{ m/s}. \quad (47)$$

Apskaičiuojamas natūralaus objekto Reinoldso skaičius:

$$Re_1 = \frac{v_1 L}{\nu} = 9,346 \cdot 10^4. \quad (48)$$

Apskaičiuojamas natūralaus objekto trinties pasipriešinimo koeficientas:

$$C_{F1} = 0,455(\lg Re_1)^{-2,58} = 1,58 \cdot 10^{-3}. \quad (49)$$

Apskaičiuojamas koeficientas C :

$$C_1 = C_{F1} + C_{R1} = 2,74 \cdot 10^{-3}. \quad (50)$$

Apskaičiuojamas natūralaus objekto pasipriešinimas R , kN:

$$R_1 = C_1 \frac{\rho v_1^2}{2} \Omega = 237,0 \text{ kN}. \quad (51)$$

Apskaičiuojamas variklio galingumas P_E :

$$P_{E1} = R_1 v_1 = 1777,2 \text{ kW}. \quad (52)$$

Visi kiti skaičiavimai atliekami analogiškai priklausomai nuo modelio greičio ir pasipriešinimo naudojantis Excel programinę įrangą (4 Priedas). Natūralaus laivo pasipriešinimo priklausomybė nuo greičio R_1 pateikiama 5 lentelėje, bei grafike (25 pav.).

Natūralaus laivo pasipriešinimo priklausomybė nuo greičio R_1

5 lentelė

Bandymo Nr.	Greitis, m/s	Pasipriešinimas, kN
1	7.50	237.0
2	8.71	319.0
3	9.36	376.8
4	9.93	424.6

5	10.57	510.0
6	11.21	607.1
7	11.85	712.6
8	12.43	810.1
9	13.07	934.9
10	13.71	1124.0
11	14.35	1404.3
12	14.93	1724.7
13	16.14	2529.5

Antrasis modelinių bandymų rezultatų perskaičiavimo metodas pagrįstas prielaida, kad klampumo pasipriešinimas proporcingas trinties pasipriešinimui $C_v = fC_F$. (53)

čia C_v - klampumo pasipriešinimo koeficientas;

f - proporcingumo koeficientas arba formos faktorius;

Esant mažiausiam modelio buksyravimo greičiui, kai Frūdo skaičius $<0,1$, turėsime:

$$Fr_m = \frac{v_m}{\sqrt{gL_m}} < 0,1. \quad (54)$$

$$Fr_m = \frac{v_m}{\sqrt{gL_m}} = 0,096. \quad (55)$$

Tuomet apskaičiuojame proporcingumo koeficientą:

$$f = C_m / C_{Fm} = 1.308. \quad (56)$$

Apskaičiuojami modelio klampumo pasipriešinimo koeficientai:

$$C_{vm1} = fC_{Fm1} = 4,93 \cdot 10^{-3}. \quad (57)$$

Apskaičiuojamas bangavimo pasipriešinimo koeficientas:

$$C_{w1} = C_{m1} - C_{vm1} = 0,00. \quad (58)$$

Apskaičiuojamas natūros klampumo pasipriešinimas:

$$C_{v1} = fC_{F1} = 2,07 \cdot 10^{-3}. \quad (59)$$

Apskaičiuojamas koeficientas C :

$$C_1 = C_{v1} + C_{w1} = 2,07 \cdot 10^{-3}. \quad (60)$$

Apskaičiuojamas natūralaus laivo pasipriešinimas R , kN :

$$R_1 = C_1 \frac{\rho v_1^2}{2} \Omega = 178,8 kN. \quad (61)$$

Apskaičiuojamas variklio galingumas P_E :

$$P_{E1} = R_1 v_1 = 1341 \text{ kW}.$$

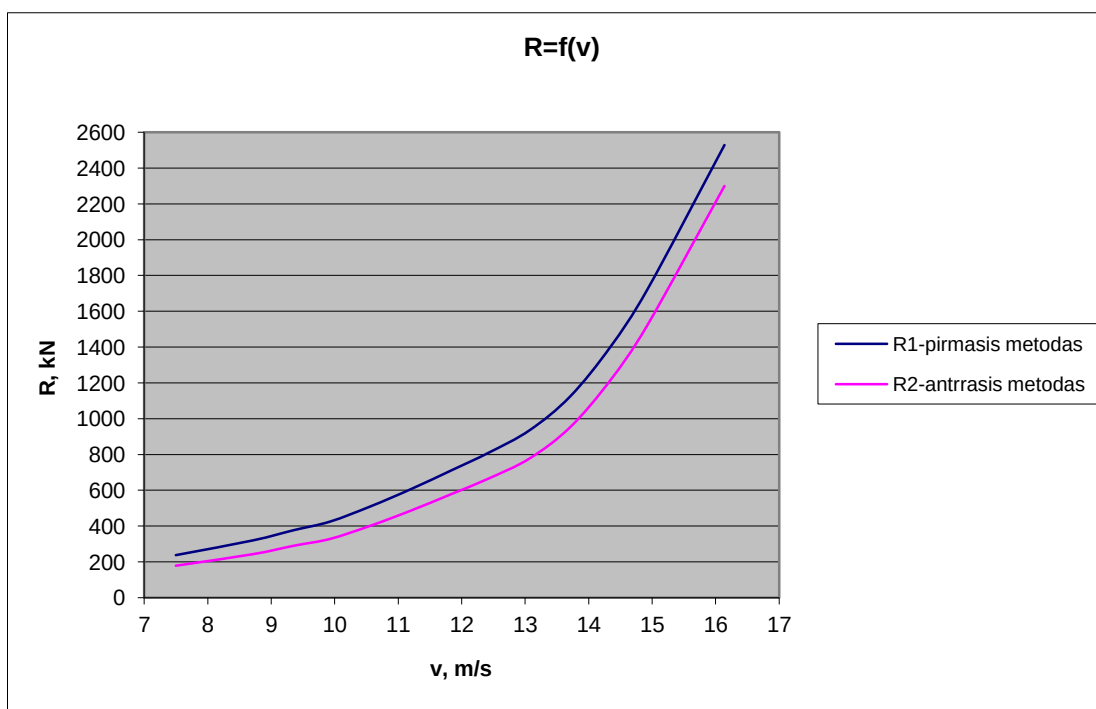
(62)

Visi kiti skaičiavimai atliekami analogiškai priklausomai nuo modelio greičio ir pasipriešinimo naudojantis Excel programinę įrangą žr. 4 Priedą. Natūralaus laivo pasipriešinimo priklausomybė nuo greičio R2 pateikiama 6 lentelėje.

Natūralaus laivo pasipriešinimo priklausomybė nuo greičio R1 6 lentelė

Bandymo Nr.	Greitis, m/s	Pasipriešinimas, kN
1	7.50	178.8
2	8.71	242.8
3	9.36	290.4
4	9.93	328.4
5	10.57	402.4
6	11.21	487.5
7	11.85	580.4
8	12.43	666.2
9	13.07	777.5
10	13.71	952.3
11	14.35	1217.9
12	14.93	1524.7
13	16.14	2299.4

Pirmo ir antro metodo eksperimento duomenų perskaičiavimo į natūrą palyginimas pavaizduotas 25 pav.



25 pav. Pirmuoju ir antruoju metodu gautų pasipriešinimo rezultatų palyginimas

Antruoju metodu perskaičiuotų rezultatų dydžiai mažesni palyginus su pirmuoju metodu. Rezultatų skirtumas apie 15%. Toks skirtumas gali būti todėl, jog parenkamas modelio greitis tenkinantis sąlyga $Fr \leq 0,10$. Tuomet modelis praktiškai nepatiria bangavimo pasipriešinimo ir visas pasipriešinimas susideda tik iš klampumo pasipriešinimo. Todėl rezultatus perskaičiuotus antruoju metodu skaitysimė nepatikimais. Už patikimų rezultatų etaloną priimame rezultatus perskaičiuotus pirmuoju metodu ir ateityje apytikrius rezultatus lyginsime, būtent su gautais pirmuoju metodu.

2.6 Eksperimentų rezultatų įvertinimas

Tam, kad įvertinti rezultatų patikimumą duomenis, gautus naudojant apytikrius pasipriešinimo metodus, palyginsime su modeliniuose bandymuose gautais rezultatais.

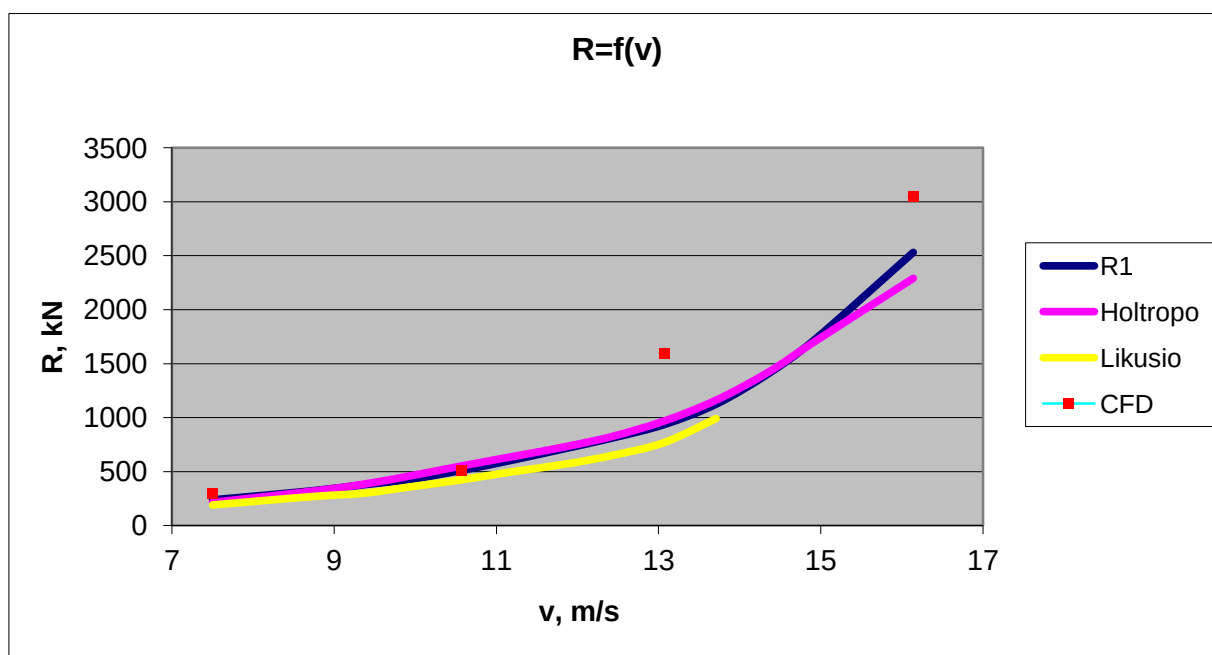
Vandens pasipriešinimo rezultatai apskaičiuoti bangavimo (Holtropo) metodu (3 Priedas), likusio pasipriešinimo metodu (5 Priedas), CFD (Flow 3d) metodu (6 Priedas). Flow 3D programa išmeta daugybę simuliacijos eigos rezultatų. Programa neišmeta konkretaus vieno pasipriešinimo rezultato esant konkrečiam laivo greičiui. Rezultatų kiekis priklauso nuo simuliacijos atlikimo laiko. Rekomenduojama imti kelių rezultatų vidurkį artėjant simuliacijos pabaigai. Tokia rekomendacija susijusi su vandens srauto greičio bei slėgio nusistovėjimu artėjant simuliacijos pabaigai. Darbe stengsimės paimti arčiausius modelinių bandymų rezultatams duomenis. 6 Priede esant kiekvienam ištirtam greičiui paimtų rezultatų vidurkis pažymėtas geltonai. Pasirinktinai vandens pasipriešinimo simuliacija buvo atlikta tik vienai borto daliai nuo midelinio španhauto. Atitinkamai, kad gauti viso laivo pasipriešinimą, rezultatus dauginsime iš dviejų.

Eksperimentų rezultatų palyginimas. 7 lentelė

v	Fr	R₁_{eksp.}	R_{Holtr}	R_{lik}	R_{CFD}	ΔR_{Holtr}	ΔR_{lik}	ΔR_{CFD}
m/s	-	kN	kN	kN	kN	%	%	%
7.50	0.201	237.0	213.9	189.4	294.4	-9.7	-20.1	+24.4
8.71	0.233	319.0	315.9	266.4	-	-1	-16.5	-
9.36	0.251	376.8	382.5	298.4	-	+1.5	-20.8	-
9.93	0.266	424.6	458.9	356.5	-	+7.5	-16.0	-
10.57	0.283	510.0	551.9	422.7	510.2	+7.6	-17.1	+0.04

11.21	0.300	607.1	640.5	498.7	-	+5.2	-17.8	-
11.85	0.318	712.6	730.5	567.9	-	+2.5	-20.3	-
12.43	0.333	810.1	826.0	648.5	-	+1.9	-19.9	-
13.07	0.350	934.9	969.2	767.7	1596.9	+3.5	-17.9	+70,8
13.71	0.367	1124.0	1162.5	990.4	-	+3.3	-11.8	-
14.35	0.385	1404.3	1420.3		-	+1.2		-
14.93	0.400	1724.7	1707.6		-	-1		-
16.14	0.432	2529.5	2291.9		3046.6	-9.4		+20,4
Vidutinė paklaida, %						4.25	17.8	28,9

Už patikimus pasipriešinimo rezultatus priėmėme R1 pirmuoju metodu apskaičiuotus modelinių bandymų duomenis ir pažymėjome stulpelį kitą spalva. Kaip matome iš rezultatų palyginimo lentelės, arčiausiai modelinių eksperimentų rezultatų yra Holtropo metodu apskaičiuotas pasipriešinimas. Holtropo metodu vidutinę rezultatų paklaidą nuo modelinių bandymų rezultatų sudaro 4,25 procentai. Likusio pasipriešinimo metodo rezultatų vidutinė paklaida yra 17,8 procentai. Blogiausių pasipriešinimo rezultatus gavome naudojantis CFD metodiką. Flow 3D programos vidutinė paklaida yra 28,9 procentai. Apžvelgtų metodų vandens pasipriešinimo priklausomybė nuo laivo greičio grafiškai pavaizduota 26 pav.



26 pav. Rezultatų palyginimo grafikas

Skaiciuojant likusio pasipriešinimo metodu gauti rezultatai beveik penktadalių skiriasi nuo modelių bandymų rezultatų. Tokiems rezultatams galėjo turėti įtakos tai, jog šiuo metodu yra sunkiai įvertinti laivo povandeninės dalies architektūros įtaką bangų susidarymui. Todėl laivo bangavimo pasipriešinimas galėjo būti apskaičiuotas netiksliai, kas atsispindi rezultatuose.

Skaiciuojant Holtropo metodu gavome mažiausią rezultatų paklaidą. Holtropo metodas pasižymi universalumu bei užtikrina gana patikimus rezultatus.

Skaiciuojant pasipriešinimą Flow 3d programą gavome nepatikimus rezultatus. Simuliacijos kūrimo metu buvo iškilusios problemos dėl rezultatų patikimumo, tačiau patobulinus tinklėlį rezultatai žymiai pagerėjo. Jeigu analizuoti atskirai kiekvieno greičio pasipriešinimo rezultatus gautus Flow 3D programa matome, jog mažiausias paklaidas gavome esant mažesniems greičiams.

IŠVADOS IR REKOMENDACIJOS

1. Baigiamajame darbe išanalizavus laivo eigumo preliminarus vertimo problemą, paaiškėjo, kad egzistuoja daugybė laivo vandens pasipriešinimo įvertinimo metodikų. Tačiau laivų statybos ir projektavimo srityje intensyviai ieškoma naujų optimalių sprendimų, kurie užtikrintų patikimus rezultatus už optimalią kainą.

2. Stratklaido universiteto Kelvino hidrodinamikos laboratorijoje, atlikus fizinių modelinių pasipriešinimo eksperimentą, išsiaiškinta, jog modelinis pasipriešinimo eksperimentas atliekamas pagal ITTC rekomendacijas ir susideda iš sekančių uždavinių: modelio gaminimo, matavimo prietaisų kalibravimo, dinaminio modelio balansavimo, eksperimento atlikimo, rezultatų apdorojimo.

3. Išanalizavus CFD (Computational Fluid Dynamics) metodiką išsiaiškinta, jog CFD metodika intensyviai naudojama vertinant laivo eigumą. Atliekama daugybė CFD bandymų bei programos tobulinimo eksperimentų siekiant sukurti greičiausią bei visiems prieinamą ir patikimą eigumo įvertinimo metodiką.

4. Darbe buvo išanalizuoti apytikriai likusio vandens pasipriešinimo bei bangavimo (Holtopo) skaičiavimo metodai. Išsiaiškinta, jog visų apytikrių skaičiavimų metodika paremta modelinių bandymų rezultatų apdorojimu.

5. Praktinio vertinimo pasipriešinimo metu buvo nustatyta, jog bangavimo (Holtopo) metodas garantuoja gana patikimus rezultatus pradinio laivo pasipriešinimo vertinimui, kurių paklaida yra ne daugiau 5 procentų. Nustatyta, jog likusio pasipriešinimo metodas greitaėgių laivų pasipriešinimui įvertinti netinka, nes šio metodo skaičiavimo paklaida beveik 20 procentų. Patvirtinti CFD skaičiavimo metodikos rezultatų patikimumo nepavyko, nes CFD metodo skaičiavimo paklaida apie 30 procentų. Darbo pradžioje iškeltos hipotezės, jog CFD metodo rezultatų patikimumas gali prilygti modelinių bandymų rezultatams, įrodyti nepavyko. Tačiau nustatyta, jog metodo patikimumas priklauso nuo sudaryto objekto tinklelio bei nuo kompiuterinės įrangos parametrų.

6. Remiantis pasipriešinimo eksperimentų rezultatais nustatyta, jog Holtropo metodas duoda patikimus rezultatus. Jis yra gana universalus ir gali būti naudojamas, kaip vienas iš patikimų metodų laivo apytikrio vandens pasipriešinimui nustatyti. Likusio pasipriešinimo metodas taip pat gali būti plačiau naudojamas, tačiau būtina teisingai parinkti laivų seriją. Nežiūrint į didelę rezultatų paklaidą CFD skaičiavimo metodiką galima pripažinti optimaliausia, nes palyginus su apytikriais metodais šio metodu galima įvertinti bet kokio laivo eigumą nepriklausomai nuo laivo paskirties, greitaėgiškumo bei korpuso formos charakteristikų. CFD gautų rezultatų skirtumas gali būti

paaškinamas skaičiavimų tinklelio nepakankamu tankumu, todėl gauti rezultatai žymiai skiriasi nuo eksperimento.

Rekomendacijos

Norint padidinti apytikrio vandens pasipriešinimo skaičiavimo rezultatų patikimumą būtina, kad nagrinėjamo laivo parametrai patektų į pasirinktos metodikos nustatytas laivo charakteristikų apribojimus. Vertinant laivo eigumą Flow-3D kompiuterine programa reiktų pakoreguoti skaičiavimų tinklą ir pakartoti skaičiavimus. Kuo tankesnis tinklas tuo skaičiavimų trukmė yra ilgesnė, nes skaičiuojant tekėjimo srautą didesniame kiekyje langelių, padidėja skaičiavimo apimtis.

LITERATŪRA

1. Cerka J. *Laivo hidroaeromechanika*. Klaipėda: KU leidykla, 2009. 190 psl.
2. Stonkus V. *Laivo teorija*. Klaipėda: KU leidykla, 2006. 204 psl.
3. Ашик. В. *Проектирование судов*. Ленинград: Судостроение, 1985. 317 стр.
4. Войткунский Я. *Сопротивление движению судов*.// Судостроение, 1988. 288 стр.
5. Кочин В. Мороз В. *Автоматизированная система сбора и обработки данных скоростного опытного бассейна*.// Судоходство, 2009.
6. Митрохин Б., Жинкин В., Зильман Г. *Теория корабля*.// Судостроение, 1989. 352 стр.
7. Павленко Г. *Сопротивление воды движению судов*.// Москва, 1953.
8. Aiguo Shia, Ming Wu, Bo Yang, Xiao Wang, Zuochao Wang. *Resistance Calculation and Motions Simulation for Free Surface Ship Based on CFD*.// Elsevier, 2011.
9. Choi J.E., K.-S.Min, J.H.Kim, S.B.Lee, H.W.Seo. *Resistance and propulsion characteristics of various commercial ships based on CFD results*.// Elsevier, 2010.
10. Dubrovsky V. Matveev K. *Small waterplane area ship models: Re-analysis of test results based on scale effect and form drag*.// Ocean Engineering, 2005.
11. Ema Muk Pavic, Shin Chin, Don Spencer. *Validation of the CFD code Flow-3D for the free surface flow around the ships' hulls*.// Conference of the CFD Society of Canada, 2006.
12. George Tzabiras, Konstantinos Kontogiannis *An integrated method for predicting the hydrodynamic resistance of low-cB ships*.// Elsevier, 2009.
13. Jones D.A. and D.B. Clarke *Fluent Code Simulation of Flow around a Naval Hull: the DTMB 5415*.//maritime platforms division, 2010.
14. Lazauskas L. *The Hydrodynamic Resistance, Wave Wakes and Bottom Pressure Signatures of a 5900t Displacement Air Warfare Destroyer*.//University of Adelaide, 2007.
15. Lutzen M., *Prediction of resistance and propulsion power of ships*.//University of Denmark, 2012.
16. Ortigosa I., Lopez R., Garcia J. *Prediction of total resistance coefficients using neural networks*.//Journal of Maritime research, 2009.
17. Vangbo P., *CFD in conceptual ship design*.//Norwegian university of science and technology, 2011.
18. Voxakis P. *Ship hull resistance calculation using CFD methods*.//Massachusetts institute of technology, 2012.
19. FLOW 3D (interaktyvus). 2005. Žiūrėta 2013 m. sausio 5 d. Prieiga per Internetą: < <http://www.flow3d.ru/flow3d.htm>>.

20. Resistance Test [interaktyvus]. [žiūrėta 2012 m. rugsėjo 28 d.]. Prieiga per internetą: <http://ittc.sname.org/2002_recomm_proc/7.5-02-02-01.pdf>
21. Sea Keeping Experiments [interaktyvus]. [žiūrėta 2012 m. rugsėjo 28 d.]. Prieiga per internetą: <http://ittc.sname.org/2002_recomm_proc/7.5-02-07-02.1.pdf>
22. Ship Models [interaktyvus]. [žiūrėta 2012 m. rugsėjo 28 d.]. Prieiga per internetą: <http://ittc.sname.org/2002_recomm_proc/7.5-01-01-01.pdf>
23. The Specialist Committee on Detailed FlowMeasurements, 2011. [interaktyvus]. [žiūrėta 2013 m. kovo 28 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.laboceano.coppe.ufrj.br/ittc2011/cd_ittc2011/htm/VOLII/15.pdf>
24. CATRAN в судостроении [interaktyvus]. [žiūrėta 2013 m. sausio 5 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.catran-cae.com/products.html>>
25. Сопротивление движению судов [interaktyvus]. [žiūrėta 2013 m. kovo 28 d.]. Prieiga per internetą: <<http://library.fentu.ru/book/ksi/405/index.html>>.

PRIEDAI

1 PRIEDAS

Programinės įrangos „Autoship“ taikymas laivų projektavime

G. Šerlinskis, A. Šilov

Klaipėdos Universitetas

Santrauka

Laivo projektavimo uždavinys yra suprojektuoti laivą, kuris tenkintų visus jam keliamus reikalavimus. Specializuotos programinės įrangos „Autoship“ panaudojimas padeda optimizuoti projektavimo darbus laiko ir tikslumo atžvilgiu. Straipsnyje nagrinėjame kaip atliekamas naujo korpuso modeliavimas, laivo stovumo įvertinimas, bei aprašomi programos įrankiai, kurie padeda pasiekti norimų rezultatų.

Raktiniai žodžiai: *NURBS, Autoship, korpuso modeliavimas, stovumo skaičiavimas.*

Nomenklatūra:

C_b -vandentalpos pilnumo koeficientas

C_{WP} -vaterlinijos pilnumo koeficientas

WPA -vaterlinijo plotas, m^2

WSA -laivo povandeninės dalies plotas, m^2

I_{mm} -inercijos momentas x ašies atžvilgiu

LCF -vaterlinijos ploto centro abscisė, m

LCB -vandentalpos centro abscisė, m

VCB -vandentalpos centro aplikatė, m

BM_t -skersinis metacentrinis spindulys, m

C_m - midelinio španhauto koeficientas

VCG - laivo svorio centro aplikatė, m

Įvadas

Straipsnyje aprašomas korpuso formos modeliavimas „Autoship“ programinės įrangos pagalba. Korpuso modeliavimas yra vienas iš svarbiausių projektavimo etapų, turint laivo korpusą galima įvertinti laivo jūrines savybes, sukurti laivo pagrindinio išplanavimo brėžinius.

Autoship korpuso ir paviršių modeliavimo programa sujungianti Windows grafinę vartotojo sąsają su NURBS paviršių matematiniais skaičiavimais ir specialiais įrankiais suteikia projektuotojui galimybę daug greičiau ir tiksliau sukurti laivo korpuso formą. Autoship programinė įranga susideda iš šių pagrindinių programų: *Autoship, autohydro, autopower, autoplate, autostructure*. Programinė įranga neapsiriboja vien tik korpuso formos modeliavimu, panaudojus visas programinės įrangos galimybes galima suprojektuoti laivą ir jo visą korpuso konstrukciją įskaitant superstruktūrą. Nagrinėsime laivo projektavimo pagrindinių įrankių funkcijas. Aprašysime naujo korpuso projektavimo, bei korpuso formos stovumo įvertinimo eiliškumą.

Autoship programoje naudojamas *NURBS* algoritmas leidžia greitai sklandžiai suderinti korpusą. *NURBS* algoritmas apibūdinamas kaip tinklas sudarytas iš eilučių ir stulpelių, kurie turi savo kontrolinius taškus. Priklausomai nuo projektuojamo korpuso sudėtingumo, pasirenkamas eilutės ir stulpelio kreivumo laipsnis. Kuo mažesnis kreivumo laipsnis, tuo daugiau formos galima suteikti paviršiui. Modeliavimo panaudojant *NURBS* algoritmą esmė, kad pakanka kelėtos stulpelių ar eilučių korpuso formos suformavimui, o nedidelis skaičius kontrolinių taškų leidžia daug greičiau pakoreguoti korpuso linijas ir perskaičiuoti hidrostatinis skaičiavimus.

Laivo projektavimo eiga

Įprastai laivo projektavimas pradamas nuo techninės užduoties sudarymo. Techninėje užduotyje nurodomi laivo pagrindiniai matmenys, korpuso formos koeficientai, vandentalpa, vandentalpos centro padėtis. Turint šiuos duomenis laivo projektavimas „Autoship“ programoje atliekamas šiais etapais:

- 1) Sudaromas midelinis španhautas.
- 2) Sukuriamas pradinis paviršius.
- 3) Sudaromas laivo šoninis vaizdas.
- 4) Sudaroma španhautų rikiuotės kreivė, ši kreivė yra sudaroma modeliuojant korpusą.
- 5) Patikrinama ar laivo korpusas atitinka techninėje užduotyje nurodytus reikalavimus.
- 6) Stovumo skaičiavimas Autohydro programa.
- 7) Korpuso koregavimas.

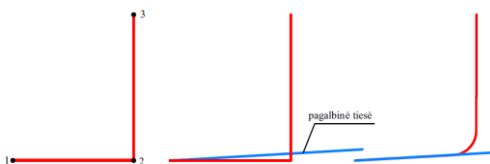
Midelinio španhauto sudarymas

Midelinio španhauto sudarymas tai pirmasis korpuso sudarymo etapas. Sudarant midelinį španhautą reikalingos šios pagrindinės midelinio španhauto charakteristikos: Grimzlė (d), laivo plotis (B), midelinio španhauto pilnumo koeficientas (β), španhauto forma (U ar V).

Midelinio španhauto formų yra įvairių, jų braižymas gali būti atliekamas keliais būdais priklausomai nuo sudėtingumo. Sudėtingumas priklauso nuo to kiek programos įrankių yra panaudojama španhauto sudarymui.

Autoship programoje pagrindiniai įrankiai, kuriais nubraižomas španhautas yra šie: *Draw curve*, *add/del control pt*, *radius corner*, *measurments*.

Viena iš sudėtingesnių midelinių španhauto formų būtų španhautas turintis kiliškumą ir briaunos suapvalinimą. Šiai formai gauti turėtume panaudoti visus pagrindinius įrankius. Visų pirmą nubrėžiama kreivė turinti 3 kontrolinius taškus ir atitinkanti laivo plotį ir grimzlę (1 pav.). Panaudojamas *toggle corner* įrankis lūžio sudarymui kreivėje (per tašką Nr.2). Sudarius lūžį brėžiama dar viena papildoma linija, atitinkanti laivo kiliškumo kampą ZY plokštumoje. Tiesės pasvirimo kampo nustatymui naudojamos *measurments* įrankiu. Pagal šią tiesę pakoreguojami midelinio španhauto taškai, kad kreivė vaizduojanti španhautą būtų pasvirusi tokiu pat kampu kaip ir tiesė. Suderinus pasvirimo kampą, suapvalinimas atliekamas *radius corner* įrankiu, įvedus suapvalinimo spindulio reikšmę 1 pav.



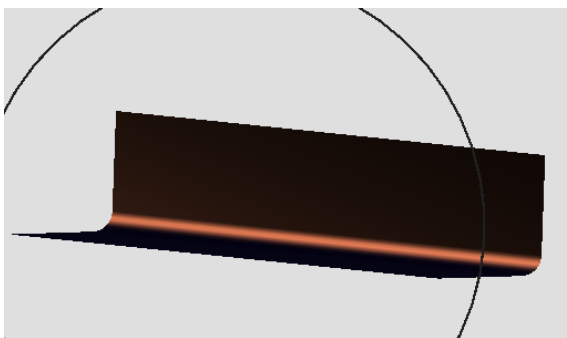
1 pav. Midelinio španhauto sudarymas

Autoship programa palaiko autocad dxf failus, todėl yra galimybė midelinį španhautą sudaryti autocad programoje ir įkelti į Autoship tolimesniam korpuso projektavimui.

Pradinio paviršiaus sukūrimas

Programos paviršių sukūrimo galimybės yra pakankamai plačios, tačiau korpuso pradinio paviršiaus sukūrimui galima išskirti šias komandas: *Extrude*, *loft*, *dimenssions*: *Extrude* - plokštumoje nubrėžtiems objektams suteikiamas ilgis. *Dimenssions* - sukuriamas paviršius, nurodant visus reikalingus matmenis (ilgis, plotis, aukštis, stulpelių skaičius ir kt.). *Loft* - per kreivių kontrolinius taškus sukuriamas paviršius, šio paviršiaus sukūrimui būtina nurodyti ne mažiau dviejų kreivių.

Turint nubraižytą midelinio španhauto formą atitinkančią kreivę, greičiausias būdas sukurti paviršių *extrude* komandos pagalba, tuomet kompiuteriui užtenka nurodyti tik paviršiaus stulpelių/eilučių skaičių, jų kreivumo laipsnius ir koordinačių ašį, kurios atžvilgiu nurodžius laivo ilgį sukuriamas paviršius. Paviršius sukuriamas pastovaus skerspjūvio ploto, jo skerspjūvis atitinka midelinio španhauto formą 2 pav.



2 pav. Extrude komandos panaudojimas paviršiaus sukūrimui

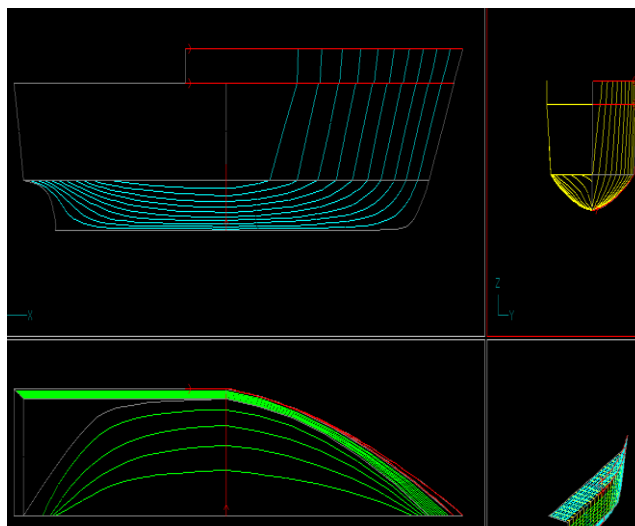
Jeigu laive yra numatoma cilindrinė dalis, tai kitas žingsnis būtų išskirti jos vietą sukurtame paviršiuje. Cilindrinės dalies suformavimui naudojami šie pagrindiniai įrankiai: *Lock*, *toggle corner*. *Toggle corner* lūžio linijomis yra išskiriamas pastovaus skerspjūvio ilgis. Cilindrinės dalies suformavimui naudojami du stulpeliai, šie stulpeliai paryškunami lūžio linijomis ir tuomet išdėstomi reikiamoje vietoje X ašies atžvilgiu.

Paskutinis paviršiaus paruošimo modeliavimui žingsnis būtų šoninio vaizdo kontūro suformavimas. Laivo vaizde „šonas“ suformuojamos laivapriekio, laivagalio, denio ir kilio linijų formos. Šios formos gaunamos įprastai keičiant kontrolinių taškų formą XZ plokštumoje, tol kol gaunama reikiama forma. Laivapriekio ir laivagalio formų yra įvairių, sudėtingesniems formoms gauti gali prireikti didesnio skaičiaus eilučių. Jeigu laivapriekio ar laivagalio formai gauti nepakanka eilučių skaičius, reikalingas eilučių kiekis pridedamas *add row* komanda.

Korpuso modeliavimas

Korpuso modeliavimu laikome trijų laivo projekcijų derinimą keičiant kontrolinių taškų koordinates. Laivo projekcijos suderinamos pagal kiekvienos projekcijos pjūvių formą.

Linijos, gautos kertant laivo korpuso paviršių plokštumomis, lygiagrečiomis mideliniam španhautui, vadinamos teoriniais španhautais ir tikruoju dydžių vaizduojamos vaizde korpusas (Body plan). Kertant laivo korpuso paviršių plokštumomis, lygiagrečiomis pagrindinei plokštumai, gaunamos teorinės vaterlinijos, jos tikruoju dydžiu vaizduojamos pusplatumėje (plan). Kertant plokštumomis, lygiagrečiomis diametralinei plokštumai, gaunami batoksai, jie tikruoju dydžiu vaizduojami projekcijoje šonas (profile).



3 pav. Laivo projekcijų plokštumos ir pjūviai

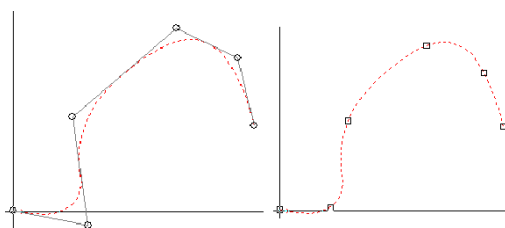
Projekcijų suderinimui naudojamas NURBS algoritmas. Bendrai šis algoritmas gali būti užrašomas tokia išraiška:

$$(1)$$

i-kontrolinių taškų skaičius

n-parametras priklausantis nuo kreivės laipsnio

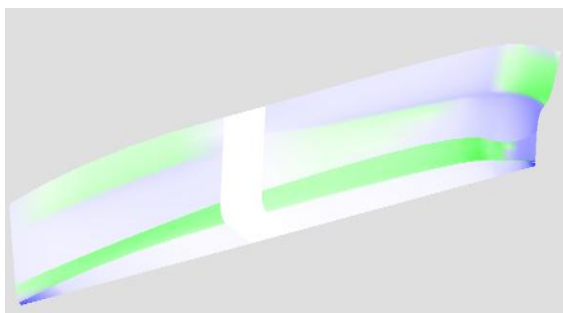
NURBS kreivė yra sudalinama į segmentų skaičių, kurių padėtis yra kontroliuojama kontroliniais taškais. B spline algoritmas leidžia kontroliuoti segmentų padėtį tik keičiant jiems būdingus taškus t.y pakeitus segmento taškų koordinates, kitų segmentų taškai lieka nepakitę. Kreivės laipsnis apibūdinamas segmentų skaičiumi, kurių kontroliavimui naudojamas vienas kontrolinis taškas, tai maksimalus segmentų skaičius, kurie gali būti kontroliuojami vienu kontroliniu tašku.



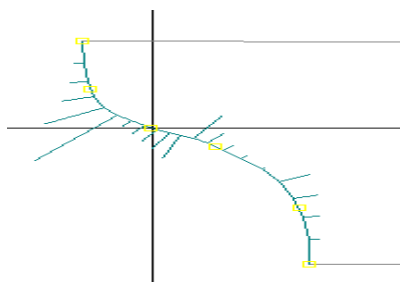
4 pav. NURBS kreivė

Kaip pavyzdį nubrėžkime autoship programoje kreivę turinčią 6 kontrolinius taškus, kreivės laipsnis 2 (max degree) 4 pav. Paveiksle matome, kad kreivę sudaro 5 segmentai, vienu kontroliniu tašku galima daugiausiai kontroliuoti du segmentus. Kuo didesnis kreivės laipsnis tuo sudėtingiau gauti sudėtingesnę kreivės formą, nes tuomet keli ir daugiau segmentai gali būti kontroliuojami vieno kontrolinio taško pagalba. Autoship programoje kreivės laipsnį galima pasirinkti nuo 1 iki 5, jeigu laivo korpuso forma sudėtinga tada tikslinga ją modeliuoti mažesnio laipsnio kreivėmis. Paviršių taškų kontroliavimas analogiškas kreivių kontroliavimui.

Korpuso apvadų užtikrinimui naudojami šie pagalbiniai *curvature* ir *gaussian curvature* įrankiai. *Curvature* įrankiu pažymėjus paviršiaus stulpelį/ eilutę linijos kreivumas vaizduojamas brūkšninėmis linijomis atitinkančiomis kreivumo dydį. *Gaussian curvature* įrankiu laivo korpuso nelygumai išryškunami spalvomis.

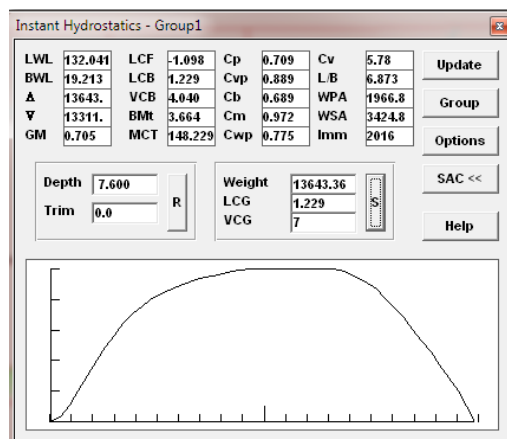


5 pav. Gaussian curvature panaudojimas korpuso derinimui
Iškilimai vaizduojami raudona spalva, įdubimai žalia spalva. Balta spalva žymimi paviršiai neturintys kreivumo.



6 pav. Curvature panaudojimas apvadų sklandumo užtikrinimui

Informacija apie esamą korpuso formą galima gauti pasinaudojus *Instant hydrostatic tools(H)* įrankiu. Laivo korpusas priskiriamas grupei įvykdžius *arrange-group* komandą, tuomet galima atlikti hidrostatinius skaičiavimus. Pateikiamos šių dydžių skaitinės vertės: Pagrindiniai laivo matmenys, formą nusakantys koeficientai, pradinio stovumo ir plūdrumo charakteristikos, španhautų plotų kreivė 7 pav.



7 pav. Hidrostatiniai skaičiavimai korpuso modeliavimo eigoje

Laivo stovumo įvertinimas

Sumodeliuoto laivo korpuso stovumo skaičiavimai atliekami „Autohydro“ programa. Duomenys apie laivo korpuso formą pateikiami geometrijos faile. Programoje atliekami šie pagrindiniai skaičiavimai:

- 1) Hidrostatiniai skaičiavimai (Hydrostatic Properties)
- 2) Maksimalaus vertikalio laivo svorio centro kreivė (Maximum VCG Curves)

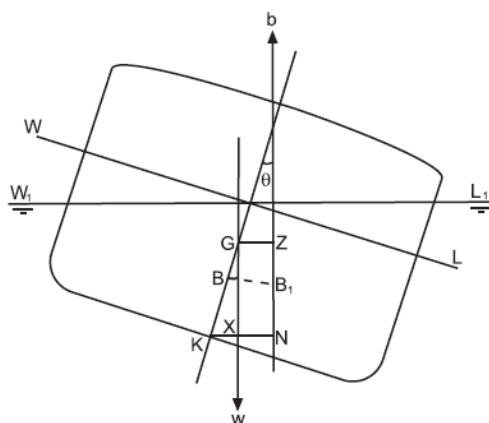
- 3) Išilginio tvirtumo kreivės (Longitudinal Strength Curves)
- 4) Formos pečių skaičiavimas (Cross Curves of Stability)
- 5) Tankų kalibravimas (Tank calibration)
- 6) Laivo stabilumas esant dideliam krenui (Large angle stability)
- 7) Ribinių ilgių diagrama (Floodable length analysis)

Laivo geometrijos failą sudaro tam tikras laivo skersinių pjūvių skaičius išilgai laivo, jų skaičius pasirenkamas laisvai arba parenkamas automatiškai programos. Kuo didesnis pjūvių skaičius leidžia „autohydro“ programai tiksliau interpretuoti laivo korpuso formą.

Hidrostatinių skaičiavimų esmė-skaiciuojami visi dydžiai, kurie priklauso tik nuo grimzlės. Atlikus šiuos skaičiavimus gauname skaičiavimų rezultatus grafikų ir lentelių forma iš kurių galima surasti šiuos dydžius: Pradinį metacentrinį aukštį, metacentrinį spindulį, laivo vandentalpą, vandentalpos centro padėtį, vaterlinių plotus, formą nusakančius koeficientus.

Maksimali vertikali laivo svorio centro padėtis- šie skaičiavimai atliekami tam, kad būtų galima surasti kokia laivo VCG reikšmė yra maksimali pasirinkto kriterijaus atžvilgiu. Pagrindiniai taikomi kriterijai būtų pradinis metacentrinis aukštis, oro kriterijus.

Formos pečių skaičiavimas KN- formos pečiai skaičiuojami eilei laivo vandentalpų, ir pateikiami lentelių ir kreivių forma. Šie skaičiavimai atliekami kai VCG laivo svorio centro padėtis nėra žinoma. Turint šiuos skaičiavimus laivo statinio stovumo petys apskaičiuojamas pagal 2 formulę.



8 pav. Formos pečių skaičiavimas

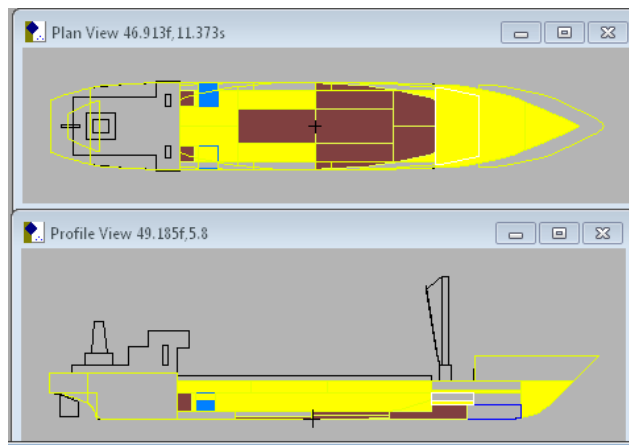
(2)

GZ-statinio stovumo petys, m

KN-formos petys, m

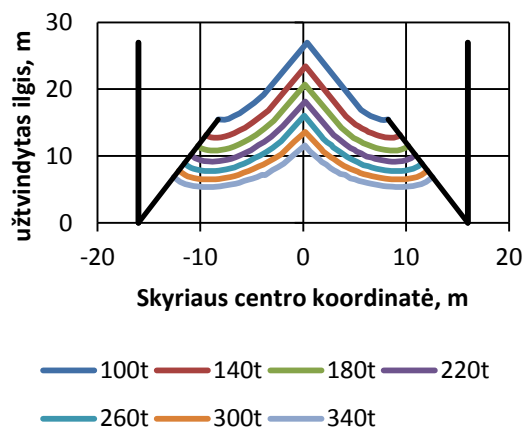
KG-svorio centro aplikatė, m

Tankų kalibravimas - šių skaičiavimų esmė apskaičiuoti laive esančių tankų svorio centro koordinatės, laisvo paviršiaus momentą. Galima įvertinti laivo stovumą priklausomai nuo tankų užpildymo, jų būklės (pažeistas, užšalęs ir kt.).



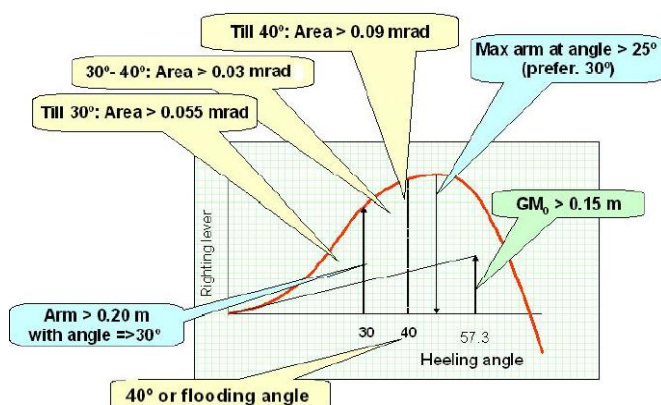
9 pav. Tankų kalibravimas

Ribinių ilgių skaičiavimas - šių skaičiavimų esmė nustatyti didžiausią vandeniu užtvindyto skyriaus ilgį ir jo centro koordinatę pasirinktų kriterijų atžvilgiu. Atlikus šiuos skaičiavimus galima sužinoti kaip išdėstyti vandeniui nelaidžias pertvaras, kad laivo neskęstumas būtų užtikrinamas. Kriterijai pagal kuriuos skaičiuojami laivo skyrių ribiniai ilgiai gali būti metacentriniai aukščiai, diferento kampas.



10 pav. Skyrių ribiniai ilgiai

Laivo stovumas turi būti patikrinamas pagal IMO statinio stovumo diagramai keliamus reikalavimus 11 pav. Programoje šie kriterijai įvertinami automatizuotai ir jų skaitinės vertės pateikiamos lentelėje.



11 pav. IMO reikalvimai statinio stovumo diagramai

Statinio stovumo diagramai sudaryti reikalingi šie duomenys: Laivo skerspjūvio plotai pateikiami geometrijos faile, grimzlė ir vertikalaus svorio centro aplikatė (VCG). Pradiniame laivo projektavime apie tikslią VCG reikšmę informacijos neturime, todėl šis dydis priimamas pagal panašaus tipo laivus ir jiems būdingas VCG reikšmes. Patikrinus šiuos kriterijus jeigu ne visi kriterijai yra tenkinami korpuso forma yra koreguojama ir vėl atliekami skaičiavimai.

Išvados

- 1) Staipsnyje išanalizavome kaip atliekamas naujo laivo korpuso projektavimas ir kokie skaičiavimai atliekami laivo stovumo įvertinimui.
- 2) Autoship programinė įranga gali būti naudojama ne tik laivo korpuso modeliavimui, bet ir jo konstrukcijos sudarymui.
- 3) Paviršių modeliavimo algoritmas leidžia sukurti įvairios formos korpusą, o pagalbinių įrankių leidžia pakankamai tiksliai užtikrinti jo formų sklandumą.

Literatūra

- 1) Derrett D. R., 1999. Ship Stability for Masters and Mates.
- 2) International Maritime Organization 2008. International code on Intact Stability.
- 3) Non-uniform rational B-spline. Prieiga per Internetą http://en.wikipedia.org/wiki/Non-uniform_rational_B-spline [žiūrėta: 03-05-2012]
- 4) CAD/ CAM software. . Prieiga per Internetą: <http://cadcam.autoship.com/cadproductservices/cadcamoverview.htm> [žiūrėta: 03-05-2012]

2 PRIEDAS

Modelinių bandymų pasipriešinimo eksperimento duomenys

Group No.	Run No.	Speed(m/s)	Resistance(N)	Trim(deg)	Sinkage(mm)
		Test 1: Level Trim		(+ve is bow down)	(-ve is down)
1	1	1.05	3.131	0.042	-3.238
2	2	1.22	4.162	0.060	-4.656
3	3	1.31	4.834	0.070	-4.880
4	4	1.39	5.417	0.083	-5.593
1	5	1.48	6.318	0.081	-6.125
2	6	1.57	7.319	0.074	-7.092
3	7	1.66	8.395	0.067	-7.949
4	8	1.74	9.390	0.070	-8.959
1	9	1.83	10.634	0.056	-9.793
2	10	1.92	12.362	-0.006	-10.950
3	11	2.01	14.775	-0.128	-12.744
4	12	2.09	17.455	-0.301	-13.580
5	13	2.26	24.095	-0.797	-15.791

3 PRIEDAS

Bangavimo pasipriešinimo (Holtropo) metodo rezultatai

**Resistance
and Power
Prediction
from
AutoPower
V3.0.5**

Project: laivas
Date: 18 Apr 13
Hull Type: Displacement

Hull Data

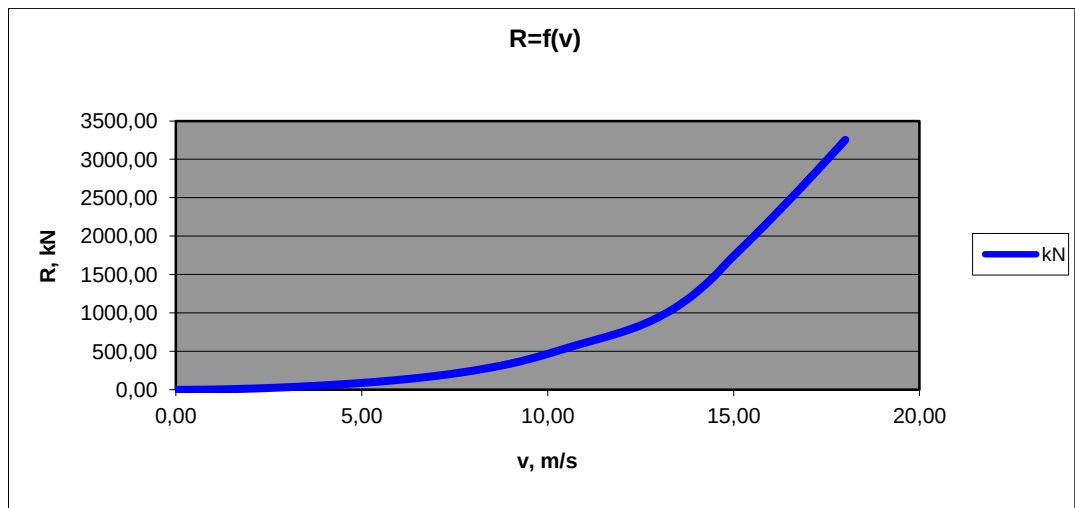
LWL	141.97m
Breadth	19.06m
Draft (F)	6.15m
Draft (A)	6.15m
Displacement	8,706.8t
LCB	-0.51%
Cwp	0.770
Cm	0.820
(1+K)	1.160
Wetted Hull Area	2,995.0m ²
Wetted Appendages Area	0.0m ²
Wetted Transom Area	0.0m ²
Transom Width	0.0m
Half Angle of Entrance	16.8deg
Half Angle of Run	0.0deg
Angle at 1/4 Buttock	0.0deg
Bulbous Bow	YES
Transverse Bulb Area	4.0m ²
Bulb Centroid Location	0.00m

Body Type - Fwd:	Normal
Body Type - Aft:	Normal
Service Margin	0.00%
Appendage Allowance	0.00%
Appendage Form Factor	0.0
Cb	0.510
Cp	0.622
Service Speed	20.0knots

Total Resistance, Rt (kN)

Speed (kt)	Fn	Holtrop
0.00	0.00	0.00
1.00	0.01	1.24
2.00	0.03	4.54
3.00	0.04	9.73
4.00	0.06	16.74
5.00	0.07	25.52
6.00	0.08	36.02
7.00	0.10	48.23
8.00	0.11	62.16
9.00	0.12	77.87
10.00	0.14	95.54
11.00	0.15	115.50

12.00	0.17	138.19
13.00	0.18	164.22
14.00	0.19	194.29
15.00	0.21	229.21
16.00	0.22	269.61
17.00	0.23	315.85
18.00	0.25	370.53
19.00	0.26	436.54
20.00	0.28	510.77
21.00	0.29	584.93
22.00	0.30	655.38
23.00	0.32	727.52
24.00	0.33	811.36
25.00	0.34	916.97
26.00	0.36	1053.23
27.00	0.37	1227.34
28.00	0.39	1443.75
29.00	0.40	1702.62
30.00	0.41	1946.65
31.00	0.43	2197.04
32.00	0.44	2453.69
33.00	0.45	2716.04
34.00	0.47	2983.56
35.00	0.48	3255.76



DTMB 5415 pasirpiešinimo priklausomybė nuo laivo greičio apskaičiuota Holtropo metodu

5 PRIEDAS

Vandens pasipriešinimas laivo judėjimui

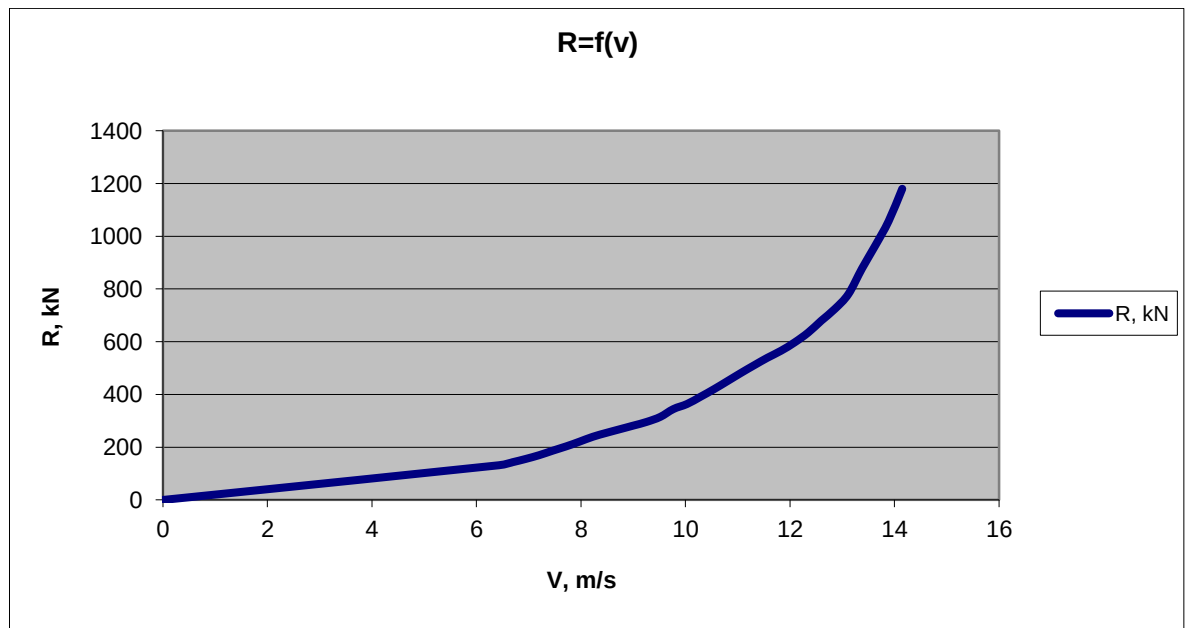
DTMB 5415 (su bulbu)

Skaičiuota 2013-04-26

PRADINIAI DUOMENYS					
Ilgis, m	Plotis, m	Grizmlė, m	Beta	Delta	Xc, m
141,97	19,00	6,15	0,820	0,510	-0,72
Greitaeigių ir vidutinio greitaeigiškumo laivų serija					

Skaičiavimų rezultatai								
Vs, kt	V, m/s	Fr	Re	CFO	CR	R, kN	PE, kW	PS, kW
12,5	6,43	0,172	.673E+09	.165E-02	.208E-03	131,6	846,1	1410,7
13,0	6,69	0,179	.700E+09	.164E-02	.225E-03	143,0	956,1	1593,5
13,5	6,94	0,186	.727E+09	.163E-02	.251E-03	155,4	1079,0	1798,4
14,0	7,20	0,193	.754E+09	.163E-02	.296E-03	169,8	1223,1	2038,4
14,5	7,46	0,200	.781E+09	.162E-02	.364E-03	186,9	1394,1	2324,1
15,0	7,72	0,207	.808E+09	.161E-02	.410E-03	203,3	1568,9	2614,1
15,5	7,97	0,214	.835E+09	.161E-02	.458E-03	220,8	1760,5	2934,2
16,0	8,23	0,221	.862E+09	.160E-02	.503E-03	239,0	1967,0	3278,4
16,5	8,49	0,227	.889E+09	.159E-02	.514E-03	254,6	2161,0	3602,2
17,0	8,75	0,234	.919E+09	.159E-02	.504E-03	268,5	2348,4	3914,0
17,5	9,00	0,241	.943E+09	.158E-02	.485E-03	281,8	2537,0	4228,4
18,0	9,26	0,248	.969E+09	.158E-02	.474E-03	296,1	2741,0	4569,9
18,5	9,52	0,255	.996E+09	.157E-02	.498E-03	315,2	3000,0	5000,0
19,0	9,77	0,262	.102E+10	.157E-02	.542E-03	337,7	3300,8	5501,3
19,5	10,03	0,269	.105E+10	.156E-02	.605E-03	363,8	3649,9	6083,1

20,0	10,29	0,276	.108E+10	.156E-02	.668E-03	391,4	4027,2	6712,0
20,5	10,55	0,283	.110E+10	.155E-02	.731E-03	420,4	4433,2	7388,6
21,0	10,80	0,290	.113+E10	.155E-02	.791E-03	450,1	4862,7	8104,6
21,5	11,06	0,296	.116E+10	.154E-02	.851E-03	481,3	5323,5	8872,5
22,0	11,32	0,303	.118E+10	.154E-02	.896E-03	511,4	5787,6	9645,9
22,5	11,57	0,310	.121E+10	.153E-02	.926E-03	539,7	6246,9	10411,5
23,0	11,83	0,317	.124E+10	.153E-02	.940E-03	565,8	6694,3	11157,1
23,5	12,09	0,324	.127E+10.	.153E-02	.977E-03	597,4	7222,5	12037,4
24,0	12,35	0,331	.129E+10	.152E-02	.104E-03	634,8	7838,2	13063,6
24,5	12,60	0,338	.132E+10	.152E-02	.112E-02	679,7	8567,0	14278,4
25,0	12,86	0,345	.135E+10	.151E-02	.120E-02	724,3	9315,6	15526,0
25,5	13,12	0,352	.137E+10	.151E-02	.131E-02	780,7	10240,8	17068,0
26,0	13,38	0,358	.140E+10	.151E-02	.158E-02	877,8	11741,1	19568,5
26,5	13,63	0,365	.143E+10	.150E-02	.178E-02	963,3	13132,8	21888,0
27,0	13,89	0,372	.145E+10	.150E-02	.199E-02	1057,7	14691,6	24486,0
27,5	14,15	0,379	.148E+10	.150E-02	.229E-02	1180,0	16693,4	27822,3
Skaiciavimų programa sudaryta laivo inžinerijos katedroje (JČ)								



DTMB 5415 pasipriešinimo priklausomybė nuo laivo greičio apskaičiuota likusio pasipriešinimo metodu

6 PRIEDAS

CFD metodo pasipriešinimo rezultatai

```
flscon: version 10.0.1.3 win32 2011
FLOW-3D 12:40:04 05/25/2013 eifd
hydr3d: version 10.0.1.3 win32 2011
Title
5
hydr3d: version 10.0.1.3 win32 2011
```

Mesh Block****

printing tfxob

1	101	3.367E-03	2.001E+01
time(s)		tfxob(N)	
3.3673462E-03		-1.1655090E+08	
2.0150049E-01		-5.7182394E+05	
3.9519396E-01		-4.3022850E+05	
5.9690440E-01		-5.5785994E+05	
8.0213487E-01		-5.9476931E+05	
9.9602699E-01		-6.0245212E+05	
1.2035949E+00		-6.0112138E+05	
1.3984653E+00		-6.1163919E+05	
1.6063690E+00		-5.2787462E+05	
1.8012352E+00		-5.0367512E+05	
1.9960724E+00		-4.6860584E+05	
2.2039235E+00		-4.4551841E+05	
2.3988671E+00		-4.1417425E+05	
2.6020653E+00		-3.9137947E+05	
2.7973092E+00		-3.8546844E+05	
3.0050063E+00		-4.5973822E+05	
3.2006154E+00		-4.4547338E+05	
3.3964036E+00		-4.4381728E+05	
3.6054163E+00		-4.0736122E+05	
3.8014934E+00		-3.9461378E+05	
3.9976516E+00		-3.7161556E+05	
4.1938405E+00		-3.7799091E+05	
4.4017305E+00		-3.7115538E+05	
4.6004915E+00		-4.0505084E+05	
4.7971091E+00		-4.6889316E+05	
5.0036693E+00		-4.4675662E+05	
5.2003732E+00		-5.2340456E+05	
5.3955202E+00		-4.8881494E+05	
5.6036854E+00		-4.9754303E+05	
5.8015594E+00		-5.7751831E+05	
6.0008383E+00		-5.2085825E+05	
6.2062254E+00		-4.8977728E+05	
6.3960290E+00		-4.6193806E+05	
6.6019235E+00		-4.8208391E+05	
6.7956686E+00		-4.9203541E+05	
7.0024185E+00		-4.8550284E+05	
7.1960554E+00		-4.9433200E+05	
7.4024000E+00		-5.0413506E+05	
7.5956330E+00		-5.0324603E+05	
7.7947059E+00		-5.3171612E+05	
8.0003490E+00		-5.0618059E+05	
8.2056961E+00		-5.3344669E+05	
8.3979864E+00		-5.2939700E+05	
8.6029196E+00		-5.3273431E+05	
8.7949152E+00		-5.1805172E+05	
8.9996052E+00		-5.1511719E+05	
9.2042150E+00		-5.1430341E+05	

9.3959856E+00	-5.1221022E+05
9.6005068E+00	-5.1294231E+05
9.8050089E+00	-5.0785522E+05
9.9967308E+00	-5.0903981E+05
1.0201252E+01	-5.0435688E+05
1.0405807E+01	-5.0849050E+05
1.0597611E+01	-5.0763678E+05
1.0801867E+01	-5.0521081E+05
1.1005422E+01	-4.9014869E+05
1.1200730E+01	-4.8947097E+05
1.1401799E+01	-4.7764653E+05
1.1604783E+01	-4.7120116E+05
1.1795167E+01	-4.5655359E+05
1.1998523E+01	-4.4160706E+05
1.2202403E+01	-4.2935731E+05
1.2393772E+01	-4.1090319E+05
1.2597737E+01	-3.9819859E+05
1.2801529E+01	-3.8491494E+05
1.3005150E+01	-3.7039303E+05
1.3195898E+01	-3.5682984E+05
1.3399233E+01	-3.4049344E+05
1.3602485E+01	-3.3575269E+05
1.3805722E+01	-3.1686719E+05
1.3996303E+01	-3.0896453E+05
1.4199698E+01	-2.9620509E+05
1.4403258E+01	-2.8547225E+05
1.4594296E+01	-2.6751003E+05
1.4798324E+01	-2.6485181E+05
1.5002661E+01	-2.5558662E+05
1.5194527E+01	-2.5406177E+05
1.5399508E+01	-2.5249445E+05
1.5604807E+01	-2.5476019E+05
1.5797534E+01	-2.5287352E+05
1.6003336E+01	-2.5798775E+05
1.6196434E+01	-2.6094934E+05
1.6402498E+01	-2.5795666E+05
1.6595697E+01	-2.6326903E+05
1.6801706E+01	-2.7978450E+05
1.6994556E+01	-2.4637697E+05
1.7198418E+01	-2.3657106E+05
1.7400272E+01	-2.5206842E+05
1.7599319E+01	-2.3460344E+05
1.7798889E+01	-2.2484625E+05
1.8002365E+01	-2.5143125E+05
1.8205744E+01	-2.1782555E+05
1.8396194E+01	-1.9277809E+05
1.8599712E+01	-1.7710697E+05
1.8802994E+01	-1.6733645E+05
1.9006086E+01	-1.5442872E+05
1.9196371E+01	-1.3985908E+05
1.9399271E+01	-1.3504880E+05
1.9602154E+01	-1.4095502E+05
1.9805077E+01	-1.1663020E+05
2.0008081E+01	-1.0587909E+05


```

flscon: version 10.0.1.3 win32 2011
FLOW-3D 17:20:58 05/18/2013 oxfw
hydr3d: version 10.0.1.3 win32 2011
Title
5
hydr3d: version 10.0.1.3 win32 2011

```

Mesh Block****

```

printing tfxob
38 102 1.100E+01 3.000E+01
time tfxob
1.1001344E+01 8.8768856E+05
1.1297845E+01 8.8965725E+05
1.1603361E+01 8.9152481E+05
1.1900857E+01 8.9712681E+05
1.2198843E+01 8.9614062E+05
1.2497442E+01 8.9285869E+05
1.2796805E+01 8.8883000E+05
1.3097032E+01 8.8468494E+05
1.3398183E+01 8.8016638E+05
1.3700309E+01 8.7208081E+05
1.4003405E+01 8.6313706E+05
1.4298728E+01 8.5610775E+05
1.4603551E+01 8.4391969E+05
1.4900327E+01 8.3400788E+05
1.5197681E+01 8.2251738E+05
1.5504355E+01 8.1864550E+05
1.5802694E+01 7.9884381E+05
1.6101370E+01 7.9271994E+05
1.6400358E+01 7.7847181E+05
1.6699600E+01 7.7887831E+05
1.6999079E+01 7.7571281E+05
1.7298748E+01 7.6712544E+05
1.7598511E+01 7.6049219E+05
1.7898285E+01 7.4914806E+05
1.8198021E+01 7.3785462E+05
1.8497686E+01 7.3093325E+05
1.8797256E+01 7.1782006E+05
1.9096697E+01 7.0794912E+05
1.9395971E+01 6.9490831E+05
1.9703835E+01 6.7954781E+05
2.0002676E+01 6.6806262E+05
2.0301273E+01 6.5440250E+05
2.0599621E+01 6.5163750E+05
2.0897715E+01 6.4196412E+05
2.1204329E+01 6.1925500E+05
2.1501961E+01 6.0188181E+05
2.1799389E+01 5.8702575E+05
2.2096613E+01 5.6864319E+05
2.2402374E+01 5.5855588E+05
2.2699221E+01 5.4002075E+05
2.2995907E+01 5.2886019E+05
2.3301117E+01 5.1093366E+05
2.3597397E+01 4.9972984E+05
2.3902178E+01 4.8373366E+05
2.4198055E+01 4.7341762E+05
2.4502439E+01 4.5751053E+05
2.4797913E+01 4.4268597E+05
2.5101856E+01 4.2729088E+05
2.5396936E+01 4.0986084E+05
2.5700560E+01 3.9479556E+05
2.6004057E+01 3.8488712E+05
2.6298775E+01 3.7450444E+05

```

2.6602070E+01	3.6291062E+05
2.6896624E+01	3.4674978E+05
2.7199768E+01	3.2991131E+05
2.7502867E+01	3.1228266E+05
2.7797281E+01	2.9090534E+05
2.8100304E+01	2.9285200E+05
2.8403252E+01	2.8182628E+05
2.8697502E+01	2.6725612E+05
2.9000378E+01	2.4912231E+05
2.9303230E+01	2.4624631E+05
2.9597395E+01	2.3642784E+05
2.9900185E+01	2.1765989E+05
3.0004000E+01	2.1878202E+05

```

flscon:  version 10.0.1.3  win32 2011
FLOW-3D  17:22:06  05/18/2013 fdtp
hydr3d:  version 10.0.1.3  win32 2011
Title
5
hydr3d:  version 10.0.1.3  win32 2011

```

Mesh Block****

```

printing tfxob
1 102 6.672E-03 3.001E+01
time(s) tfxob(N)
6.6720061E-03 1.1429250E+08
1.9611159E-01 7.4330931E+05
5.0261456E-01 7.7709025E+05
8.0116117E-01 8.0988494E+05
1.1003413E+00 8.2804806E+05
1.3986970E+00 8.6055912E+05
1.6980846E+00 8.4505544E+05
1.9985493E+00 8.1228344E+05
2.2993791E+00 8.0761288E+05
2.5997820E+00 7.9546794E+05
2.8992262E+00 7.9807175E+05
3.1978583E+00 8.0246506E+05
3.5026941E+00 8.2723231E+05
3.7999518E+00 8.3663025E+05
4.0966115E+00 8.5600081E+05
4.3995872E+00 8.6670112E+05
4.7020297E+00 8.6931194E+05
4.9970832E+00 8.9020019E+05
5.2985806E+00 9.0942188E+05
5.5997286E+00 9.2488731E+05
5.9004784E+00 9.3747175E+05
6.2007222E+00 9.4426556E+05
6.5004463E+00 9.6063412E+05
6.7997422E+00 9.7808812E+05
7.0986753E+00 9.9443656E+05
7.3972874E+00 1.0162938E+06
7.7024455E+00 1.0413331E+06
8.0007010E+00 1.0563919E+06
8.2989216E+00 1.0937296E+06
8.5972538E+00 1.1314015E+06
8.9026451E+00 1.1596028E+06
9.2017212E+00 1.1711146E+06
9.5015669E+00 1.2081321E+06
9.8025017E+00 1.2410170E+06
1.0097971E+01 1.2611072E+06

```

1.0401988E+01	1.2956796E+06
1.0700981E+01	1.3270849E+06
1.1002101E+01	1.3482669E+06
1.1298192E+01	1.3634068E+06
1.1603210E+01	1.4113108E+06
1.1902906E+01	1.4375301E+06
1.2196891E+01	1.4655136E+06
1.2499083E+01	1.4856855E+06
1.2801875E+01	1.5053059E+06
1.3097710E+01	1.5300490E+06
1.3400874E+01	1.5417494E+06
1.3701569E+01	1.5707035E+06
1.3997617E+01	1.5862978E+06
1.4300417E+01	1.6124672E+06
1.4602953E+01	1.6281215E+06
1.4898269E+01	1.6486189E+06
1.5200847E+01	1.6697081E+06
1.5503189E+01	1.6943734E+06
1.5798091E+01	1.6925174E+06
1.6100027E+01	1.7243200E+06
1.6402021E+01	1.7407449E+06
1.6696850E+01	1.7508452E+06
1.6998537E+01	1.7739354E+06
1.7300180E+01	1.7998801E+06
1.7601988E+01	1.8312649E+06
1.7897512E+01	1.8291688E+06
1.8199594E+01	1.8436218E+06
1.8501162E+01	1.8474616E+06
1.8802477E+01	1.8715025E+06
1.9103346E+01	1.8756856E+06
1.9397455E+01	1.8956014E+06
1.9697962E+01	1.9294098E+06
2.0000046E+01	1.9067888E+06
2.0301842E+01	1.9234062E+06
2.0600586E+01	1.9290290E+06
2.0902370E+01	1.9501342E+06
2.1201874E+01	1.9547644E+06
2.1502447E+01	1.9746049E+06
2.1801762E+01	1.9796794E+06
2.2098621E+01	1.9897066E+06
2.2400473E+01	1.9937445E+06
2.2699741E+01	2.0021685E+06
2.2998571E+01	2.0025466E+06
2.3298428E+01	2.0376639E+06
2.3598465E+01	2.0145056E+06
2.3901005E+01	2.0217934E+06
2.4202389E+01	2.0313281E+06
2.4497803E+01	2.0307400E+06
2.4800991E+01	2.0376311E+06
2.5100725E+01	2.0491121E+06
2.5399809E+01	2.0444360E+06
2.5701826E+01	2.0339681E+06
2.5998657E+01	2.0507470E+06
2.6299316E+01	2.0577549E+06
2.6600929E+01	2.0569226E+06
2.6903399E+01	2.0539898E+06
2.7199205E+01	2.0457209E+06
2.7502419E+01	2.0462992E+06
2.7798817E+01	2.0497055E+06
2.8101202E+01	2.0559386E+06
2.8401182E+01	2.0651772E+06
2.8697254E+01	2.0543790E+06
2.8999643E+01	2.0548865E+06

2.9303347E+01	2.0470346E+06
2.9600477E+01	2.0570300E+06
2.9897495E+01	2.0495865E+06
3.0006048E+01	2.0481011E+06

```

flscon: version 10.0.1.3 win32 2011
FLOW-3D 16:58:15 05/26/2013 bmtf
hydr3d: version 10.0.1.3 win32 2011
Title
5
hydr3d: version 10.0.1.3 win32 2011

```

Mesh Block****

printing tfxob

1	49	1.671E-03	9.600E+00
time(s)		tfxob(N)	
1.6711368E-03		5.1101603E+08	
2.0198803E-01		1.3679101E+06	
4.0016970E-01		1.3438185E+06	
5.9868723E-01		1.4552114E+06	
8.0210871E-01		1.4516196E+06	
1.0009830E+00		1.5058809E+06	
1.1982524E+00		1.5407421E+06	
1.4012947E+00		1.5580938E+06	
1.6019623E+00		1.5583980E+06	
1.7980263E+00		1.5004886E+06	
1.9981923E+00		1.5086106E+06	
2.1984618E+00		1.5037159E+06	
2.3989320E+00		1.4943165E+06	
2.5995984E+00		1.4955490E+06	
2.8004425E+00		1.5092848E+06	
3.0014546E+00		1.5141592E+06	
3.1978538E+00		1.5238971E+06	
3.3992219E+00		1.5350971E+06	
3.6007640E+00		1.5538128E+06	
3.7976713E+00		1.5630206E+06	
3.9995444E+00		1.5749182E+06	
4.2015820E+00		1.5856456E+06	
4.3989654E+00		1.5998079E+06	
4.6013217E+00		1.6157355E+06	
4.7990150E+00		1.6287346E+06	
5.0016851E+00		1.6459660E+06	
5.1996837E+00		1.6627299E+06	
5.3978338E+00		1.6759221E+06	
5.6009741E+00		1.6792509E+06	
5.7994313E+00		1.7124968E+06	
5.9980412E+00		1.7158162E+06	
6.2016530E+00		1.7316200E+06	
6.4005723E+00		1.7422428E+06	
6.5996442E+00		1.7509811E+06	
6.7988696E+00		1.7650358E+06	
6.9982486E+00		1.7707929E+06	
7.1977763E+00		1.7899354E+06	
7.4023275E+00		1.8089078E+06	
7.6008081E+00		1.8200952E+06	
7.8004489E+00		1.8468848E+06	
7.9987168E+00		1.8770609E+06	
8.1990213E+00		1.8814235E+06	
8.3994331E+00		1.9117196E+06	
8.5999851E+00		1.9233399E+06	

8.8006830E+00	1.9541211E+06
9.0015278E+00	1.9691321E+06
9.1976156E+00	1.9870482E+06
9.3987541E+00	2.0110024E+06
9.6000404E+00	2.0271526E+06