

**KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS**

Jūros technologijų ir gamtos mokslų fakultetas

Jūrų inžinerijos katedra

Laurita Petkevičiūtė

**Laivo tankuose esančio skysčio svyravimų tyrimas**

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

Klaipėda, 2018

## 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 magistro baigiamasis 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 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 Jūrų inžinerijos katedros, kuruojančios studijų programą administratorius (sekretorius)

Baigiamasis darbas įregistruotas katedroje

.....  
(data)

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

### Pildo Jūrų inžinerijos katedros studijų programos vadovas

#### **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 )

.....  
(studijų programos vadovo vardas, pavardė ir parašas)

Jūrų inžinerijos katedros vedėjas:

.....  
(data )

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

## SANTRAUKA

Petkevičiūtė L., Laivo tankuose esančio skysčio svyravimų tyrimas. Laivo projektavimo ir statybos magistrantūros studijų programos baigiamasis darbas. Darbo vadovas - doc. dr. V. Djačkov, konsultuojantis dėstytojas - doc. dr. J. Čerka, Klaipėdos universitetas: Klaipėda: 2018.- 54 p. iš kurių priedai – 3 p.

Šiame magistrantūros baigiamajame darbe sumodeliuotas ir atliktas skysčių teliuškavimosi dalinai užpildytuose laivo tankuose tyrimas.

Baigiamojo darbo pradžioje atliekama mokslinių darbų analizė, kurios esmė yra išanalizuoti su darbo tema susijusius mokslinius straipsnius, knygas ir apžvelgti tyrimus padarytus vėlyviausiu laikotarpiu.

Pateikiama teorija apie teliuškavimosi sukeltas neigiamas sąvybes: plūdrumui, stovumui, neskestamumui, eigumui, valdomumui ir supimuisi. Išanalizuotos skysčio teliuškavimosi vertinimo metodikos.

Skaičiuojamąja skysčių dinamikos programa „FLOW 3D“ atliktas skysčio teliuškavimosi tanke matematinis modeliavimas. Išanalizuotas programos naudojamas algoritmas RANS (angl. Reynolds avaraged Navier – Stokes simulation), kurio paskirtis yra skaičiuoti programoje sudarytą skysčio srauto charakteristikas. Nagrinėjami kokie greičiai ir pagreičiai susidaro tanke skysčiui teliuškaujantis. Nustatyta, kokio dydžio jėgos veikia tanko sienas.

Paskutinėje darbo dalyje atliktas fizinis eksperimentas bandant atkartoti sumodeliuoto tanko supimąsi. Atlikta tyrimo analizė, suformuluota metodika.

**Raktiniai žodžiai:** teliuškavimasis, laivas, tankas, greičiai, jėgos, skystis, skaičiuojamoji skysčių dinamika, FLOW 3D, fizinis ir matematinis eksperimentas.

## SUMMARY

Petkevičiūtė L., Research of fluid movement in ship tanks. The supervising tutor - doc. dr. V. Djačkov, the advising lecturer – doc. dr. J. Čerka, Naval Architecture and Marine Engineering studies programme thesis. Klaipeda University: Klaipeda: 2018- 54 p.

Purpose of this thesis is to modeling and investigate the impact investigation of sloshing in ship's tanks.

Scientific works with similar subject are analyzed at the beginning of this thesis with the purpose to find the latest scientific information of researches and books about it.

Introduced main theory about sloshing harmful effect: buoyancy, stability, survivability, floatation. Analyzed fluid sloshing of evaluation methodology.

CFD simulation was created with "Flow 3D". Gathered and calculated results are analyzed. Analyzed programs which used algorithm RANS (angl. Reynolds averaged Navier – Stokes simulation). Analyzed how kind of speed generates in sloshing tank. Established what is the size forces work on the tank wall.

In the last part of the work, has been completed a physical experiment, trying to replicate simulated tank swinging. Analysis of the research, formulated the methodology.

**Keywords:** sloshing, ship, tank, speed, forces, fluid, Computational Fluid Dynamics, FLOW 3D, physical and mathematical experiment.



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

Užduotis studentei: Lauritai Petkevičiūtei

Temos pavadinimas: Laivo tankuose esančio skysčio svyravimų tyrimas

### Darbo sudėtis

1. Titulinis lapas
2. Santrauka
3. Užduotis
4. Lentelių sąrašas
5. Paveikslėlių sąrašas
6. Turinys
7. Įvadas (problemos analizė)
8. Darbo tikslas ir uždaviniai
9. Literatūros analizė
10. Teorinė dalis
11. Skysčio teliuškavimosi laivo tankuose teorijos analizė
12. Teliuškavimosi tyrimai klasikinės hidrodinamikos metodais
13. Skysčio teliuškavimosi laivo tankuose skaičiavimai naudojant CFD programinę įrangą (FLOW 3D)
14. Fiziniai eksperimentai tiriant teliuškavimą arba teliuškavimosi fizinius modeliavimus;
15. Skaičiavimo rezultatų duomenų analizė
16. Išvados
17. Literatūros sąrašas
18. Priedai

Darbo vadovas (-ė):

.....

(vardas, pavardė, parašas)

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

1 pav. Bangos charakteristikos .....	11
2 pav. Skystojo krovinio įtaka stovumui .....	12
3 pav. Pastačius išilgines pertvaras, sumažėja tanko plotis.....	14
4 pav. Tanklaivis GENER8 HECTOR.....	15
5 pav. Ištinė korozija balastiniame tanke, laivas eksplotuojamas 25 metus .....	17
6 pav. Vietinė korozija balastiniame tanke .....	18
7 pav. Palyginami bangų susidarymai skirtingais užpildymo lygiais, su supimosi slopinimo tanku ir be .....	20
8 pav. Pagrindiniai SGD tanko elementai .....	21
9 pav. Dalinai (20%) ir pilnai užpildyti tankai .....	23
10 pav. Tankų modeliai, kurie buvo įdėti į laivo modelį . .....	25
11 pav. Matematinis modeliavimas imituojant laivo tankuose esantį skystą krovinį ir jį virtualiai pakeitus kietu kroviniu .....	25
12 pav. Vykusiai suprojektavus tankų konstrukciją ir formą, skysčio teliuškavimasis nepablogina laivo jūrinių savybių .....	26
13 pav. Skaitmeninio modeliavimo metodu gauti rezultatai labai gerai koreliuoja su fizinio eksperimento rezultatais .....	26
14 pav. Krovininio tanko skersines ir išilgines pertvaras veikiančios hidrostatinės ir hidrodinaminės jėgos (hidrostatinės, pseudohidrostatinės, hidrodinaminės ir suminė jėgos) .....	27
15 pav. Įvestį tinklelio (tanko) gabaritai .....	33
16 pav. Sukuriamos „Wall“ sienos.....	33
17 pav. „Sampling volume“ sienų sukurimas. ....	34
18 pav. Pasirenkamas skaičiavimo tipas .....	34
19 pav. Vizualus simuliacinis tankas .....	35
20 pav. Duomenų rezultatų ištraukimas.....	36
21 pav. Nurodyta nagrinėjama siena, teliuškavimosi nėra (šiuo momentu patiriamos jėgos mažiausios) .....	36
22 pav. x ašimi veikiantys greičiai ( $f=0.55\text{rad/s}$ ) .....	37
23 pav. x ašimi veikianti jėga ( $f=0.55\text{ rad/s}$ ).....	37
24 pav. z ašimi veikianti jėga ( $f=0.55\text{ rad/s}$ ) .....	38
25 pav. Nurodyta nagrinėjama siena, vyksta teliuškavimasis (šiuo momentu patiriamos jėgos didžiausios) .....	38
26 pav. x ašimi veikiantys greičiai ( $f=0.85\text{rad/s}$ ) .....	39

27 pav. x ašimi veikianti jėga ( $f=0.85$ rad/s).....	39
28 pav. z ašimi veikianti jėga ( $f=0.85$ rad/s) .....	40
29 pav. Fizinio eksperimento metu tanke tanke sukurtas ilgo periodo palyginus su laivo modelio nuosavų svyravimų periodu bangavimas.....	41
30 pav. Fizinio eksperimento metu tanke sukurtas teliuškavimosi reiškinys, esant trumpo periodo palyginus su laivo modelio nuosavų svyravimų periodu bangoms.....	42
31 pav. Teliuškavimosi proceso matematinio tyrimo algoritmas.....	43
32 pav. Basisupančiame laive esančią masę veikianti santykinė jėga .....	44

# TURINYS

<b>ĮVADAS</b> .....	9
<b>1.SKYSČIŲ TELIUŠKAVIMOSI DALINAI UŽPILDYTUOSE LAIVO TANKUOSE</b>	
<b>RIZIKA</b> .....	10
1.1. Laivo supimasis.....	10
1.2. Laivo valdomumas .....	12
1.3. Skystojo krovinio laisvojo paviršiaus įtaka laivo stovumui .....	12
1.4. Mechaninis dilimas ir korozija.....	16
1.5. Suskystintų gamtinių dujų saugojimas .....	18
<b>2. SKYSČIŲ TELIUŠKAVIMOSI DALINAI UŽPILDYTUOSE LAIVO TANKUOSE</b>	
<b>TYRIMŲ APŽVALGA</b> .....	19
2.1. Mokslinių straipsnių apžvalga .....	19
2.2. Atlikti eksperimentai susiję su skysčio teliuškavimusi .....	24
<b>3. TELIUŠKAVIMOSI MATEMATINIS MODELIAVIMAS</b> .....	28
3.1. Teliuškavimosi matematinio modeliavimo teorinė dalis .....	28
3.2. Teliuškavimosi eksperimentas programa „Flow-3D“ .....	31
<b>4. FIZINIS EKSPERIMENTAS</b> .....	41
<b>5. TYRIMO ANALIZĖ</b> .....	42
<b>IŠVADOS</b> .....	48
<b>LITERATŪROS SĄRAŠAS</b> .....	49
<b>PRIEDAI</b> .....	52

## Ivadas

Visuose laivuose yra skystojo krovinio (balastas, degalai, gėlas ir geriamasis vanduo ir t. t.), o tanklaiviuose – tai skystas krovinys, kurį gabena laivas. Jei cisternos ar kitos talpos yra pilnos (neturi laisvo paviršiaus), laivui statiškai pasvirus tas krovinys atitiks kietąjį pritvirtintą krovinį. Laive dėl tam tikrų priežasčių cisternos ir kitos talpyklos būna nepilnos, t. y. skystasis krovinys turi laisvąjį paviršių, todėl laivui pasvirus krovinys pasislinkdamas į posvyrio pusę neigiamai paveiks laivo stovumą ir jo padėtį.

Teliuškavimasis (angl. sloshing) – terminas, naudojamas apibūdinti stiprų rezonansinį judesį skystų krovinių tankuose, kai jis užpildytas dalinai. Kai balasto talpyklos yra iš dalies užpildytos yra tikimybė, kad skystis teliuškuosis. Teliuškavimasis yra smarkus skysčio paviršiaus judėjimas. Teliuškavimasis sukelia didelį dinaminį slėgį, kuris veikia talpyklos sienas. Projektuojant bet kokią talpyklą, kurioje bus skysčiai, svarbu atkreipti dėmesį, kad laivui plaukiant gali atsirasti rezonansas, dėl kurio gali būti pakenkta talpyklos konstrukcijai ir kitiems įrenginiams. Kad sumažinti teliuškavimosi padarinius, skysčio judėjimas turi būti kontroliuojamas, arba reikia garantuoti, kad talpyklos bus pilnos arba tuščios (teluškavimasis atsiranda kai nepilnai užpildytos talpyklos) [3].

### ***Tyrimo objektas:***

Skysčio teliuškavimasis dalinai užpildytose laivo talpose.

### ***Tyrimo tikslas:***

Ištirti teliuškavimosi intensyvumo vertinimo galimybes.

### ***Tyrimo uždaviniai:***

1. Atlikti problemos analizę (problemos aktualumas, ištyrimo lygis) atliktų tyrimų pagrindu.
2. Išanalizuoti skysčio teliuškavimosi laivo talpose neigiamas pasekmes, priežasčių galimus šalinimo kelius.
3. Išanalizuoti skysčio teliuškavimosi vertinimo metodikas (fiziniai eksperimentai, klasikinės hidrodinamikos metodai, matematinio modeliavimo CFD pagrindu metodai).
4. Atlikti esamų metodikų taikymo galimybių, sprendžiant suformuluotą problemą, analizę.
5. Priimtinos teliuškavimosi intensyvumo vertinimo metodikos sudarymas ir jos taikymas.

### ***Tyrimo metodai:***

- Teliuškavimosi tyrimai klasikinės hidrodinamikos metodais;
- Teliuškavimosi tyrimai skaitmeninės skysčių dinamikos metodais (angl., Computational Fluid Dynamics –CFD);
- Fiziniai eksperimentai tiriant teliuškavimą arba teliuškavimosi fizinis modeliavimas.

# 1. Skysčių teliuškavimosi dalinai užpildytuose laivo tankuose rizika

Laivo jūrines savybes apibudina: plūdrumas, stovumas, neskęstamumas, eigumas, valdomumas, supimasis. Skystasis krovinyse laive gali pabloginti daugumą jūrinių savybių, kadangi jos visos tarpusavyje yra susijusios, užtenka, kad viena iš šių savybių būtų kritinė. Jei nebus užtikrintos tinkamos skysčio laikymo sąlygos, tai teliuškavimas gali išaugti ir į avariją. Nuolat teliuškaujantis skystis laivo tankuose sukelia tokius neigiamus reiškinius kaip mechaninis dilimas ir korozija.

## 1.1. Laivo supimasis

Laivo supimas – tai svyravimų visuma apie pusiausvyros padėtį iš kurios išvestas laivas ir veikiamas išorinių jėgų. Pagal laivo svyravimų pobūdį išskiriamos supimo rūšys:

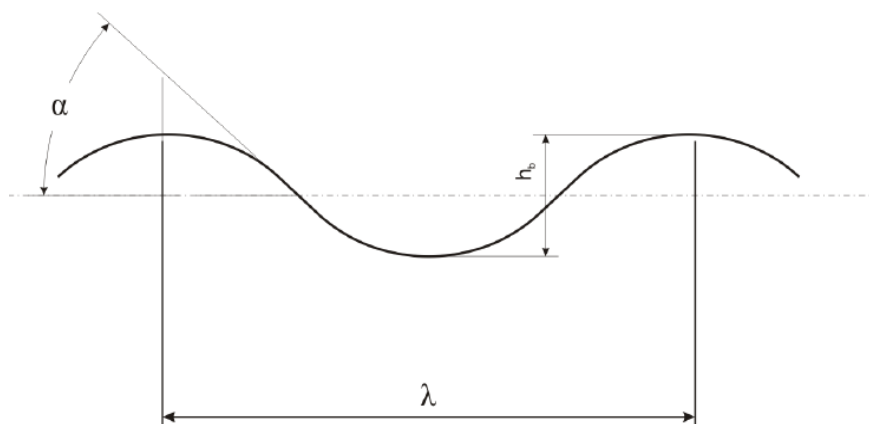
- bortinis supimas, svyravimai vyksta aplink išilginę ašį einančią per laivo svorio centrą;
- kilinis supimas, svyravimai vyksta aplink skersinę ašį, einančią per laivo svorio centrą;
- vertikalus supimas, svyravimai vyksta išilgai vertikalios ašies ties statinio stovumo vaterlinija.

Praktiškai laivas vienu metu patiria visas supimo rūšis. Laivo supimas turi nemažai neigiamų poveikių. Dėl supimo gali atsirasti pavojingas krenas, dėl ko gali būti prarastas laivo stovumas. Galimas krovinio pasislinkimas, o taip pat ir laivo mechanizmų atitrūkimas nuo tvirtinimo vietų. Dėl inercinių jėgų kurios veikia laivo korpuso sujungimus gal atsirasti pavojingi įtempimai, deformacijos įtrūkimai ar net pertrūkti korpusas. Laivo supimą charakterizuoja parametrai:

- $\Theta$  amplitudė – maksimalus laivo posvyris iš pusiausvyros padėties, matuojamas laipsniais
- T periodas – laikas per kurį laivas atliks pilną svyravimą, matuojamas sekundėmis, bortiniam supimui pilnu svyravimu vadinsime laivo posvyrį nuo vieno borto į kitą ir atgal, kiliniam supimui nuo nosies į laivagalį ir atgal, vertikaliam – nuo žemiausios padėties iki aukščiausios ir atgal.

Jei laivą esantį ramiaje vandenyje, paversti kažkoku kampu į vieną ar į kitą bortą, o vėliau pašalinti krenuojančią jėgą, tai laivas veikiamas atstatančiosios jėgos grįš į ankstesnę padėtį ir veikiamas inercijos įgaus kreną į kitą bortą, toliau laivas slopstančiais svyravimais svyruos apie pusiausvyros padėtį. Kadangi laivo svyravimams priešinasi vanduo tai šių svyravimų amplitudė palaipsniui mažės. Svyravimai ramiaje vandenyje, vykstantys dėl atstatančiojo momento – vadinami laisvais svyravimais. Vertikalus supimas metu, laisvi svyravimai – sukeliama svorio ir

vandens keliamųjų jėgų nelygybe. Laisvi virpesiai – gęstantys, t.y. jų amplitudė mažėja, nors periodas išlieka pastovus [21].



1 pav. Bangos charakteristikos

Plaukiojant dažniausia susiduriama su nereguliaru bangavimu. Reguliarus bangavimas gali būti charakterizuojamas bangos profiliu, kuris gaunamas atlikus bangos pjūvį.

Pagrindiniais reguliaraus bangavimo elementai:

- bangos profilis, artimas sinusoidei;
- bangos padas – žemiausias bangos taškas;
- bangos viršūnė (ketera) – aukščiausias bangos taškas;
- $\alpha$  - bangos nuolydžio kampas, kampas tarp horizontalės ir liestinės bangos nuolydžiui.

$$\alpha = \frac{\pi h_b}{\lambda} \quad (1)$$

$\lambda$ - bangos ilgis, horizontalus atstumas tarp dviejų bangos viršūnių arba padų;

$h_b$ - bangos aukštis, atstumas tarp bangos keteros ir pado;

$\tau_b$  - bangos periodas, laikas per kurį banga praeis atstumą lygų savo ilgiui  $\lambda$ ,

$$\tau_b = \sqrt{\frac{2\pi}{g}} \lambda \approx 0,8\sqrt{\lambda} \quad (2)$$

čia:

$g$  - laisvo kritimo pagreitis. ;

$C$  – bangos greitis, bangos ilgio ir periodo santykis  $C = \lambda/\tau_b$ , atstumas kurį nueis banga per 1 sekundę.

$$C = \frac{\lambda}{\tau_b} = \sqrt{\frac{g}{2\pi}} \lambda \approx 1,25\sqrt{\lambda} \quad (3)$$

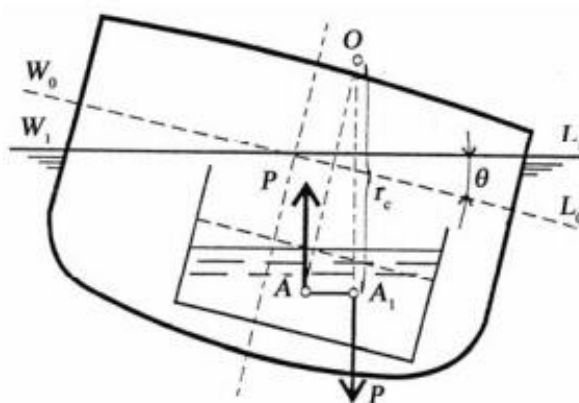
## 1.2. Laivo valdomumas

Laivo valdomumas priklauso nuo laivo savybių: korpuso, vairo – sraigto įrenginio, laivo greičio, bei nuo išorinių veiksnių: vėjo, bangų, kanalo gylio ir pločio. Būtina ypatingą dėmesį atkreipti į laivo greitį ir jo poveikį laivo valdomumui, kadangi greičio poveikis laivo valdomumui pasireiškia nevienareikšmiškai. Laivui judant pastoviu greičiu hidrodinaminis poveikis laivo korpusui ir vairui išliks pastovus. Esant nusistovėjusiam laivo greičiui vienodai pasukus vairą, trajektorija kuria judės laivas bus vienoda. Tačiau jeigu manevro metu pakeisime sraigto sukimosi greitį ar žingsnį, tai pasikeis vairą, esančio už sraigto, aptekancio srauto greitis. Todėl vairo sukiamas sukimo momentas pasikeis iš karto, o hidrodinaminis momentas veikiantis korpusą keisis lėtai, mažėjant greičiui, dėl ko keisis laivo judėjimo trajektorija. Kitaip tariant didinant sraigto apsukas arba žingsnį laivo judėjimo trajektorijos spindulys mažės, o mažinant didės [21].

## 1.3. Skystojo krovinio laisvojo paviršiaus įtaka laivo stovumui

Visuose laivuose yra skystojo krovinio (balastas, degalai, gėlas, geriamasis vanduo ir t. t.), o tanklaivuose – tai krovinys, kurį veža laivas. Jei cisternos ar kitos talpos yra pripildytos, laivui pasvirus tas krovinys atitiks kietąjį pritvirtintą krovinį. Laive dėl tam tikrų priežasčių cisternos ir kitos talpyklos būna nepilnos, t. y. skystasis krovinys turi laisvąjį paviršių, todėl laivui pasvirus krovinys pasislinkdamas į posvyrio pusę paveiks laivo stovumą ir jo padėtį (2 pav.).

Laivui pasvirus ir skystajam kroviniai pasislinkus į posvyrio pusę, pasikeis skystojo krovinio svorio centro padėtis – iš taško  $A$  į tašką  $A_1$ , t. y. krovinys pasislinks į kreno pusę ir atsiras krenavimo momentas [27].



2 pav. Skystojo krovinio įtaka stovumui [27]

$$M = \gamma \cdot v \cdot \underline{AA_1} = \gamma \cdot v \cdot \underline{OA} \sin \theta, \quad (4)$$

$\gamma$  – skystojo krovinio masės tankis;

$v$  – skystojo krovinio tūris.

Jei kreivę, kuria pasislenka cisternos svorio centras, pakeisime skritulio lanku, o atstumą OA laikysime jo spinduliu, tada šį atstumą galėsime apskaičiuoti pantono skersinio metacentrinio spindulio formule:

$$\overline{OA} = \frac{lb^3}{12V} \overline{OA} \quad (5)$$

kur: l ir b – cisternos ilgis ir plotis.

Ši formulė tiksli, jei cisternos forma – stačiakampis. Momentas, kuris atsiranda pasvirus laivui, veikia priešingai nei gražinamasis momentas, jį galima apskaičiuoti formule:

$$M_\theta = Dh \sin \theta - \gamma V \overline{OA} \sin \theta \quad (6)$$

Įrašę į šią formulę  $\overline{OA}$  reikšmę, gausime:

$$M_\theta = Dh \sin \theta - \gamma \frac{lb^3}{12 \sin \theta} \approx D \left( h - \frac{\gamma b^3}{12D} \right) \theta \quad (7)$$

Išraišką skliausteliuose galima vadinti nauju metacentro aukščiu, įvertinus skystojo krovinio poveikį:

$$h = h + \Delta h_1, \quad (8)$$

$\Delta h$  – skersinio metacentro aukščio pokytis nuo skystojo krovinio pasislinkimo:

$$\Delta h = -\frac{\gamma b^3}{12D} \quad (9)$$

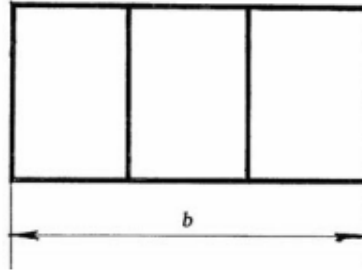
Ši formulė rodo, kad jei laive yra skystojo krovinio (neužpildytos cisternos), tai visada neigiamai veikia laivo stovumą. Iš šios formulės matome, kad laivo stovumo pablogėjimas nepriklauso nuo skystojo krovinio kiekio (čia nėra nei tūrio, nei skysčio svorio), o tik nuo skysčio laisvojo paviršiaus dydžio, skysčio lyginamojo svorio ir laivo vandentalpos. Siekiant sumažinti skystojo krovinio laisvojo paviršiaus įtaką, plačios cisternos padalinamos išilginėmis pertvaromis (3 pav.). Tada skersinio metacentro aukščio pokytį apskaičiuojame formule:

$$\Delta h = \frac{\gamma}{12D} \left( \frac{b}{n+1} \right)^3 \quad (10)$$

n – pertvarų skaičius.

Skystojo krovinio laisvojo paviršiaus įtaka išilginiam laivo stovumui yra gana nedidelė, ją galima apskaičiuoti formule:

$$\Delta H = -\frac{\gamma b l^3}{12D} \quad (11)$$



3 pav. Pastačius išilgines pertvaras, sumažėja tanko plotis

Laivo stovumą, priimant skystąjį krovinį, kuriuo nepilnai užpildome cisterną, galima įvertinti formule, kuria skaičiuojamas stovumas priimant kietąjį krovinį: reikia įrašyti skersinio metacentrinio aukščio pokytį dėl skystojo krovinio laisvojo paviršiaus:

$$\Delta h = \frac{p}{D+p} \left( T + \frac{\Delta T}{2} - h - z_p \right) - \frac{\gamma \cdot b^3}{12(D+p)} = \frac{p}{D+p} \left( T + \frac{\Delta T}{2} - h - z_p - \frac{lb^3}{12V} \right) \quad (12)$$

Jei bangavimo dažnis  $\sigma$  yra mažas, tuomet laivo priverstinių svyravimų periodas  $T_\theta$  bus didelis, laivas svyruos lėtai. Skysčio teliuškavimasis laivo talpose vyks beveik statiškai. Šiuo atveju teliuškavimosi neigiamą įtaką laivo stovumui galime įvertinti metacentrinio aukščio sumažėjimu  $\delta h$  [8]:

$$\delta h = \frac{\rho_c i_x}{\Delta}, \quad (13)$$

čia  $i_x$  – skysčio laisvo paviršiaus ploto inercijos momentas:

$$i_x = \frac{lb^3}{12} \quad (14)$$

$l$  – cisternos ilgis;

$b$  – cisternos plotis;

$\rho_c$  – cisternoje esančio skysčio masės tankis;

$\Delta$  – laivo vandentalpa.

Paskaičiuosime skysčio teliuškavimosi galimą neigiamą (o gal ir katastrofišką) įtaką tanklaivio *GENER8 HECTOR* stovumui (Significant Ships of 2016).

Pagrindiniai tanklaivio *GENER8 HECTOR* duomenys:

Ilgis  $L= 333$  m;

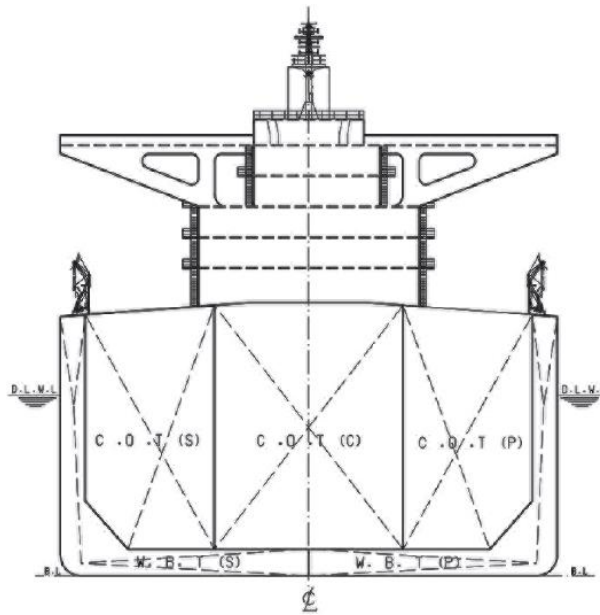
Plotis  $B=60$  m;

Grimzlė  $d=21,6$  m;

Aukštis  $D=29,5$  m;

Dedveitas 278731 t;

Tuščio laivo svoris 45400 t.



4 pav. Tanklaivis GENER8 HECTOR

Laivo vandentalpa:

$$\Delta = 278731 + 45400 = 324131 \text{ t};$$

**Centrinis tankas:**

$$i_x = \frac{l \cdot b^3}{12} = \frac{45 \cdot 20^3}{12} = 30000 \text{ m}^3$$

čia:  $i_x$  – skysčio laisvo paviršiaus ploto inercijos momentas:

$l$  – cisternos ilgis;

$b$  – cisternos plotis;

Skysčio teliuškavimasis laivo talpose vyks beveik statiškai. Šiuo atveju teliuškavimosi neigiamą įtaką laivo stovumui galime įvertinti metacentrinio aukščio sumažėjimu  $\delta h$  [8]:

Metacentrinio aukščio pokytis:

$$\delta h = -\frac{\rho \cdot i_x}{\Delta} = -\frac{1.025 \cdot 30000}{324131} = -0.09 \text{ m}$$

čia:  $\rho_c$  – cisternoje esančio skysčio masės tankis;

$\Delta$  – laivo vandentalpa.

**Bortinis tankas:**

$$i_x = \frac{45 \cdot 18^3}{12} = 21870 \text{ m}^3$$

$$\delta h = -\frac{\rho \cdot i_x}{\Delta} = -\frac{1.025 \cdot 21870}{324131} = -0.07 \quad m$$

Bendras metacentrinio aukščio sumažėjimas vykstant lėtam teliuškavimuisi tik vidurinės laivo dalies (midelio rajone) centriniame ir bortiniuose tankuose:

$$\delta h_{\Sigma} = \delta h_{centrinis} + 2 \cdot \delta h_{centrinis} = -(0.09 + 2 \cdot 0.07) = -0.23 \quad m.$$

Tai ženklus metacentrinio aukščio sumažėjimas, turint omenyje, kad pagal *International Code on Intact Stability, 2008*; – London: IMO, galėjo būti metacentrinis aukštis leistinose ribose, t.y. 0,15 m. Tuomet, prasidėjus skysčio teliuškavimuisi, metacentrinis aukštis būtų neigiamas, kas kelia pavojų laivo saugumui ir laivo eksploatacija negalima.

#### 1.4. Mechaninis dilimas ir korozija

Dilimas (nusidėvėjimas) suprantamas kaip statybinių matmenų (metalo storio) sumažėjimas laikui bėgant. Korozinis-mechaninis dilimas atsiranda mechaninių jėgų sąveikoje su cheminiu arba elektrocheminiu poveikiu. Dažniausiai nusidėvėjimas pasireiškia esant korozijos reiškiniams. Korozijos atsiradimas laivo konstrukcijose priklauso nuo metalo ir suvirinimo siūlių kokybės. Taip pat nuo korpuso surinkimo technologijos, technologinio priežiūros lygio, nuo rūšies ir kokybės apsauginių sluoksnių ir daugelio kitų faktorių. Išskirtinė tokios korozijos savybė – korozijos procesas gali vystytis pats, be išorinių jėgų pagalbos, naudodamas tik vidinę metalo energiją. Tuo tarpu kiti dilimo tipai, tokie kaip abrazyvinis ar erozinis dilimas reikalauja papildomos energijos [11].

Pagal veikimo charakterį korozijos procesus galima skirstyti į du tipus: cheminę ir elektrocheminę. Cheminė korozija dažniausiai vyksta mašinų įrenginių skyriuose ir įrengimuose, kur nėra drėgmės. Elektrocheminė korozija – tai metalų irimas laidžioje elektros srovei aplinkoje, kai susidaro galvaninės poros, vadinamos koroziniais galvaniniais elementais (metalų irimas drėgname ore, jūros vandenyje, rūgščių, šarmų ir druskų tirpaluose). Tokias galvanines poras gali sudaryti du metalai arba metalas ir jo priemaiša. Dėl to laivo korpusas panašus į daugielektrodinę sistemą, sudarytą iš katodinių ir anodinių zonų. Taip susidaro mikrogalvaniniai elementai. Veikiant korozinės elektros įtampai, vyksta metalo tirpimas ir susidaro korozinės duobutės.

Veikiant daugeliui išorinių ir vidinių faktorių, vyksta nuolatinis katodinių ir anodinių vietų pasikeitimas. Keičiantis įtempimų koncentracijais laivo korpuse, keičiasi ir katodo su anodo buvimo vietos. Todėl atskirų korpuso zonų korozinis nusidėvėjimas tampa tolygesnis.

Kadangi korozijos procese dalyvauja du komponentai - metalas ir supanti aplinka, reikia įvertinti tiek metalo, tiek supančios aplinkos savybes. Laivo korpusas gaminamas iš paprasto plieno, todėl jo korozinis atsparumas jūros vandenyje yra mažas (-3% NaCl tirpale). Korozijos greitis jūros vandenyje priklauso nuo plieno chemines sudėties. Paprasto anglinio plieno korozijos greitis - 0,09 mm/metus; turinčio 9% vario - 0,08 mm/metus; turinčio 3,8% nikelio - 0,07 mm/metus. Plienai, kurių sudėtyje be vario yra ir šiek tiek chromo, nikelio bei aliuminio, yra 25-30% atsparesni jūros vandeniui negu mažai legiruotieji ar angliniai plienai. Mažai legiruotojo plieno korozijos greitis įvairiuose vandeniniuose tirpaluose labai skiriasi: jūros vandenyje - 0,108 mm/metus; geriamajame vandenyje - 0,043 mm/metus; gėlame upės vandenyje - 0,010-0,068 mm/metus. Netgi jūros vandens druskingumas bei temperatūra, turi didelį įtaka korozijos spartai [29].

Jūros vandenyje greičiausiai korozija toje zonoje, kur veikia intensyvūs fizikiniai veiksniai, t. y. fazių sąlyčio jūros vanduo-metalas riboje. Nustatyta, kad visiškai į jūros vandenį panardinto plieno korozijos greitis yra 0,18 g/(m<sup>2</sup> val.), o zonoje, kurios nesiekia purslai ir bangos, - 0,01-0,05 g/( m<sup>2</sup> val.) [32].

Pagal metalo nusidėvėjimo pobūdį korozija skirstoma į ištisinę, bendrą ir vietinę. Ištisinė korozija – tai toks korozijos tipas, kuris vienodai pasiskirsto visame laivo korpuso elemento ilgyje (5 pav.).



5 pav. Ištisinė korozija balastiniame tanke, laivas eksploatuojamas 25 metus [32]

Vietinė korozija atsiranda tik atskirose laivo konstrukcijos vietose (6 pav.). Tokio tipo korozija būdinga laivui, eksploatuojamam pirmus 10 metų. Laikui bėgant, vietinių korozijos vietų atsiranda vis daugiau. Susijungus vietinės korozijos šaltiniams, korozija virsta ištisine. Dažniausiai laivuose, kurie ilgą laiką eksploatuojami, pasireiškia netolygi ištisinė korozija.



6 pav. Vietinė korozija balastiniame tanke [1]

Korozijos atsiradimas patalpoje, kurioje yra drėgmės, išauga. Ypač jei toje patalpoje yra skystis, kuris ne visada būna pilnai užpildytas tanke. Jei tanke yra galimybė teliuškuotis bet kokiam skysčiui, pablogėja ne tik bendras laivo stovumas, bet ir išauga korozijos tikimybė tanko viduje. Žinant skysčio greičius, pagreičius ar veikiamas jėgas, būtų galima paskaičiuoti, kokia korozija, kokioje konkrečioje vietoje susidarys.

### **1.5. Suskystintų gamtinių dujų saugojimas**

Suskystintos gamtinės dujos arba SGD (angl. Liquefied natural gas, trumpinys - LNG) – tai gamtinės dujos skystame pavidale. Kai jos yra atšaldomos iki  $-161,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , kondensuojasi į skystį ir užima 600 kartų mažiau vietos (nei dujiniame pavidale), o tai leidžia išspręsti dujų transportavimo dideliais atstumais problemą.

SGD daugiausiai transportuojama specialiai tam skirtu tanklaiviu. Išvystyti yra keli skirtingi tankų tipai. Jų svarbiausias tikslas yra išlaikyti LNG temperatūrą žemesnę nei  $-161,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ir užtikrinti tinkamą izoliaciją. Todėl svarbu išsirinkti tinkamą laikymo sistemą. Be to taip pat reikėtų atsižvelgti į tanko sugebėjimą atlaikyti tokias apkrovas, kurias sukelia teliuškavimasis. Suskystintos gamtinės dujos yra transportuojamos dvigubo korpuso tanklaiviuose. Jie sukurti taip, kad išlaikytų žemą SGD temperatūrą. Tanklaivių talpa svyruoja nuo 5 iki 266 tūkst.  $\text{m}^3$  skystų dujų. Tanklaivių ilgis siekia apie 300 m. Užpildyto tanklaivio minimali gramzda – 0,4 m [3].

Šiandien SGD rinka sparčiai auga, SGD tampa alternatyva naftai ir jos produktams, taigi ateityje gamtinės dujos taps alternatyviu kuru automobiliams ir laivams. SGD importo rinkos

augimui įtakos turi poreikis diversifikuoti energijos šaltinius, taip pat naftos išteklių ribotumas. Taigi ši rinka tikrai neišnyks, ir verta apžvelgti SGD tanklaivių vieną iš problemų – teliuškavimasi.

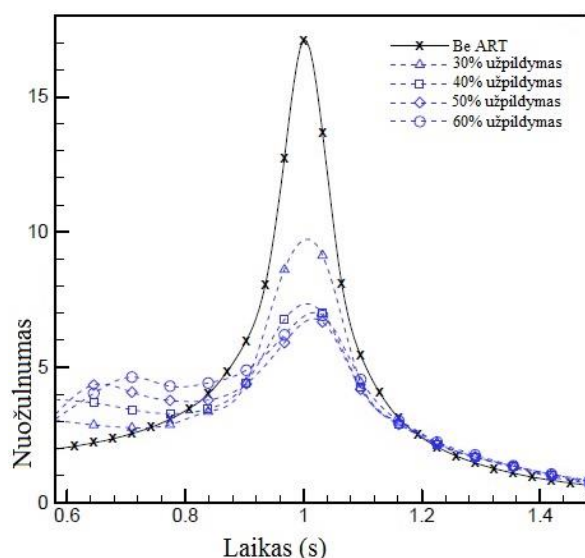
SGD talpyklos gali būti įrengtos SGD tanklaiviuose. Jie skirstomi pagal talpyklų formą – rutulio (angl. Kvaerner-Moss spherical tank), membranos (angl. Membrane system) ir prizmės (angl. IHI Prismatic). Pasaulinėje suskystintų gamtinių dujų rinkoje daugiausia yra naudojami rutulio formos talpyklas turintys tanklaiviai. 2014 m. FSRU tipo laivai–saugyklos su dujinimo įrenginiais veikė Brazilijoje, JAE, Italijoje, Indonezijoje, Lietuvoje (laivas–saugykla „Independence“).

## **2. Skysčių teliuškavimosi dalinai užpildytuose laivo tankuose tyrimų apžvalga**

### **2.1. Mokslinių straipsnių apžvalga**

Analizuojant mokslines publikacijas orientuotasi į literatūrą anglų kalba. Įtrauki ir tie šaltiniai kurie tiesiogiai nėra susiję su nagrinėjama tema, tačiau vienokiu ar kitokiu būdu prisideda prie temos nagrinėjimo ir supratimo. Taip pat atsižvelgta ir į tyrimo būdus, šiuo atveju orientuotasi į skaitmeninės skysčių dinamikos (SSD arba anglų kalba Computational Fluid Dynamics–CFD) tyrimo metodiką ir būdus, tad naudingi informacijos šaltiniai šiuo atžvilgiu taip pat aptariami, kadangi norint sėkmingai tam tikram tyrimui ir sąlygoms pritaikyti SSD skaičiavimo programas ir būdą, reikia žinoti kokiais atvejais ir kokią būdą yra tikslinga taikyti. Be to SSD tyrimams reikalinga žinoti ne tik reikalingą taikymo būdą (programą), bet ir tinklelio sudarymą bei jo tikslumą (elementų kiekį) norint gauti tikslius tyrimo rezultatus.

B. W. Nam, Y. Kim, D. W. Kim straipsnyje nagrinėjami teliuškavimosi netiesiniai reiškiniai, kurie daro neigiamą poveikį laivo judėjimui. Laivui plaukiant yra sujudinamas skystas kroviny s laivo tankuose, jam pradėjus teliuškuotis tai pradeda neigiamai veikti laivo stovumą. Kompiuterine programa, kuri veikia impulso reagavimo funkcijos metodu (IRF, angl. impulse-response function) buvo sumodeliuotas dalinai užpildytas tankas. Taikomas baigtinių elementų metodas (finite difference method), šis metodas skirtas tirti viso pasaulio skysčių judėjimą, įskaitant teliuškavimosi poveikį. Bet šis metodas aprėpia ne viską - ignoruojamas vietinis bangos lūžis ir reiškiniai vykstantys pasienio sluoksnyje. Sukurtas IRF grafikas, kuriame palyginamas bangos dydis, kai tankas užpildomas skirtingais lygiais (30%, 40%, 50%, 60%), pavaizduojamas bangos dydis be supimosi slopinimo (be ART)(7 pav.). ART (anti-rolling tank) supimosi slopinimo tankas. [19]



7 pav. Palyginami bangų susidarymai skirtingais užpildymo lygiais, su supimosi slopinimo tanku ir be [19]

Nors laivo judėjimas buvo laikomas linijinis, nelinijinis srautas veikiamas tanko viduje sukelia skirtingus srautų greičius, kas sukelia netiesišką laivo judėjimą. Ši analizė rodo, kad nelinijinis teliuškavimosi srautas yra svarbiausia analizės dalis. [19].

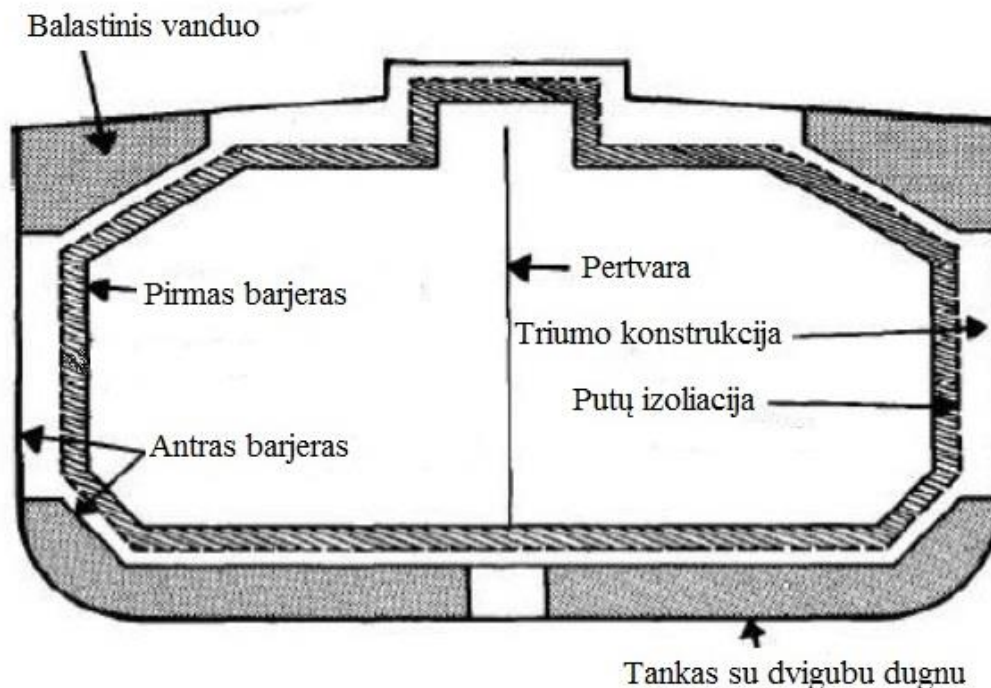
D. Changdong magistrantūros darbe nagrinėjamas teliuškaujantis skystis tanke, kuriame pripildyta suskystintų gamtinių dujų. Jų svarbiausias tikslas yra išlaikyti SGD temperatūrą žemesnę nei  $-161,5^{\circ}\text{C}$  ir užtikrinti tinkamą izoliaciją. Todėl svarbu išsirinkti tinkamą SGD laikymo sistemą. Be to taip pat reikėtų atsižvelgti į tanko sugebėjimą atlaikyti tokias apkrovas, kurias sukelia teliuškavimas.

Paprastai tanko konstrukcijos gali būti suskirstytos į dvi pagrindines kategorijas:

- membranos tankai;
- nepriklausomi tankai.

Membranos kategorija skirstoma į du projektuojamus tankų tipus naudojamus SGD, tai - membraniniai tankai ir pusiau membraniniai tankai. Nors tankų tipai yra skirtingi, kai kurie elementai yra vienodi visose talpyklose. Abiejuose tankų tipuose naudojamas dvigubas dugnas ir antras barjeras, jie yra labai svarbūs norint išvengti SGD nutekėjimo ir taip siekiama užkirsti kelią vandenynų taršai [4]

Membraninis tankas (8 pav.) turi ploną pirminį barjerą, kuris kontaktuoja su putų izoliacija. Visas bendras tanko sistemos tvirtumas yra užtikrinamas vidinės konstrukcijos elementų. Kad užtikrinti izoliaciją, membranos tanko sistema turi turėti antrą barjerą (bortą), kad jei įvyktų pratekėjimas pirmajame barjere, SGD neišsiliėtų.



8 pav. Pagrindiniai SGD tanko elementai [4]

Membranos tankas projektuojamas, kad išsiplėtimas ar susitraukimas būtų kompensuojamas, nebūtų įtempių membranoje. Membraninis projektavimas buvo pradėtas naudoti GAZ Transport (GTT) ir Technigaz kompanijų [4].

Pusiau membraninis tankas skiriasi tuo, kad pirmasis barjeras yra daug storesnis. Kampai turi didelį spindulį, todėl ši tanko dalis gali atlaikyti didesnius išsiplėtimus ir susitraukimus. Dugnas ir bortas yra tiesūs, izoliacijos pagalba dinaminės apkrovos perduodamos korpusui. Kai tankas yra tuščias, pirminis barjeras yra pakankamai standus ir atlaiko savo svorį. Kai tankas pripildomas, suskystintų dujų svoris sukelia spaudimą, tankas yra palaikomas korpuso konstrukcijų. Tankas negali būti projektuojamas prie laivo išorinės apkalos.

Teliuškavimasis yra sudėtingas skysčių judėjimo reiškinys, turintis nelinejines ir atsitiktines savybes. Yra keletas veiksnių, darančių įtaką teliuškavimosi judesiui, kurie gali būti apibendrinti kaip: laivo judėjimo dažnumas ir amplitudė priklauso nuo laivo apkrovos būklės, bangų elgsenos, laivo greičio. Natūralus skysčio dažnis priklauso nuo tanko geometrijos, užpildymo lygio ir judėjimo trajektorijos.

Paprastai teliuškavimasi gali būti kelių formų. Skysčiui teliuškuojantis tanke vyksta tokios judesių kombinacijos:

- stovinčioji banga (standing wave) – banga, kurios viršūnės (ar bet kuris kitas bangos taškas) erdvėje nejuda, fazė išlieka pastovi. Tokių bangų priežastis yra rezonansinis reiškinys.

- Judanti banga (traveling wave) – laikina banga, bet visada teliuškavimosi apkrovos juntamos tanko sienose. Tokio tipo banga kyla dėl trumpų trikdžių. Tokios trumpalaikės bangos dažniausiai atsiranda dėl gedimo ar žaibų padarinių.
- Hidraulinis šuolis – ypatinga bangos forma, kuri atsiranda kai tanko ir skysčio dažniai sutampa. Staigus tėkmės gylio padidėjimas, kuriam būdingas vandens volo susidarymas, kai tėkmė pereina iš audringo būvio į ramų;
- Sūkurys – spirališkas dalelių judėjimas aplink horizontalią ašį. Vandens sūkuriai susidaro dėl keletu vandens srovių susidūrimo. Slėgis sūkurio centre yra žemiausias, o pakraščiuose – aukščiausias (Bernulio dėsnis).

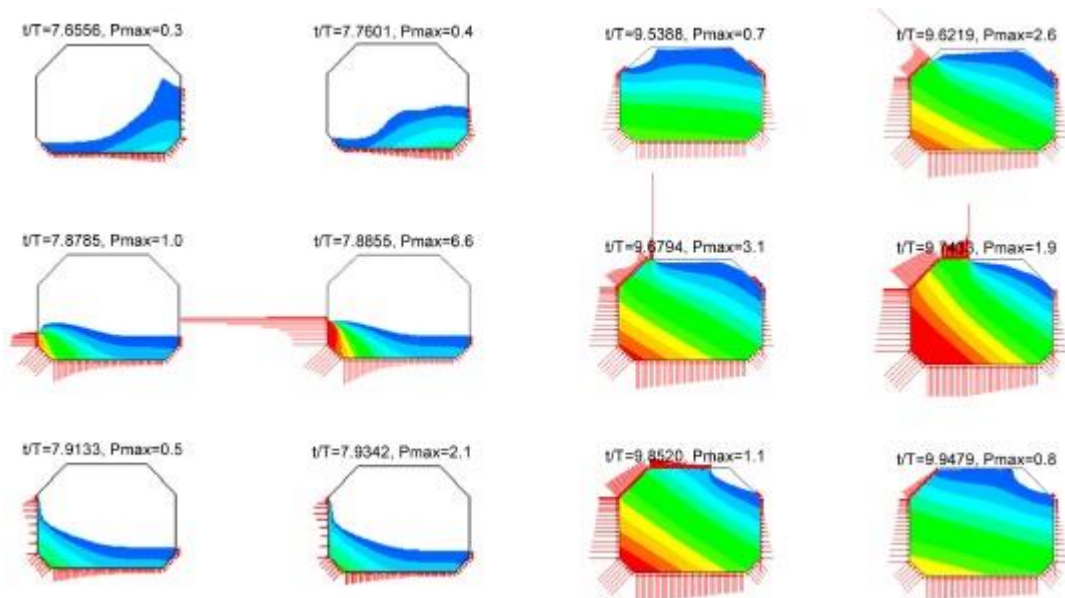
Hidrodinaminis slėgis, kurį sukelia teliuškavimasis, skirstomas į dvi kategorijas:

- Slėginis impulsas (impulse pressure) – tai greitas slėgio pulsas, kai skystis tėsikiasi į sieną. Paprastai, tai būna vietinis aukštas slėgis per trumpą laiką. Impulsinis slėgis siejamas su judančia banga ir hidrauliniu šuoliu, arba labai didele stovinčia banga.
- Slėgis be impulsų (no-impulse pressure) – nedidelis slėgis, susijęs su stovinčia banga.

Dažnio žadinimo dydis ir tanko užpildymo lygis daro įtaką bangos formos susidarymui teliuškavimosi metu. Net nedidelis dažnio pasikeitimas gali žymiai pakeisti teliuškavimosi judesį [4].

SGD tanklaiviui, teliuškavimasis yra labai pavojingas ir tam turi būti užkirstas kelias. Praktikoje yra žinomi trys būdai kaip galima sumažinti arba išvengti teliuškavimosi. Pirmas – turėtų būti uždrausta plaukioti su dalinai užpildytais tankais. Bet to išvengti transportuojant SGD yra neįmanoma, nes ne iš karto visas krovinytis yra pridudamas vienoje vietoje. Tam išsiaiškinti turėtų būti atliktas mokslinis transportavimo planas. Antra – koreguoti skersinį ir išilginį metacentrinį aukštį, siekiant pakeisti natūralų korpuso dažnį. Taigi, galima išvengti rezonanso, net jei tanko viduje vyksta įvairūs bangavimai. Trečia–specialios pertvaros (bulkhead or baffle) dėka galima sumažinti teliuškavimasi. Įrodyta, kad pertvaros žymiai sumažina skysčio judėjimą tanke, tad šiandien projektuojant tanką, kuriame bus skysčiai reikia atsižvelgti teliuškavimosi padarinius, ir suprojektuoti pertvarą, kuri neleis skysčių laisvam paviršiui pasiekti didelių greičių[4].

J. W. Kim, Y. S. Shin and K. J. Bai straipsnyje atlikti baigtinių elementų skaičiavimai (finite-element method) SGD tanke jam teliuškaujantis. Metodas yra pagrįstas srauto funkcijos teorija. Apskaičiuota tiksli bangos smūgio maksimali reikšmė esant žemam tanko užpildymo lygiui. Nustatyta, kad pavojingiausias užpildymo lygis, kai tankuose yra 20% skysčio, tada susidaro didžiausias paviršiaus srauto pagreitis ir banga pasiekama sienos ir lubų kampą. Kai tankas yra beveik pilnas, susidaro labai švelnios bangos. Dalinai (20%) ir pilnai užpildyti tankai pavaizduoti 9 pav.[14].



9 pav . Dalinai (20%) ir pilnai užpildyti tankai [14]

Y. G. Chen, W. G. Price, P. Temarel straipsnyje imituojamas skysčių teliuškavimasi SGD tankuose naudojant dviejų skysčių tekėjimo modelį. Metodas pagrįstas dviejų skysčių srautų tekėjimu. Nustatyta kokią spaudimą sukelia teliuškavimosi bangos cisternų sienoms ir luboms. Analizuojama pasireiškusi kavitacija, išsiaiškinta, kad garų burbuliukai daro neigiamą poveikį bangų elgsenai. Trūksta bandymų, kaip garų burbuliukai pakeičia vandens slėgį, kaip nuo to keičiasi konstrukcijos korozija. Reikia atlikti daugiau skaitmeninių skaičiavimų, kad būtų užtikrintas tikslumas. Tyrime buvo atlikti labai riboti skaitiniai eksperimentai. Norint imituoti lūžtančios bangos laisvą paviršių reikalingas smulkesnis tinklėlis [5].

R. L. Bass, E. B. Bowles ir P. A. Cox straipsnyje pateikiamas dinaminių slėginių apkrovų įvertinimas SGD talpyklose. Pristatyta pasaulinio masto srauto modelių duomenų apžvalga. Atlikti laboratoriniai eksperimentai siekiant nustatyti teliuškavimosi srauto dinamišką spaudimą pagal laiką, kurie reikalingi struktūrinei analizei. Nustatytas tanko sienos atsakas į dinامينius srautų apkrovas. Išsiaiškinta, kad dėl didelės rezonanso amplitudės, teliuškavimasis sukelia didelio smūgio dydžio svyravimą, kiekvieno ciklo metu. Šie slėgiai gali atsirasti bet kurioje tanko sienelės vietoje, jei tankas yra dalinai užpildytas. Pateikta projektavimo metodika slėgio ir gravitacijos talpyklose, ir membranos ir pusiau membranos tankuose [24].

N. A. Hamlin, Y. K. Log, W. M. Maclean ir kt. straipsnyje apžvelgtos įvairios bangų rūšys, kurios susidaro stačiakampiuose tankuose. Analitiškai ir eksperimentiškai nagrinėjamas teliuškavimosi reiškinys lygiame skysčio paviršiuje, kaip analizės sprendimas naudojama netiesinė teorija. Naudojant skaitmeninę programą imituojamos tanke kliūtys - pertvaros. Taip galima užkirsti kelią teliuškavimuisi dar projektuojant laivo talpas, kuriose numatoma laikyti skystą krovinį [12].

P. Krata, W. Wawrzynski, J. Jachowski, W. Wieckiewicz straipsnyje skaičiuojamas dinaminio kreno momentas, kuris susidaro dėl skysčio teliuškavimosi ir atliekamas eksperimentinis simuliacijos bandymas. Atlikus skaitmeninį modeliavimą, reikia atlikti ir eksperimentinį patvirtinimą. Tyrimas vyko Gdynės (Lenkijoje) jūrų laivybos universitete. Eksperimentai yra labai brangūs ir užima daug laiko, todėl kiekvieną žingsnį reikia kruopščiai suplanuoti ir pagrįsti. Eksperimentiniai bandymai truputį skyrėsi nuo simuliacinio. Simuliacija atlikta naudojant „FlowVision“, tai universali ir lanksti programa skirta skysčių dinaminiam modeliavimui [15].

O. Faltinsen ir O. Rognebakke straipsnyje atlikti fiziniai ir matematiniai modeliavimai. Aptariami laivo tankų fiziniai aspektai. Pabrėžiamas dėmesys skysčio ir briaunų paviršiaus nuovargiui. Pateikti skaitmeninių metodų eksplotacinių charakteristikų reikalavimai. CFD (angl. Computational Fluid Dynamics) metodo trūkumai – ilgas modeliavimo laikas. Atliktas analitinis modeliavimas, jo trūkumai – tankas turi būti vertikalčiai lygus ir neskaičiuojami žemi užpildymo lygiai tankuose [10].

D. Zhao, Z. Hu, G. Chen, S. Lim, S. Wang straipsnyje taikomas skaitmeninis ir matematinis modelis, skaičiuojamas pagreičio potencialas stačiakampiame SGD tanke (ribinių elementų metodas BEM) ir dirbtinio amortizavimo modelis. Apskaičiuoti rezultatai lyginami su skaitmeniniu būdu gautais rezultatais. Metodas yra sukurtas, tačiau trūksta bandymų, norint įvertinti metodo tikslumą [28].

Atlikus literatūros analizę, galima teigti, kad dauguma tyrimų buvo atlikta SSD pagrindu veikiančiomis skaičiavimo programomis. Tokios programos tampa vis populiareesnės modeliuojant konkretų objektą, susijusį su skysčiais, jūrinėmis savybėmis, kadangi gaunami kokybiški ir arti realybės esantys rezultatai. Yra būtinybė nustatyti SSD programos sąlygas, kuriomis remiantis būtų galima patikimai atlikti dalinai užpildyto (apie 70%) tanko modeliavimą ir skysčio laisvojo paviršiaus skaičiavimus.

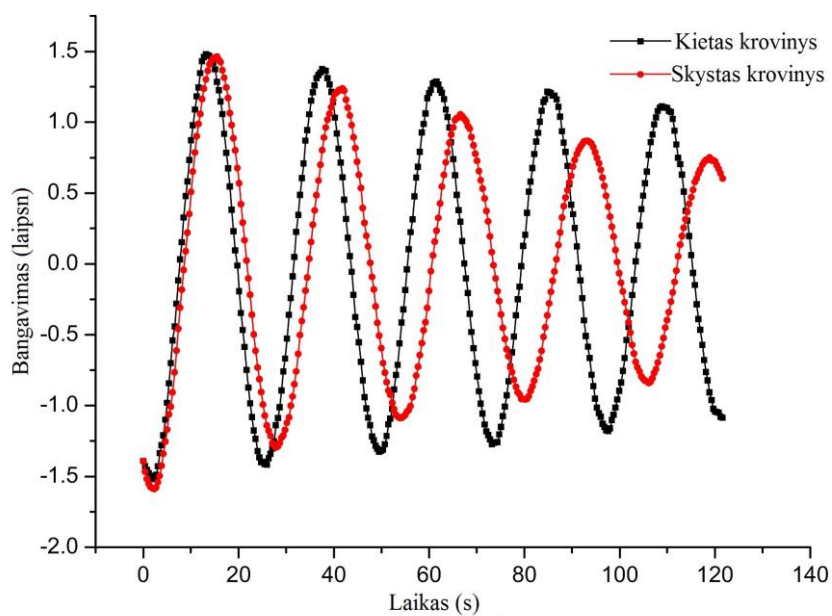
## **2.2. Atlikti eksperimentai susiję su skysčio teliuškavimusi**

Kinijos, Jungtinės Karalystės ir Australijos universitetų mokslininkų kolektyvas tyrė [13] skysto krovinio su laisvu paviršiumi įtaką laivo hidrodinaminėms charakteristikoms. Tai vienas iš nedaugelio šiuo metu atliktų kompleksinių tyrimų siekiant išsiaiškinti kokią įtaką transportuojamas SGD arba kitoks skystas krovinyms turi laivo plaukiojimo saugumui ir kokiais metodais šią įtaką laivų projektuotojai ir eksploatuotojai gali įvertinti. Buvo atliktas fizinis (10 pav.) ir matematinis modeliavimas imituojant laivo tankuose esantį skystą krovinį ir jį virtualiai pakeitus kietu kroviniu (10 pav.), t.y. laikant, kad nevyksta skysčio teliuškavimasis. Skaitmeninis modeliavimas buvo atliekamas hibridiniu metodu (analoginis ir diskretusis derinys) SESAM [26]. Tirta esant tankų užpildymui 25 %, 50 % ir 75 % (12 pav.). Gauti tyrimų rezultatai rodo, kad

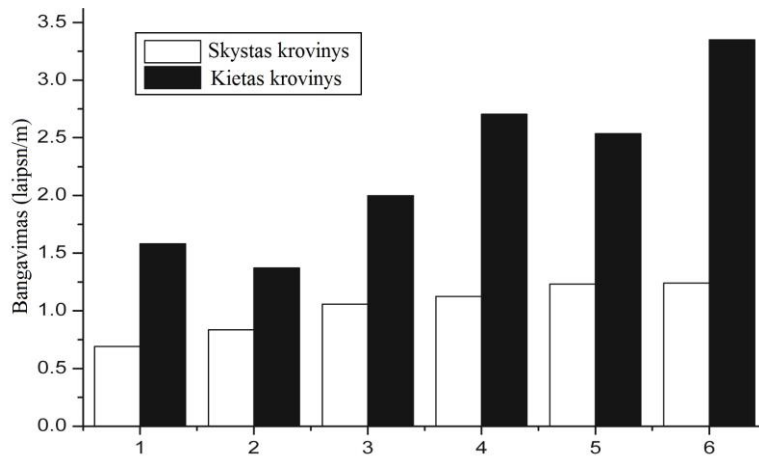
vykusiai suprojektavus tankų konstrukciją ir formą, skysčio teliuškavimasis nepablogina laivo jūrinių savybių. Kita svarbi atlikto tyrimo išvada – skaitmeninio modeliavimo metodu gauti rezultatai labai gerai koreliuoja su fizinio eksperimento rezultatais (13 pav.).



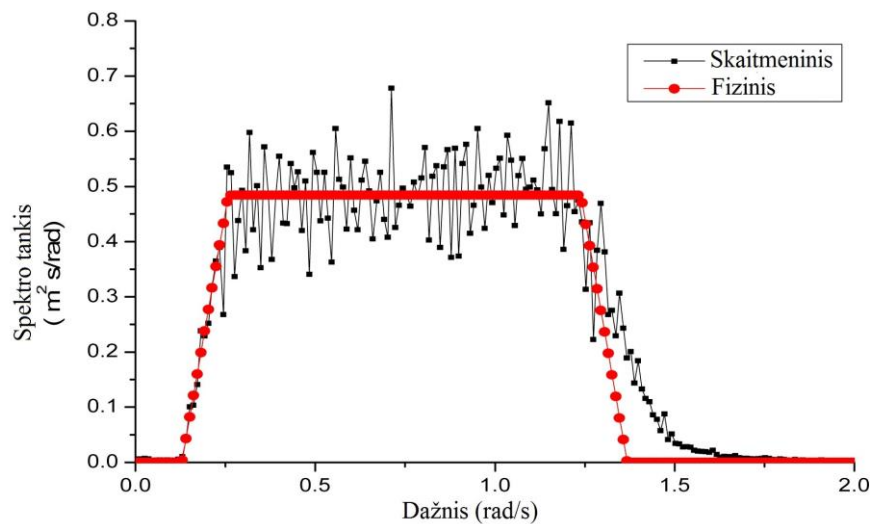
10 pav. Tankų modeliai, kurie buvo įdėti į laivo modelį [26].



11 pav. Matematinis modeliavimas imituojant laivo tankuose esantį skystą krovinį ir jį virtualiai pakeitus kietu kroviniu [26]

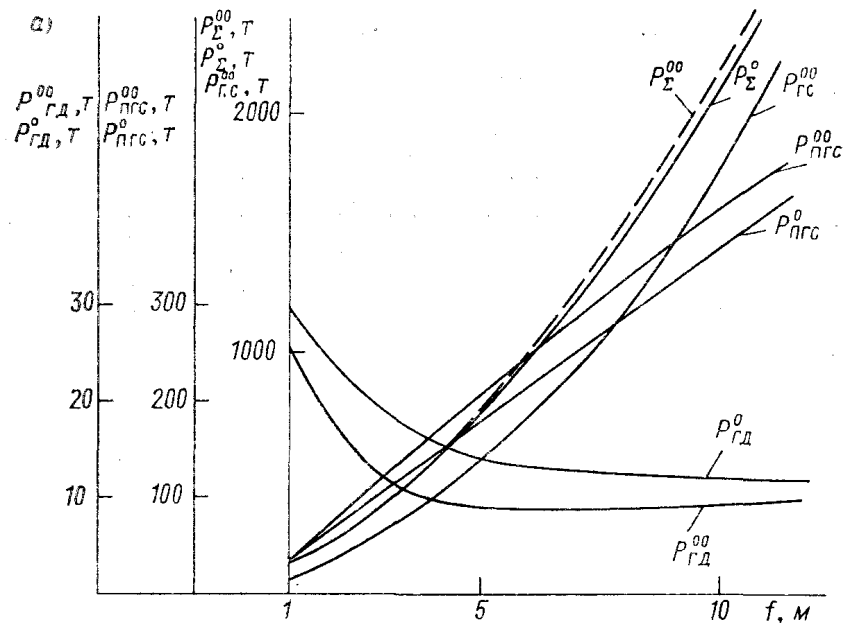


12 pav. Vykusiai suprojektavus tankų konstrukciją ir formą, skysčio teliuškavimasis nepablogina laivo jūrinių savybių (1, 2, 3 – bangavimas į laivaprieikinį ketvirtį; 4, 5, 6 – bangavimas į laivo bortą esant tankų užpildymui 25 %, 50 % ir 75 % atitinkamai) [13]



13 pav. Skaitmeninio modeliavimo metodu gauti rezultatai labai gerai koreliuoja su fizinio eksperimento rezultatais [26].

Spektro tankis pasako kiek signalo (amplitudės) tenka atskirai dažnio juostai. Vienas iš pirmųjų skysčių teliuškavimosi laivo talpose kompleksinių tyrimų siekiant sukurti teliuškavimosi įtakos laivo jūrinėms savybėms praktinio vertinimo metodiką buvo vykdomas V. Morenšildt, N. Rachmanino, A. Zubkovos, J. Remezo ir kt. darbuose [30], [31], [32]. Taikant klasikinę [6] ir hidrodinaminę laivo supimosi teoriją [31] išanalizuota skysčio teliuškavimosi metu kylančios hidrostatinės ir hidrodinaminės jėgos (14 pav.) bei jų poveikis laivui. Nagrinėjami prizmės ir cilindro formos tankai. Sudarytos jėgų apytikrio skaičiavimo metodikos, kuriomis naudojantis parenkami optimalūs tankų matmenys bei tikrinamas konstrukcijų tvirtumas.



14 pav. Krovininio tanko skersines ir išilgines pertvaras veikiančios hidrostatinės ir hidrodinaminės jėgos (hidrostatinės, pseudohidrostatinės, hidrodinaminės ir suminė jėgos) [23]

Besisupančiame ant reguliarių ir nereguliarių bangų laive esančius krovinis (mechanizmus, įrenginius ir kitokius masę turinčius objektus) pakankamai patikimai galima taikant klasikinę laivo hidrodinamikos teoriją [6], [8], [17]. Paprastai visų jėgų atstojamoji suskaidoma į vertikalią ir horizontalią dedamąsias (32 pav.)

Nereguliaraus bangavimo proceso būdingąjį parametą ir sąlyginę krovinį veikiančią jėgą galima vienareikšmiškai susieti tarpusavyje. Tokius dinaminės sistemos išėjimo ir įėjimo procesus tarpusavyje surišti galime remiantis Činčino teorema, pagal kurią linijinės dinaminės sistemos išėjimo proceso spektrinis tankis lygus šios sistemos perėjimo funkcijos kvadrato sandaugai iš įėjimo proceso spektrinio tankio:

$$S_u(\sigma) = \Phi_{\zeta u}^2(\sigma) \cdot S_{\zeta}(\sigma), \quad (15)$$

čia  $S_u(\sigma)$  – laivo supimosi parametro  $u$  spektrinis tankis (tiksliau – pseudospektras);

$\Phi_{\zeta u}(\sigma)$  – perėjimo funkcija nuo bangavimo atsitiktinio parametro  $\zeta$  prie supimosi atsitiktinio parametro  $u$ ;

$S_{\zeta}(\sigma)$  – bangavimo spektras.

Perėjimo funkcijos nuo bangos ordinačių santykinei skersinei jėgai kvadratas:

$$\Phi_{\zeta \bar{p}}^2(\sigma) = \left[ 1 + \frac{\sigma^2}{g} (z_{kr} - z_g) \right]^2 \Phi_{\zeta \theta}^2(\sigma). \quad (16)$$

Seulo [19] bei Trondheimo [25] universitetuose atliktų tyrimų metu nustatyta, kad tinkamai parinkus laivo su skystu krovinio tankuose supimosi vertinimo matematinį modelį teorinių

skaičiavimų rezultatai gerai koreliuoja su fizinių eksperimentų rezultatais. Labai svarbus gebėjimas įvertinti įvairių faktorių įtaką sąryšiui tarp laivo supimosi ir skysčio teliuškavimosi.

### 3. Teliuškavimosi matematinis modeliavimas

#### 3.1. Teliuškavimosi matematinio modeliavimo teorinė dalis

Skaitmeninė skysčiu dinamika (SSD) iš pradžių buvo sukurta be automatizuotų priemonių. Tuomet reikėjo išspręsti sudėtingas lygtis, palyginamai nesudėtingų uždavinių. Kuomet atsirado elektroniniai kompiuteriai, tuomet tapo įmanomi sunkesni skaitiniai skaičiavimai. Iš pradžių SSD kodai buvo parašyti konkrečioms problemoms ir netinkantys kiekvienai reikiamai situacijai. Ypač kai skaičiavimo resursai tapo labiau prieinami, buvo sukurti bendrosios paskirties SSD kodai. SSD yra geras įrankis sprendžiant įvairias pramonines problemas susijusias su skysčių ir dujų mechanika. Komerciniais bendro pobūdžio kodais galime išspręsti platų spektrą tekmės uždavinių. Dabartiniai tyrimai sutelkti į SSD esminių klaidų pašalinimą ir tai, kaip elgtis su turbulencija ir dispersiniais daugiafaziais tekėjimais. Vartotojo tikslas - padidinti tikslumą, sumažinti sprendimo laiką, ir pagerinti prieinamumą. Nepaisant SSD apribojimų, pramonės programų ekonominė vertė buvo parodyta daugybėje industrijų, ir jo vertė, kaip tyrimo įrankio buvo pripažinta daugybėje mokslo šakų, tokiose kaip aviacija, meteorologija, medicina ir astrofizika [23].

Šiuolaikinė kompiuterinė technika įgalina panaudoti skaitinius tyrimus įvairiems praktiniams uždaviniams, tarp jų ir skysčio srauto mainams mišrios konvekcijos sąlygomis spręsti. Šį procesą aprašo Navje–Stokso, nepertraukiamumo ir energijos diferencialinių lygčių sistema. Yra skiriami keturi pagrindiniai modeliavimo lygiai:

- turbulentinių charakteristikų tiesioginis skaitinis modeliavimas (DNS),
- stambių sukurių modeliavimas (LES),
- Reinoldso suvidutinintų Navje–Stokso lygčių (RANS) modeliavimas,
- stacionarus arba nestacionarus Navje–Stokso lygčių skaitinis sprendimas (laminariniam tekėjimo atveju).

Turbulentiniam pernešimui DNS modeliuoti reikia gana tankaus tinklelio pagal koordinates ir didelio laiko žingsnių skaičiaus, siekiant tinkamai įvertinti mažuosius turbulentiškumo mastelius. Tačiau šios formos aprašymas nereikalauja jokios empirinės informacijos, nes lygčių sistema yra uždara (bendruoju atveju – 5 lygtys ir 5 nežinomieji:  $p$ ,  $u_x$ ,  $u_y$ ,  $u_z$  ir  $T$ ). Kadangi DNS modeliavimas reikalauja daug kompiuterinio laiko (galingo kompiuterio), paprastai vykdant tokius skaičiavimus apsiribojama paprastesne geometrija ir mažesniais  $Re$

skaičiais. Turbulentiniam pernešimui problematiška visur taikyti Navje–Stokso lygtis, todėl šios momentinės lygtys transformuojamos į suvidutintą lygtis. Suvidutinant dėl konvekcinių narių nelineiškumo atsiranda papildomi nežinomieji. Šiems papildomiems nežinomiesiems aproksimuoti sukurti turbulentinio pernešimo modeliai. Galimi du būdai: LES ir RANS [26].

LES atveju suvidutininimas (filtravimas) atliekamas tik esant mažesniems turbulentiškumo masteliams. Taigi trimatė kintama didesnių turbulentiškumo sūkurių struktūra nuodugnai įvertinama, o mažesni sūkuriai (tinklelio celių dydžio) modeliuojami. Kadangi šie mažesni sūkuriai pasižymi izotropine struktūra (bent jau kai Re yra dideli), todėl juos lengva sumodeliuoti. Taigi gali būti naudojami retesni tinkleliai ir didesni laiko žingsniai nei DNS atveju.

Kaip žinoma, pereinant iš Navje–Stokso prie RANS lygčių atsiranda nauji nežinomieji – Reinoldso įtempimai, kurie apibūdina turbulentinį impulso ir skysčio srauto pernešimą. Paprastai išskiriami trys lygiai šioms Reinoldso įtempimams modeliuoti: turbulentinio klampumo modeliai, algebriniai įtempimų modeliai ir Reinoldso įtempimų modeliai [16] [17] [23].

Kadangi naudosime programą pavadinimu „FLOW 3D“, o ši programa naudoja RANS (angl. Reynolds averaged Navier – Stokes simulation) skaičiavimų algoritmą, kurio paskirtis yra skaičiuoti programoje sudarytą skysčio srautą aptekantį sumodeliuotą kūną. Dar kitaip šios programos skaičiavimo metodika vadinama CFD (angl. Computational Fluid Dynamics), išvertus – skaičiuojama skysčių dinamika. Panagrinėsime algoritmą, kurį naudoja ši programa:

### Navjė ir Stokso lygtis: [23]

Laikome, kad terpė – nespūdas klampus Niutono fluidas.

Įtempimų tenzorius [P] tokiam fluidui lygus:

*Tenzorius – geometrinis objektas, susidedantis iš sumos komponentų, kurios yra transformuojamos pagal tiesinius sąryšius.*

$$[P] = 2\mu[D] - p[E] \quad (17)$$

čia:

$\mu$  - dinaminė klampa;

[E] – vienetinis tenzorius;

[D] – deformacijų greičių tenzorius,

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{\partial v_x}{\partial x} & & \\ & \text{simetrija} & \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) & \frac{\partial v_y}{\partial y} & \\ \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) & \frac{1}{2} \left( \frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) & \frac{\partial v_z}{\partial z} \end{bmatrix} \quad (18)$$

Įrašę (18) išraišką į šią (19) terpės judėjimo lygtį (kai terpės viduje yra papildomi masės šaltiniai) ir laikydami, kad skysčio tekėjimas izoterminis ( $\mu=\text{const}$ ,  $\rho=\text{const}$ ), užrašome Navjė ir Stokso lygtį kartu su skysčio nespūdumo sąlyga:

$$\rho \frac{d\{v\}}{dt} = \rho(F_v) + \text{div}[P] - I\{v\} \quad (19)$$

$$\frac{\partial\{v\}}{\partial t} + (\{v\} \cdot \nabla)\{v\} = \{F_v\} - \frac{1}{\rho} \text{grad}p + \nu \nabla^2 \{v\}; \quad \text{div}\{v\} = 0; \quad (20)$$

čia:

$\text{grad} p$  – slėgio gradientas  $\nabla^2 \{v\}$  - vektoriaus  $\{v\}$  Laplaso operatorius.

$$\text{grad}p = \frac{\partial p}{\partial x} \{i\} + \frac{\partial p}{\partial y} \{j\} + \frac{\partial p}{\partial z} \{k\};$$

$$\nabla^2 \{v\} = \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \{i\} + \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \{j\} + \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \{k\}$$

**Navjė ir Stokso lygčių sprendimas BEM.** Skysčių mechanikoje, baigtinių elementų metodas yra pagrindine naudojamas sluoksniuotiems srautams [23].

Businessko priartėjime Navjė ir Stokso lygtys, užrašytos bedimensine forma, yra:

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{1}{\text{Re}} \left( \Delta u_x - \frac{y}{x^2} u_x \right) = 0; \quad (21)$$

$$\frac{\partial u_y}{\partial t} + u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{1}{\text{Re}} \Delta u_y = 0;$$

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\gamma}{x} u_x + \frac{\partial u_y}{\partial y} = 0$$

čia:

$\Delta$ - skaliarinės funkcijos laiplasianas;

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\gamma}{x} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} = 0;$$

čia:

$\gamma=0$ , kai naudojama Dekarto koordinačių sistema;

$\gamma=1$ , kai naudojama cilindrinė koordinačių sistema ( $x=r$ ,  $y=z$ ) sprendžiant ašisimetrinį uždavinį.

Lygčių sistema, kai procesas yra stacionarus, sprendžiama baigtinių elementų metodu.

Greičiai ir slėgis baigtiniame elemente aproksimuojami:

$$\begin{aligned}
u_x &= \sum_{i=1}^n N_i(r,s)p_i = [N]\{p\}; \\
u_y &= \sum_{i=1}^n N_i(r,s)v_i = [N]\{v\}; \\
p &= \sum_{i=1}^{n_p} N_{pi}(r,s)p_i = [N_p]\{p\};
\end{aligned} \tag{22}$$

čia:

$N_i$ ,  $N_{pi}$  – baigtinio elemento formos funkcijos;  $\{u\}$ ,  $\{v\}$ ,  $\{p\}$  – greičių ir slėgio reikšmių baigtinio elemento mazguose vektoriai.

Pritaikę Galiorkino metodą, gauname lygčių sistemą [23]:

$$\begin{aligned}
\int_{A^{(e)}} [N]^T \left( u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{1}{\text{Re}} \left( \Delta u_x - \frac{y}{x^2} u_x \right) \right) dA &= 0; \\
\int_{A^{(e)}} [N]^T \left( u_x \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{1}{\text{Re}} \Delta u_y \right) dA &= 0; \\
\int_{A^{(e)}} [N_p]^T \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\gamma}{x} u_x + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) dA &= 0
\end{aligned} \tag{23}$$

### Išvados:

Navjė ir Stokso lygčių sprendimas yra gana sudėtingas ir šiomis dienomis retai taikomas. Dėl Navje-Stokso lygčių netiesiškumo analitiniai sprendimai galimi tikrai labai supaprastintose sąlygose, o dėl to gali nukentėti tikslumas. Tačiau jų skaitinis sprendimas įmanomas ir nesprendžiant šių lygčių. Šiuolaikiniai skaitiniai metodai yra galingas įrankis sprendžiant tokio tipo uždavinius. Šiuo metu sukurta daug įvairių programinių kodų, realizuojančių Navje-Stokso lygčių skaitinį sprendimo metodą. Pasirinkome programą Flow-3D, kurios pagalba bus atliktas Navjė ir Stokso lygčių sprendimas.

### 3.2. Teliuškavimosi eksperimentas programa „Flow-3D“

Naudosime skaičiuojamąją skysčių dinamikos programą „FLOW 3D“. Programa suteikia galimybę be kitų papildomų programų sudaryti eksperimentą ir apdoroti gautus rezultatus. Ši programa naudoja RANS (angl. Reynolds avaraged Navier – Stokes simulation) skaičiavimų algoritmą, kurio paskirtis yra skaičiuoti programoje sudarytą skysčio srautą. Dar kitaip šios programos skaičiavimo metodika vadinama CFD (angl. Computational Fluid Dynamics), išvertus – skaičiuojamąją skysčių dinamika. Ši programa analizuoja ne patį kūną veikiančias jėgas, bet srautą veikiančias jėgas, kai šis

susiduria – apteka kūnā. „FLOW 3D“ simuliacijoje modeliuojamas tyrimas gali būti sudarytas ir su skysčiu ir su dujomis nurodytose zonose – taip imituojant maksimaliai realų tyrimą. Vizualus skaičiavimų metu gautų rezultatų pateikimas suteikia galimybę aiškiai suprasti eksperimento metu vykstančių fizinių procesų eigą norimu laiko momentu. Tinklelis, kuris sudarys eksperimento simuliacinę erdvę, sudaromas pusiau automatiškai. Svarbiausias kriterijus, turintis tiesioginę įtaką gautų rezultatų tikslinimui – teisingas eksperimento sudarymas [11].

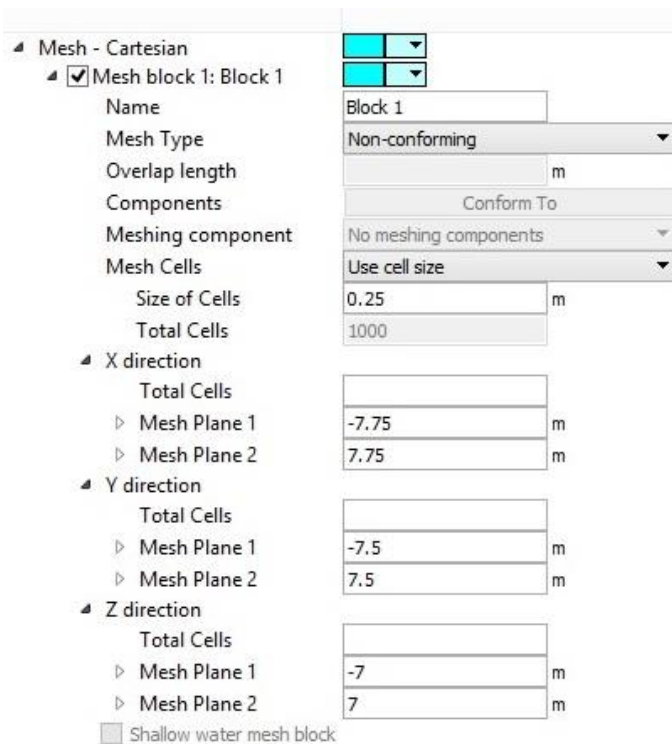
Norint sumodeliuoti teliuškavimosi simuliacinį eksperimentą programoje „Flow-3D“, pirmiausia reikia nusistatyti, kokius pradinius duomenis turėsime užduoti. Kad sumažinti skaičiavimo laiką, tanko nepririšime prie laivo geometrijos. Jei į programą būtų keliamas ir laivo geometrinis failas, tokiu atveju būtų vertinamas laivo korpuso pasipriešinimas, laivo supimasis ir t.t., kas skaičiavimų prasme užtruktų gana ilgai. Todėl pasirinkome, kad simuliacija bus atliekama nevertinant faktorių, kurie vyksta už tanko ribų.

#### **Nusistatomos pradinės eksperimento sąlygos:**

1. Pasirenkama tanko forma – stačiakampė prizmė;
2. Tanko gabaritai: ilgis  $L=15,5\text{m}$ ;  
plotis  $B=15\text{m}$ ;  
aukštis  $h=14\text{m}$ .
3. Skysčio užpildyta – 10m nuo tanko dugno (apie 71%).
4. Krovinio tipas – jūros vanduo.
5. Tanko vieta laive – centrinis tankas.
6. Informacija apie supimąsi: periodas (T) – 12s, dažnis (f) -  $0,55\text{s}^{-1}$  (6 balų reguliarus bangavimas).

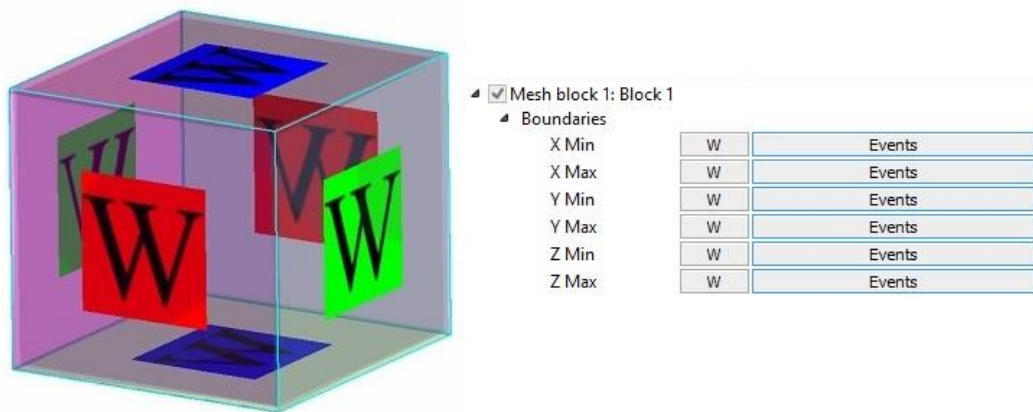
#### **Eksperimento sudarymas teliuškaujamo tanko tyrimui „FLOW 3D“ programoje:**

1. Naujos direktorijos sukūrimas skaičiavimo duomenims saugoti: *Simulation manager – File -Add Example - Shaking Sphere*.
2. Sukuriame tinklelio bloką (*Mesh block 1*). Tinklelio blokas – simuliacinė skysčio srauto erdvė, kuri patalpinta tanke. Pasirenkame: *Model setup - Meshing & Geometry - Mesh Operations* ir įvedame tinklelio (tanko) gabaritų koordinates, taip, kad centras būtų (0:0:0) (15 pav.) Nustatomas tinklelio dydis „*Size of Cells*“ =  $0.25\text{m}$ . Nuo pasirinkto tinklelio dydžio priklauso skaičiavimų rezultatų tikslumas ir patikimumas.



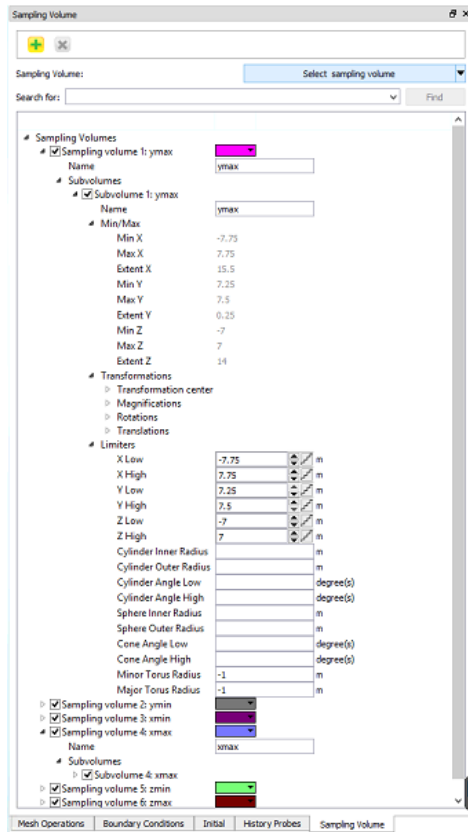
15 pav. Įvestį tinklelio (tanko) gabaritai

3. *Model setup - Meshing & Geometry - Mesh condition* – Pasirenkame, kad visos sienelės būtų „Wall“ (16 pav.).



16 pav. Sukuriamos „Wall“ sienos

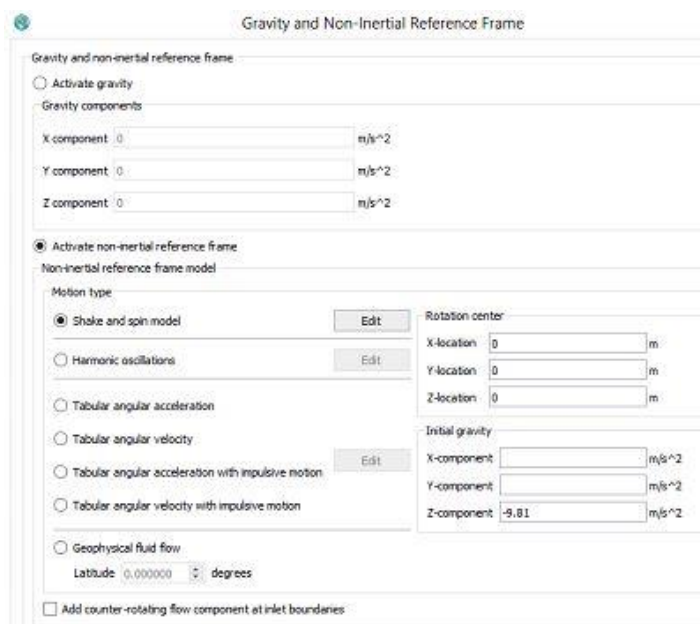
4. Užduodame vandens užpildymo lygmenį – 10 metrų (nuo tanko dugno).
5. *Model setup - Meshing & Geometry - Sampling volume* Sukuriamos visos tokios sienos - tai mėginių ėmimo vietas. Iš kiekvienos sienos bus galima paimti duomenis, kokios jėgos veikia konkrečią sieną. Kitų sienų nustatymai įvedami analogiškai (17 pav.).



17 pav. „Sampling volume“ sienų sukūrimas.

6. Programoje užduodami fizikos dėsniai „Physics“, kurie būdingi atliekamo eksperimento specifikai: (18 pav.)

- „Gravity and non-inertial reference frame“ – simuliacijos procese bus įvertinamas skysčio judėjimas z ašimi, laisvojo kritimo pagreitis  $9,81 \text{ m/s}^2$ ;
- Aktivavome „Non-inertial reference frame“ – „Shake and spin model“:



18 pav. Pasirenkamas skaičiavimo tipas

Bus atliekami du bandymai, pakeičiant kampinį greitį:

1 bandymas – 0,55 rad/s;

2 bandymas – 0,85 rad/s.

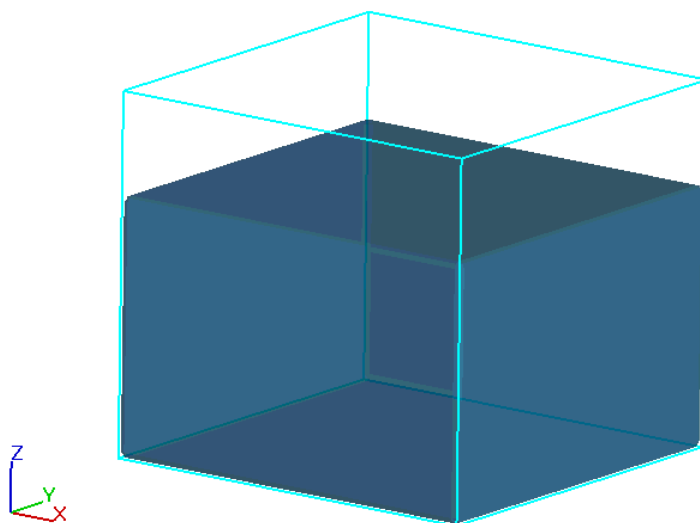
7. Nustatomi pagrindiniai eksperimento parametrai *General*.

- Virtualią eksperimento trukmę (*Finish time*) – 36s. Toks laiko intervalas yra pakankamas norint gauti tikslius rezultatus, nes į šį intervalą tilps 3 bangų periodai (po 12s).
- Vietinį skystį (vanduo 20°C), kuris bus patalpintas tanko viduje. Dydžių matavimo sistema – SI.

8. Nustatome pradinį laiko žingsnį simuliacijos metu: *Numerics – Time step size = 0.03*.

9. Atliekama veiksmų seka vizualiam simuliacijos vaizdui pamatyti: *Favor – Render*.

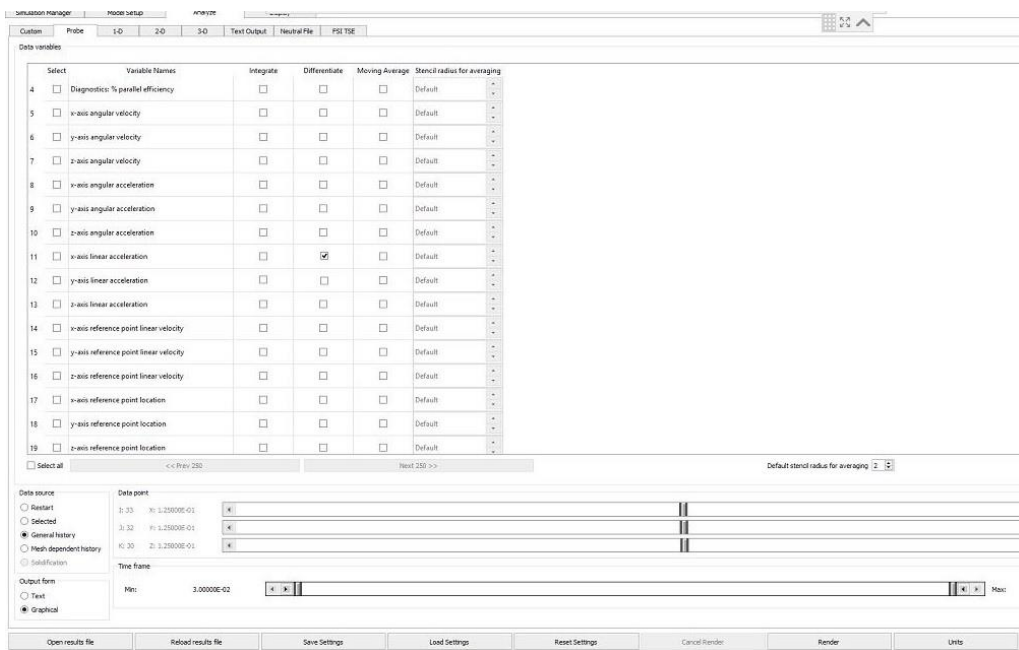
Vizuali atliekamos simuliacijos erdvė pateikiama 19 pav.



19 pav. Vizualus simuliacinis tankas

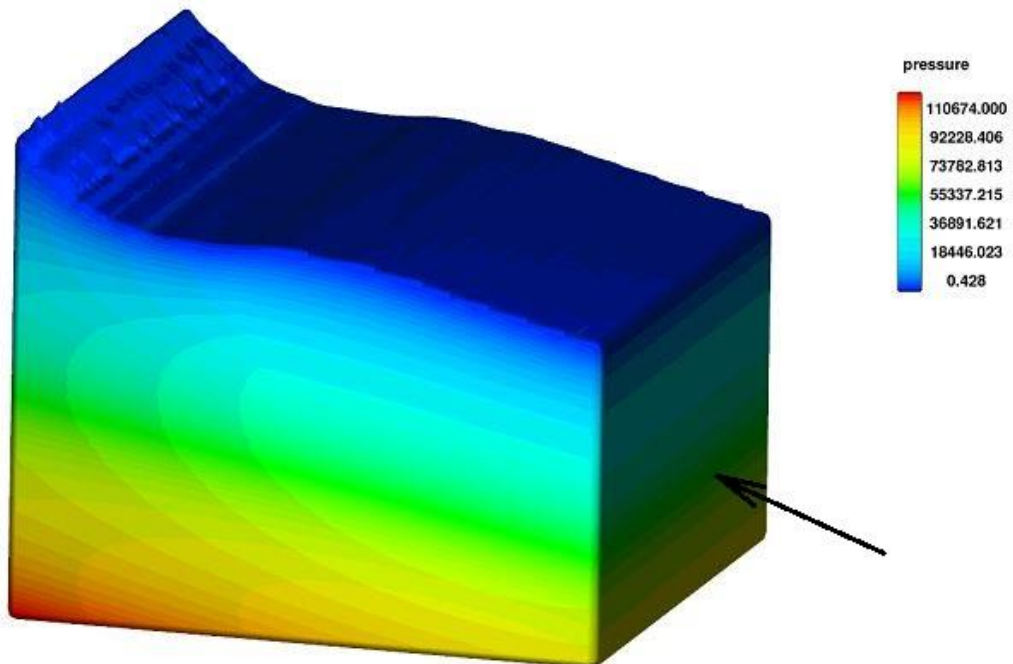
10. Simuliacijai pradėti atliekama veiksmų seka: *Simulate – Run Simulation*. Prasidėjus simuliacijai tankas pradeda nustatytu dažniu svyruoti apie supimosi centrą.

11. Baigus simuliaciją rezultatų duomenys išgaunami skiltyje *Analyze - Probe*, nustačius *Data source – General history ; Output files – Text / Graphical* ir pasirinkus norimus gauti rezultatus pateiktame sąraše (pasirenkame: *11-differentiate of x axis linear acceleration; 86-x fluid force; 88- z fluid force*). Paspaudus mygtuką *Render* apatinėje užduočių juostoje bus sugeneruoti duomenys, pagal nustatytus kriterijus ir forma. Pavyzdys pavaizduotas 20 paveiksle



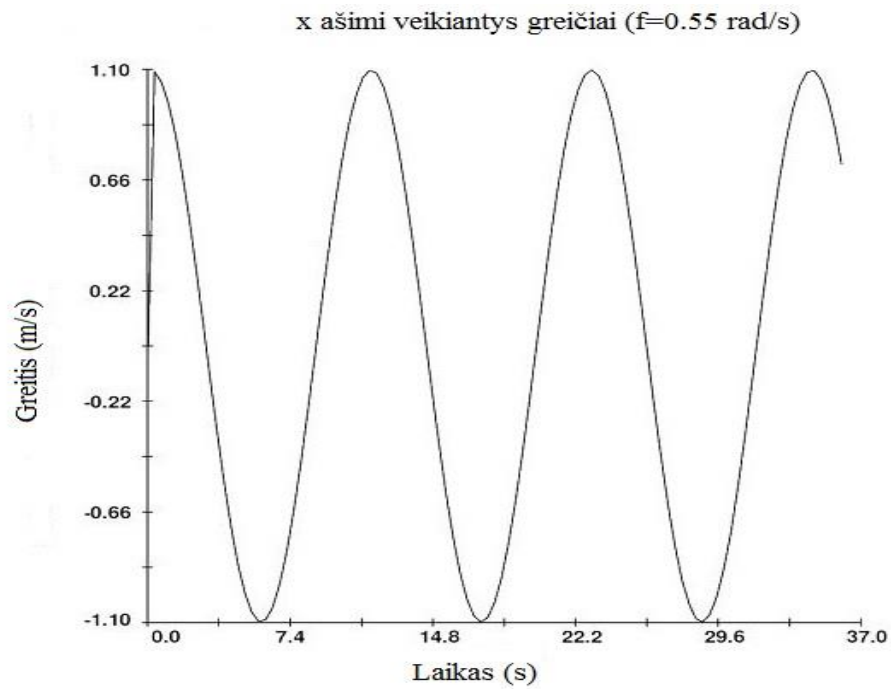
20 pav. Duomenų rezultatų ištraukimas

21 pav. nurodyta tanko siena, iš kurios imami duomenys naudojami grafikams sudaryti. Šiame paveiksle, užfiksuotu laiko momentu, nuo nurodytos sienos banga yra atsitraukusi.



21 pav. Nurodyta nagrinėjama siena, teliuškavimosi nėra (šiuo momentu patiriamos jėgos mažiausios)

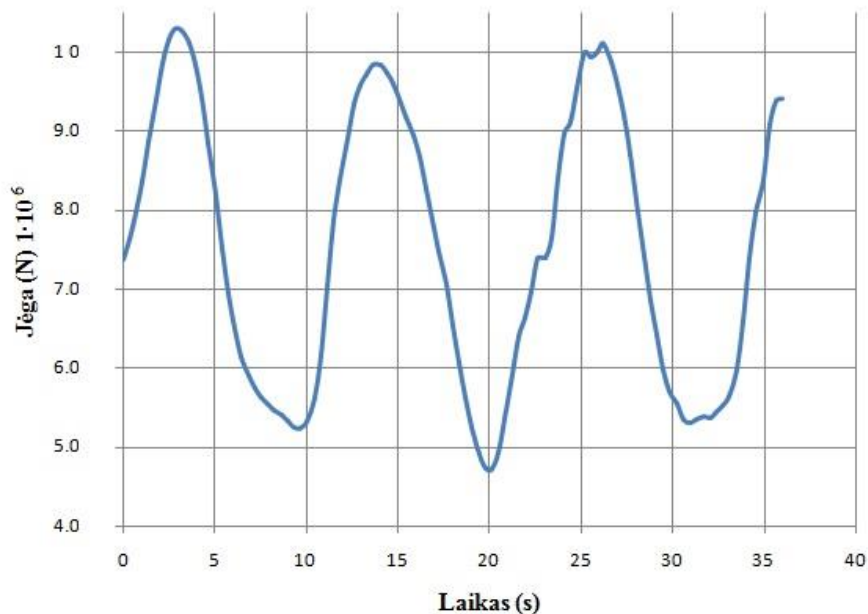
22 pav. pavaizduota, kaip kinta greitis laiko atžvilgiu, kai  $f=0.55$  rad/s. Prieš atsimušant į sieną skystis pasiekia 1,1m/s greitį.



22 pav. x ašimi veikiantys greičiai ( $f=0.55 \text{ rad/s}$ )

Grafikuose (23 ir 24 pav.) horizontalioji ašis – tyrimo laikas, o vertikali – veikianti jėga nurodyta ašimi (x arba z). Visi duomenys imami iš vienos sienos – sienos į kurią atsitrenkia banga (x ašimi veikianti banga). Šią sieną veikia didžiausios jėgos, todėl aktualiausia ją ir nagrinėti.

**x ašimi veikianti jėga ( $f=0.55 \text{ rad/s}$ )**



23 pav. x ašimi veikianti jėga ( $f=0.55 \text{ rad/s}$ )

23 pav. bandiniai imami iš x sienos, ir fiksuojami x ašimi. Matome, kad jėga atsiranda iškart nuo 0 s, nes taip užduota sąlyga (realybėje taip nebūna). Svyravimai toliau vyksta neslopstančiai, todėl nėra jokio tikslo nagrinėti tolimesnius pasikartojančius periodus. Grafike pavaizduoti aukščiausi taškai ( $10,03 \cdot 10^6 \text{ N}$ ) – tai momentai, kai banga atsimuša į pasirinktą tanko sienelę. Kai grafike

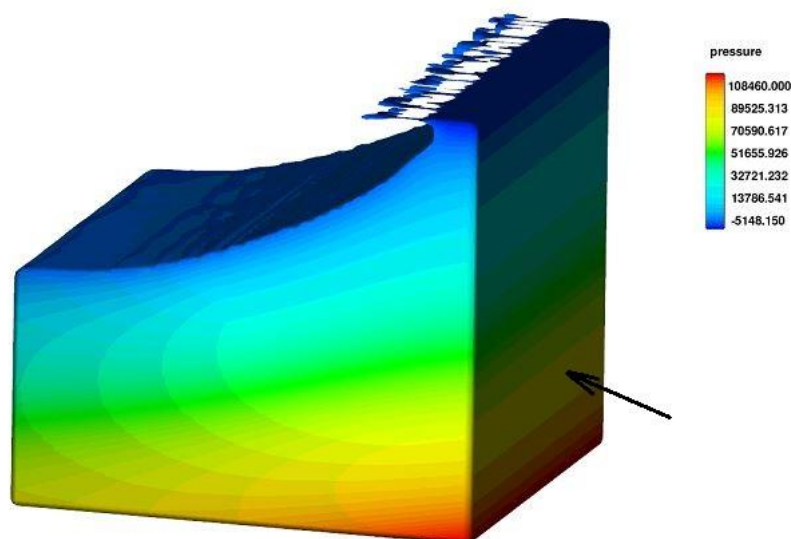
reikšmės pradeda mažėti – reiškiasi banga atsitraukia nuo mūsų pasirinktos sienos. Identiškas grafikas būtų, jei nagrinėtume priešais esančią sieną, tik reikšmės būtų neigiamos.



24 pav. z ašimi veikianti jėga (f=0.55 rad/s)

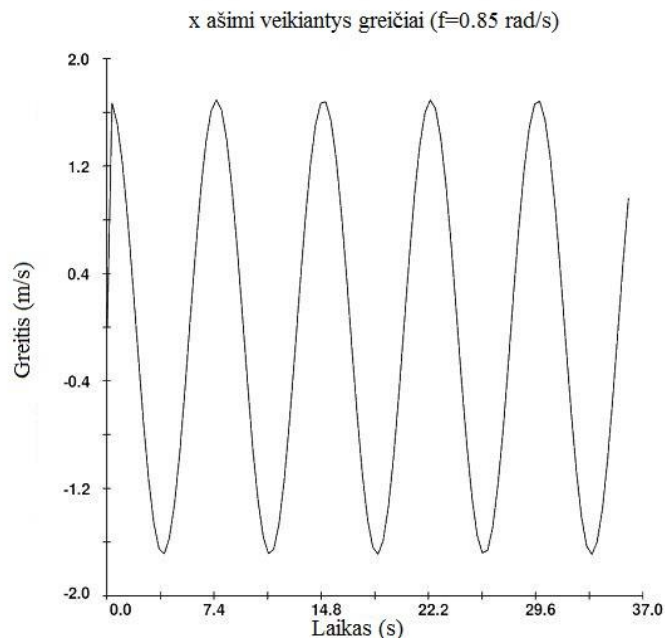
24 pav. bandiniai imami iš x sienos, bet jau fiksuojami z ašimi. Pasiekiami iki  $4,25 \cdot 10^5$  N dydžio jėga. Iš grafiko matome, kad ties 26s, banga pasiekia viršutinę sieną, ir atitinkamai jėga veikianti analizuojamą sieną šiek tiek sumažėja.

Toliau atlikta 2 simuliacija. Pateikti gauti duomenys, kai kampinis greitis  $f=0.85$  rad/s (žiūrėti 1 priedas).

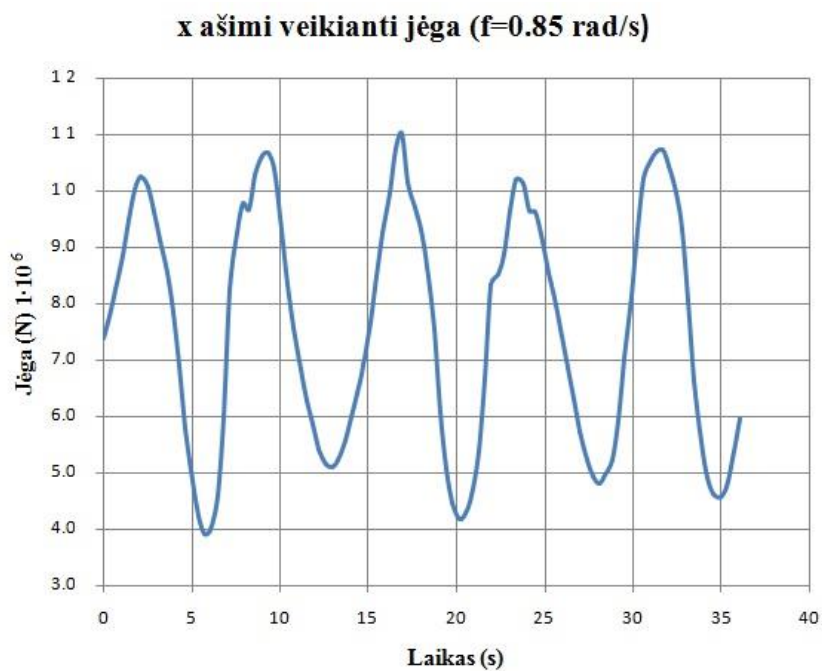


25 pav. Nurodyta nagrinėjama siena, vyksta teliuškavimasis (šiuo momentu patiriamos jėgos didžiausios)

26 pav. pavaizduota, kaip kinta greitis laiko atžvilgiu, kai  $f=0.85$  rad/s. Prieš atsimušant į sieną skystis pasiekia 1,75m/s greitį. Galime pastebėti, kad greitis didesnis nei tankui supantis  $f=0.55$  rad/s.

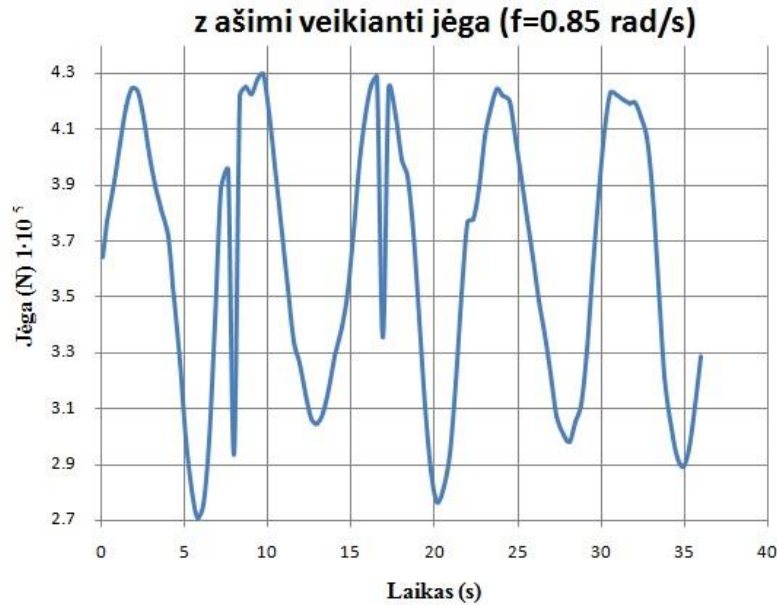


26 pav. x ašimi veikiantys greičiai ( $f=0.85 \text{ rad/s}$ )



27 pav. x ašimi veikianti jėga ( $f=0.85 \text{ rad/s}$ )

27 pav. bandiniai imami iš x sienos, bet fiksuojami z ašimi. Grafike pavaizduoti aukščiausi taškai  $11,1 \cdot 10^6 \text{ N}$  – tada banga atsimuša į pasirinktą tanko sienelę. Kai grafike reikšmės pradeda mažėti – reiškiasi banga atsitraukia nuo mūsų pasirinktos sienos. Identiškas grafikas būtų, jei nagrinėtume priešais esančią sieną, tik reikšmės būtų neigiamos. Grafikas (27 pav.) pasiekia aukštesnes reikšmes nei grafike (23 pav.), taip pat ir amplitudė šiame grafike yra didesnė.



28 pav. z ašimi veikianti jėga ( $f=0.85 \text{ rad/s}$ )

28 pav. bandiniai imami iš x sienos, bet jau fiksuojami z ašimi. Pasiikiama iki  $4,3 \cdot 10^5 \text{ N}$  dydžio jėga. Iš grafiko matome, kad bangavimas nebėra reguliarus. Amplitudė didesnė nei 24 pav., tai reiškia, kad kur didesnė amplitudė, ten jaučiamos didesnės veikiamos jėgos. Sukuriamas teliuškavimosi reiškinys.

### Išvados

Atlikus analizę, kai tankas nesiteliuškuoja ir kai teliuškujais, galime palyginti gautus rezultatus (1 lentelė):

1 lentelė

	$f=0.55 \text{ rad/s}$	$f=0.85 \text{ rad/s}$
Greitis (m/s)	-1,1 - 1,1	-1,75 - 1,75
X ašimi veikianti jėga (N)	$4,7 - 10,3 \cdot 10^6$	$3,9 - 11,1 \cdot 10^6$
z ašimi veikianti jėga (N)	$2,85 - 4,25 \cdot 10^5$	$2,7 - 4,3 \cdot 10^5$

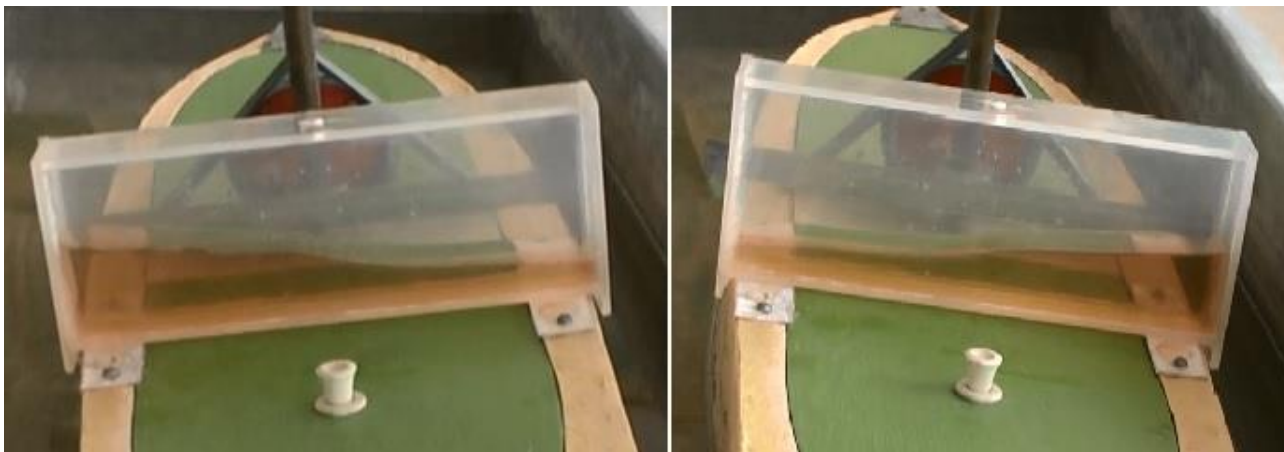
Matome, kad kai tankas teliuškujasi ( $f=0.85 \text{ rad/s}$ ), gaunamos didesnės greičio ir veikiančių jėgų-apkrovų reikšmės, taip pat susidaro ir didesnės skirtumų amplitudės. Gauti duomenys gali pagelbėti ateityje skaičiuojant koroziją tanke.

## 4. Fizinis eksperimentas

Eksperimentas – tiriamo reiškinio stebėjimas siekiant atrasti nežinomų savybių, nustatyti dėsnius bei patvirtinti ar paneigti hipotezes. Eksperimentas yra mokslinio metodo dalis. Eksperimento metu dažniausiai stebima, kaip kintančios sąlygos (dažniausiai tik viena) daro įtaką reiškinio eigai ar stebimam rezultatui. Visų kitų potencialiai rezultatą paveikti galinčių veiksnių siekiama nekeisti.

Atliktas laboratorinis eksperimentas, kurio sąlygos sukurtos dirbtinai. Klaipėdos universitete, Jūros technologijų ir gamtos mokslų fakultete, laivo teorijos laboratorijoje, buvo atliekamas fizinis eksperimentas. Bandymų stende ant laivo MŽTG „Baltika“ modelio (pagrindiniai laivo modelio matmenys:  $L= 1020 \text{ mm}$ ;  $B= 272 \text{ mm}$ ;  $D= 180 \text{ mm}$ .) buvo uždėtas stiklinis tankas (tokio pat pločio kaip laivas), baseino gylis  $208 \text{ mm}$ . Vandens temperatūra  $19 \text{ }^\circ\text{C}$ , vandens tankis  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ .

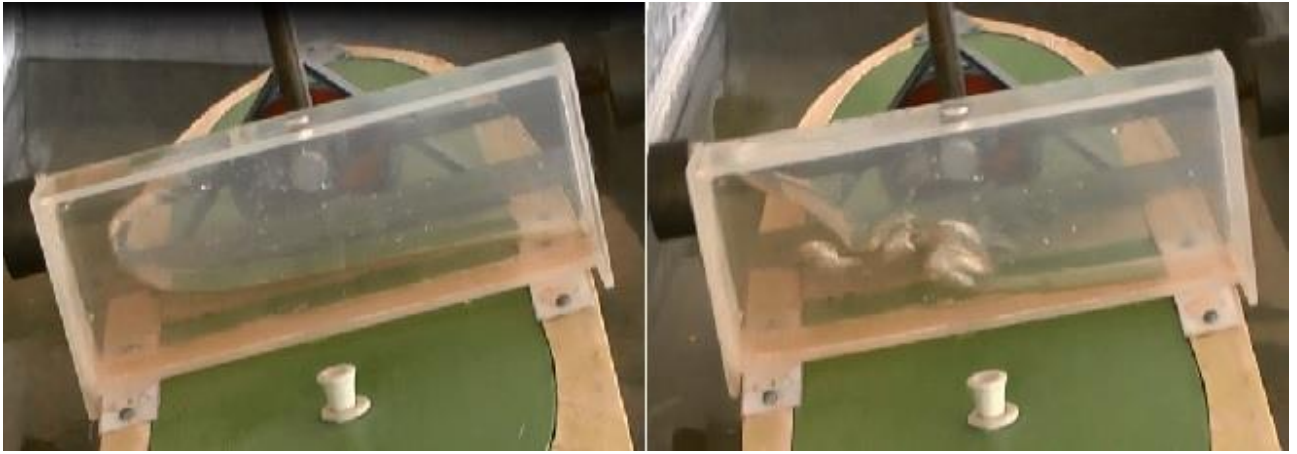
Tankas pripildomas vandeniu apie 50 %. Žmogaus pagalba išjudinamas tankas ir paleidžiamas – sukuriama slopstantys svyravimai, kurių amplitudė laikui bėgant mažėja.



29 pav. Fizinio eksperimento metu tanke sukurtas ilgo periodo palyginus su laivo modelio nuosavų svyravimų periodu bangavimas

Kai laivo modeliui buvo sukurtas nesmarkus bortinis supimasis (29 pav.), matome, kad skystis esantis tanke nepatiria didelių greičių, bangos nelūžta. Nestipriai supantis skystis nepasiekia viršutinės sienelės.

Laivo modeliui sukūrus apie 2 kartus stipresnį bortinį supimasi (30 pav.), pastebime, kad bangos greitis taip pat išauga, priklausomai nuo svyravimų dažnio. Bangos lūžta ir pasiekia viršutinę sienelę, ko pasekoje atsiranda vandens purslai.



30 pav. Fizinio eksperimento metu tanke sukurtas teliuškavimosi reiškinys, esant trumpo periodo palyginus su laivo modelio nuosavų svyravimų periodu bangoms

Fizinio eksperimento tikslas – vizualiai sulygtinti atliktą simuliaciją su fiziškai atliekamu eksperimentu. Nors iš šio bandymo nebuvo galima paimti jokių tikslių duomenų, buvo susipažinta iš arčiau kaip tai vyksta.

## 5. Tyrimo analizė

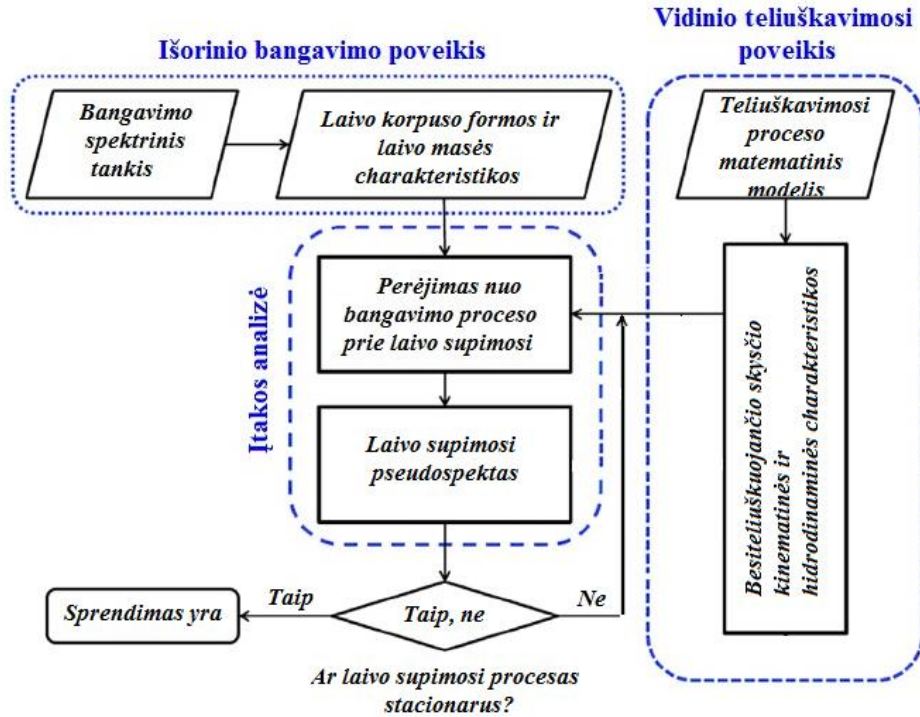
Atlikto tyrimo tikslas buvo nustatyti skysčių teliuškavimosi metu laivo talpose (tankuose, cisternose ir kitose talpose) šių skysčių judėjimo greičius, pagreičius bei atsirandančias jėgas. Žinant besiteliuškujančių skysčių kinematinės bei hidrodinaminės charakteristikas galima įvertinti teliuškavimosi poveikį laivo jūrinėms ir eksploatacinėms savybėms, korpusinių konstrukcijų tvirtumui ir ilgaamžiškumui bei spręsti kitus uždavinius (pvz. balastinių vandenų biologinių teršalų pokyčius reiso metu).

Teliuškavimasis SGD tanklaiviuose lėmė, kad būtų užtikrinta projektavimo sauga, kadangi susidaro dideli pagreičiai ir apkrovos neužpildytuose tankuose. Dėl dinaminių teliuškavimosi bangų laivai gali patirti svarbias vidines jėgas, tada kai krovinyje tanke sudaro papildomas apkrovas izoliacijai ir laikančiajai konstrukcijai. Flow-3D programos “non-inertial reference frame” modelis leidžia nustatyti sudėtingus judėjimo parametrus, siekiant tiksliai stebėti skysčio judėjimus talpoje. Flow-3D tiksliai prognozuoja skysčio ir kuro judėjimą tankuose [11].

Supimasis ir teliuškavimasis vienas su kitu susieti procesai. Teliuškavimasis prasideda tik vykstant laivo supimuisi. Prasidėjęs teliuškavimasis keičia laivo supimosi intensyvumą (gali arba suaktyvinti, arba slopinti). Uždavinys sprendžiamas nuoseklaus priartėjimo arba iteracijų metodu.

Ciklas kartojamas tol, kol procesas stabilizuojasi. Supimosi intensyvumo skaičiavimo metodikos jau yra sukurtos, belieka įjungti į šią dinaminę sistemą tik teliuškavimosi procesą:

Teliuškavimosi proceso tyrimo algoritmas pateiktas 31 pav.



31 pav. Teliuškavimosi proceso matematinio tyrimo algoritmas

Skysčio teliuškavimąsi sukelia laivo supimasis. Taigi teliuškavimosi proceso matematinio tyrimo algoritmą realizuojame pradžioje taikydami analizės (mokslinis metodas, pagrįstas mintiniu ir faktiniu skaidymu į dalis ir tų dalių nagrinėjimu) metodą, vėliau – sintezės (įvairių elementų, objekto dalių jungimas į visumą). Laivo supimasis esant bangavimui aprašomas antros eilės tiesinėmis nehomogeninėmis lygtimis [6], [35]:

$$\left(\frac{\Delta}{g} + \lambda_{33}\right) \ddot{\zeta} + 2N_{\zeta} \dot{\zeta} + \rho g S \zeta = \kappa_{\zeta} r_0 \left[ (\rho g S - \lambda_{33} \sigma^2) \cos \sigma t - 2N_{\zeta} \sigma \sin \sigma t \right]; \quad (24)$$

$$(I_{xx} + \lambda_{44}) \ddot{\theta} + 2N_{\theta} \dot{\theta} + \Delta h \theta = \kappa_{\theta} \alpha_0 \left[ (\Delta h_0 - \lambda_{44} \sigma^2) \sin \sigma t + 2N_{\theta} \sigma \cos \sigma t \right]. \quad (25)$$

Bortinio supimosi atveju po lygties pertvarkymo gauname:

$$\ddot{\theta} + 2\nu_{\theta} \dot{\theta} + n_{\theta}^2 \theta = \kappa_{\theta} \alpha_0 \sqrt{\left(n_{\theta}^2 - \frac{k_{\theta} \sigma^2}{1 + k_{\theta}}\right)^2 + 4\nu_{\theta}^2 \sigma^2} \sin(\sigma t + \beta_{\theta}). \quad (26)$$

čia  $\theta$  – kreno kampas,

$2\nu_{\theta}$  – dempferavimo koeficientas,

$n_{\theta}$  – laivo nuosavų svyravimų dažnis,

$\kappa_{\theta}$  – redukcinis koeficientas,

$k_{\theta}$  – santykinė virtuali masė,

$\sigma$  – bangos dažnis,

$t$  – laikas,

$\beta_\theta$  – fazės kampas.

Bendruoju atveju lygties (26) sprendinys užrašomas taip:

$$y = e^{-\nu_\theta t} (C_1 \cos \omega_\theta t + C_2 \sin \omega_\theta t) + y_1, \quad (27)$$

čia  $C_1, C_2$  – integravimo konstantos,

$y_1$  – dalinis lygties sprendinys.

Vykstant laivo bortiniam ir vertikaliajam supimuisi, besisupančiame laive esančias mases veikia tokios jėgos [6] (31 pav.):

$$P_y = P_{kr} \theta_0 \left[ 1 - \frac{\sigma^2 (z_{kr} - z_g)}{g} \right] \sin(\sigma t + \beta_\theta - \gamma_\theta) - P_{kr} \theta_0^2 \frac{\sigma^2 y_{kr}}{g} \cos^2(\sigma t + \beta_\theta - \gamma_\theta) - P_{kr} \theta_0 \zeta_0 \frac{\sigma^2}{g} \cdot \sin(\sigma t + \beta_\theta - \gamma_\theta) \cos(\sigma t + \beta_\zeta - \gamma_\zeta); \quad (28)$$

$$P_z = P_{kr} - P_{kr} \theta_0 \frac{\sigma^2 y_{kr}}{g} \sin(\sigma t + \beta_\theta - \gamma_\theta) + P_{kr} \theta_0^2 \cdot \frac{\sigma^2 (z_{kr} - z_g)}{g} \cos^2(\sigma t + \beta_\theta - \gamma_\theta) - P_{kr} \zeta_0 \frac{\sigma^2}{g} \cos(\sigma t + \beta_\zeta - \gamma_\zeta), \quad (29)$$

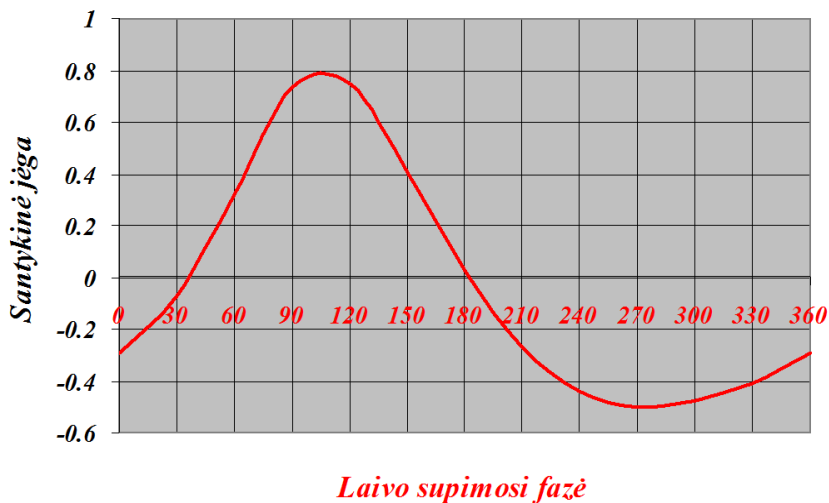
čia:  $P_{kr}$  – skysto arba kieto krovinio svoris,

$y_{kr}, z_{kr}$  – skysto arba kieto krovinio svorio centro koordinatės,

$z_{kr}$  – laivo svorio centro aplikatė,

$\theta_0, \zeta_0$  – supimosi amplitudės,

$\beta, \gamma$  – fazių kampai.



32 pav. Besisupančiame laive esančią masę veikianti santykinė jėga

Laivo supimasi sukelia bangų poveikio jėga, o jei vyksta laive esančio skysčio teliuškavimasis – atsiranda papildomos laivą veikiančios jėgos, kurios turi įtakos supimosi intensyvumui. Bendroju atveju vykstant laivo bortiniam supimuisi nuo besiteliuškujančio skysčio laivą veikia papildomas momentas  $M_{slosh}$ :

$$M_{slosh} = f_1(\theta) + f_2(\dot{\theta}) + f_3(\ddot{\theta}), \quad (30)$$

čia  $f_1(\theta)$ ,  $f_2(\dot{\theta})$ ,  $f_3(\ddot{\theta})$  –  $M_{slosh}$  funkcinės priklausomybės nuo laivo kreno kampo, kampinio greičio ir kampinio pagreičio. Šios priklausomybės nustatomos naudojantis darbe sukurta skaitmeninės skysčių dinamikos (CFD) [16], [17] pagrindu metodika. Skaičiavimai atliekami taikant kompiuterinę programą Flow-3D [11].

Vykstant skysčio teliuškavimuisi besisupančiame laive, laivo bortinio supimosi diferencialinės lygties dešinioji pusė pasipildo besiteliuškujančio skysčio sukeliama momentu  $M_{slosh}$ , kuris turi įtakos laivo supimuisi (31 pav.):

$$\ddot{\theta} + 2\nu_{\theta}\dot{\theta} + n_{\theta}^2\theta = \kappa_{\theta}\alpha_0\sqrt{\left(n_{\theta}^2 - \frac{k_{\theta}\sigma^2}{1+k_{\theta}}\right)^2 + 4\nu_{\theta}^2\sigma^2}\sin(\sigma t + \beta_{\theta}) + M_{slosh} \quad (31)$$

Jūroje dažniausiai susiduriame su nereguliariu bangavimu [34]. Toks bangavimas yra atsitiktinis procesas ir jo matematinis modelis yra spektrinis tankis arba tiesiog bangavimo spektras. Gana dažnai naudojama apibendrinta struktūrinė Barlingo spektro formulė [16]:

$$S_{\zeta}(\sigma) = A\sigma^{-k}\exp(-B\sigma^{-n}), \quad (32)$$

čia  $A$ ,  $B$ ,  $k$ ,  $n$  – spektro parametrai, priklausantys nuo bangų susidarymo ir plitimo sąlygų.

Pagrindinė šiuolaikinės laivo supimosi teorijos prielaida yra ta, kad besisupančio laivo judėjimas esant nereguliariam bangavimui susideda iš atskirų poslinkių (ar posūkių) sumos. Kiekvienas iš šių poslinkių – tai laivo reakcija į kiekvieną reguliarią bangavimo dedamąją.

Nereguliarus jūrinis bangavimas, nagrinėjant laivo supimasi, laikomas stacionariu atsitiktiniu procesu. Jo paveiktas laivas atlieka kažkokius svyravimus, kurie bus nusakomi atsitiktine stacionaria funkcija  $Y(t)$ , pats supimasis yra atsitiktinis stacionarus procesas. Laivas čia atlieka *stacionarios tiesinės dinaminės sistemos* vaidmenį.

Bet kuris iš laivo supimosi tipų  $u(t)$  – tai bangavimo poveikio į laivą rezultatas ir gali būti laikomas dinaminės sistemos išėjimo procesu. Į šios sistemos įėjimą yra paduodamas stacionarus atsitiktinis procesas – bangavimas. Iš atsitiktinių funkcijų teorijos žinome, kad jei linijinės sistemos su pastoviais parametrais, dirbančios be galo ilgai, įėjimo procesas  $x(t)$  yra stacionarus atsitiktinis

procesas, tai šios sistemos išėjimo procesas  $Y(t)$  irgi bus stacionarus. O tokius išėjimo ir įėjimo procesus tarpusavyje surišti galime remiantis Činčino [16], [35] teorema, pagal kurią linijinės dinaminės sistemos išėjimo proceso spektrinis tankis lygus šios sistemos perėjimo funkcijos kvadrato sandaugai iš įėjimo proceso spektrinio tankio:

$$S_u(\sigma) = \Phi_{\zeta u}^2(\sigma) \cdot S_\zeta(\sigma), \quad (33)$$

čia  $S_u(\sigma)$  – laivo supimosi parametro  $u$  spektrinis tankis (tiksliau – pseudospektras);

$\Phi_{\zeta u}(\sigma)$  – perėjimo funkcija nuo bangavimo atsitiktinio parametro  $\zeta$  prie supimosi atsitiktinio parametro  $u$ ;

$S_\zeta(\sigma)$  – bangavimo spektras.

Linijinės dinaminės sistemos perėjimo funkcijos modulis – tai *amplitudinė - dažnuminė supimosi charakteristika*, kuri lygi išėjimo proceso amplitudės santykiui su įėjimo proceso amplitude:

$$|\Phi_{\zeta u}(\sigma)| = \frac{u_0}{\zeta_0}. \quad (34)$$

Be to, pasirodo, kad atsitiktinio proceso  $n$ -tos eilės išvestinės susietos tokiomis priklausomybėmis [6]:

$$S_y(\sigma) = \sigma^{2n} S_u(\sigma); \quad D_y = \int_0^\infty \sigma^{2n} S_u(\sigma) d\sigma, \quad (35)$$

čia  $y$  – laivo supimosi atsitiktinio parametro  $u$   $n$ -jo laipsnio išvestinė;

$S_y(\sigma)$ ,  $S_u(\sigma)$  –  $y$  bei  $u$  parametrų spektrai;

$D_y$  – laivo supimosi  $y$  parametro dispersija.

Tokiu būdu yra realizuojamas skysčio su laisvu paviršiumi teliuškavimosi esant tiek reguliariam, tiek ir nereguliariam bangavimui proceso matematinio tyrimo algoritmas.

Atlikus šį darbą sukurta metodika:

Išanalizuota skysčių teliuškavimosi dalinai užpildytuose tankuose rizika. Rizika kyla: laivo supimosi intensyvumui (gali arba suaktyvinti, arba slopinti), valdomumui, stovumui, išauga korozijos padarinių galimybė. Atlikta mokslinių tyrimų ir eksperimentų apžvalga susijusia tema. Išanalizuotas programos „Flow-3D“ algoritmas - Navjė ir Stokso lygčių sprendimas. Sukurtas simuliacinis modelis – tankas, kuriame teliuškaujasi skystis. Yra galimybė be didelių pastangų keisti tanko gabaritus ir skysčio užpildymo lygį. Gautas kokios apkrovos veikia tanko sienas (yra

galimybė pažiūrėti į konkrečią sieną veikiamų apkrovų dydžius), taip pat gauta, kokie skysčio greičiai ir pagreičiai susidaro skysčiui judant tanke. Jei būtų reikalinga, yra galimybė iš šios programos gauti ir daugiau duomenų. Su turimais skaičiavimais padaryti grafikai ir palyginti kai skystis tanke teliuškujasi ir kai bangavimas ramesnis. Atlikta analizė, kokie skaičiavimai gali būti atlikti su gautais rezultatais.

Darbo rezultatas – tai suformuluota metodika, kuri leis atlikti bet kokios formos ir užpildymo lygio skaičiavimus ir pritaikyti skaičiavimo rezultatus skirtingiems skaičiavimams: stovumo, neskęstamumo, supimosi. Taip pat bus galima įvertinti korozijos intensyvumą, balastinių vandenų valymo efektyvumą.

## Išvados

Atlikus mokslinių darbų literatūros analizę, susijusią su skysčio teliuškavimu dalinai užpildytuose tankuose, galima teigti, kad dauguma tyrimų buvo atlikta SSD pagrindu veikiančiomis skaičiavimo programomis. Tokios programos tampa vis populiarsnės modeliuojant laivų jūrines savybes, kadangi gaunami kokybiški ir arti realybės esantys rezultatai. Išanalizuotos skysčio teliuškavimosi laivo talpose neigiamos pasekmės.

Išanalizuotos skysčio teliuškavimosi vertinimo metodikos (fiziniai eksperimentai, klasikinės hidrodinamikos metodai, matematinio modeliavimo CFD pagrindu metodai).

Išanalizuotas „FLOW 3D“ programos naudojamas RANS (angl. Reynolds avaraged Navier – Stokes simulation) skaičiavimų algoritmas, kurio paskirtis yra skaičiuoti programoje sudarytą skysčio srautą.

Naudojant SSD skaičiavimo programą „FLOW 3D“ buvo sukurtas tankas, kuris dalinai užpildytas vandeniu. Jam sukurtos supimosi sąlygos. Detaliai analizuojami du bangavimo tipai - bangavimas be lūžtančių bangų ( $f=0.55$  rad/s) ir teliuškavimasis (su lūžtančiomis bangomis  $f=0.85$  rad/s). Gauti rezultatai:

	$f=0.55$ rad/s	$f=0.85$ rad/s
Greitis (m/s)	-1,1 - 1,1	-1,75 - 1,75
x ašimi veikianti jėga (N)	$4,7 - 10,3 \cdot 10^6$	$3,9 - 11,1 \cdot 10^6$
z ašimi veikianti jėga (N)	$2,85 - 4,25 \cdot 10^5$	$2,7 - 4,3 \cdot 10^5$

Kai tankas teliuškaujasi ( $f=0.85$  rad/s), gaunamos didesnės greičio ir veikiančių jėgų apkrovų reikšmės, taip pat susidaro ir didesnės skirtumų amplitudės. Galima teigti, kad teliuškavimasis tikrai nėra palanki aplinkybė laivo stovumui, dėl susidarančių palyginamai didesnių apkrovų. Atliktas fizinis bandymas laboratorijoje, vizualiai sulyginta atlikta simuliacija su fiziškai atliekamu eksperimentu.

Prie supimosi intensyvumo skaičiavimo metodikos, prijungtas teliuškavimosi procesas. Darbo rezultatas – tai suformuluota metodika, kuri leis atlikti bet kokios formos ir užpildymo lygio skaičiavimus ir pritaikyti skaičiavimo rezultatus skirtingiems skaičiavimams: stovumo, neskežtamumo, supimosi. Taip pat turint šiuos rezultatus, galima įvertinti korozijos intensyvumą, balastinių vandenų valymo efektyvumą.

## Literatūros sąrašas

1. Amtec Corrosion [interaktyvus], [žiūrėta 2018 m. Gegužės 2d.] Prieiga per internetą:<<http://www.amteccorrosion.co.uk/corrosionresistantship.html>>
2. Bogdevičius M., Prentkovskis O. 2003. Hidraulinių ir pneumatinių sistemų dinamika: vadovėlis universitetų technologijos mokslų srities studentams. Vilniaus Gedimino technikos universitetas. – Vilnius: Technika, 2003. – 261 p.
3. Bulk carrier guide [interaktyvus], [žiūrėta 2018 m. Gegužės 8d.] Prieiga per internetą:<<http://www.bulkcarrierguide.com/risk-of-partially-filled-ballast-tanks.html>>
4. Changdong D. 2015. MODELING AND SIMULATION OF SLOSHING MOTION IN PARTLY FILLED TANK. Aalesund University College
5. Chen Y. G., Price W. G., Temarel P. 2009. Numerical Simulation of Liquid Sloshing in LNG Tanks Using a Compressible Two-Fluid Flow Model
6. Čerka J. 2009. Laivo hidroaeromechanika. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla.
7. Čerka J. Laivo eigumas. 2005. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla.
8. Čerka J. Laivo teorija. 1997. Klaipėda: Klaipėdos universiteto leidykla.
9. Elsevier [interaktyvus], [žiūrėta 2018 m. Gegužės 10d.] Prieiga per <<http://www.journals.elsevier.com/international-journal-of-naval-architecture-and-ocean-engineering/>>
10. Faltinsen O., Rognebakke O. Damping of sloshing due to tank roof impact. Norway: Norwegian University of Science and Technology
11. Flow Science [interaktyvus], [žiūrėta 2018 m. Gegužės 12d.] Prieiga per internetą:<<https://www.flow3d.com/resources/cfd-101/free-surface-fluid-flow>>
12. Hamlin N. A., Log Y. K. Liquid Sloshing in Slack Ship Tanks-Theory, Observations, and Experiments
13. Hu Z., Wang S., Chen G et al. 2016. The effects of LNG-tank sloshing on the global motions of FLNG system. – International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 9 (2017)
14. Kim J. W., Shin Y. S., and Bai K. J. 2002. A Finite-Element Computation for the Sloshing Motion in LNG Tank. Japan: ABS TECHNICAL PAPERS
15. Krata P., Wawrzynski W., Jachowski J., Wieckiewicz W. AN INVESTIGATION INTO THE INFLUENCE OF TANK FILLING LEVEL ON LIQUID SLOSHING EFFECTS ONBOARD SHIPS – STATIC AND DYNAMIC APPROACH

16. Larsson L., Stern F., Visonneau M. Numerical ship hydrodynamics: an assessment of the Gothenburg 2010 workshop / edited by. Dordrecht: Springer Science+Business Media, 2014. IX, 318 p.
17. Molland A. F. The Maritime Engineering Reference Book. – Elsevier, 2008. – 900 p.
18. Molland A. F., Turnock S. R., Hudson D. A. 2013. Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power. Cambridge: Cambridge University Press.
19. Nam B. W., Kim Y., Kim D. W. Nonlinear Effects of Sloshing Flows on Ship Motion. Korea
20. Nam B. W., Kim Y., Kim D. W. Nonlinear Effects of Sloshing Flows on Ship Motion. – [http://www.iwwwfb.org/Abstracts/iwwwfb21/iwwwfb21\\_34.pdf](http://www.iwwwfb.org/Abstracts/iwwwfb21/iwwwfb21_34.pdf)
21. Paulauskas V. Laivo sandara.
22. Port State Control Inspection [interaktyvus], [žiūrėta 2018 m. Gegužės 22d.] Prieiga per internetą:<[http://www.lemshout.net/psc/\\$cthickm.htm](http://www.lemshout.net/psc/$cthickm.htm)>
23. Poškas R., Drumstas G., Poškas P., Bartkus G. 2010. Mišrios konvekcijos esant priešingų krypčių tėkmėms ir oro tankio stratifikacijos sąveikos skaitinis modeliavimas plokščiame kanale. – Lietuvos mokslų akademijos leidykla: Energetika. 2010. T. 56. Nr. 3–4. P. 267–278]
24. Robert L. Bass, E. B. Bowles and P. A. Cox. Liquid Dynamic Loads in LNG Cargo Tanks
25. Rognebakke O. F., Faltinsen O. M. Effect of Sloshing on Ship Motions. – [http://www.iwwwfb.org/Abstracts/iwwwfb16/iwwwfb16\\_35.pdf](http://www.iwwwfb.org/Abstracts/iwwwfb16/iwwwfb16_35.pdf)
26. Stern F., Yang J., Wang Z., Sadat-Hosseini H., Mousaviraad M. 2013. Computational ship hydrodynamics: Nowadays and way forward. – International Shipbuilding Progress 60 (2013) 3–105 3 DOI 10.3233/ISP-130090
27. Stonkus. Laivo sandara.
28. Zhao D., Hu Z., Chen G., Lim S., Wang S. 2017. Nonlinear sloshing in rectangular tanks under forced excitation. China: International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering
29. Блинов Э.К., Розенберг Г.Ш. Определение технического состояния корпусов морских судов, Техническое обслуживание и ремонт судов по состоянию: Справочник судостроения ,1992.
30. Зубкова А. А., 1986. Определение сил, действующих на стенки частично заполненных жидкостью отсеков различных геометрических форм. – Перспективные типы морских транспортных судов Ленинград: Транспорт: ЦНИИМФ.
31. Ремез Ю. В. Качка корабля. – Ленинград: Судостроение, 1983.
32. Телянер Б. Е., Турмов Г. П., Финкель Г. Н. Технология ремонта корпуса судна. Судостроение. Ленинград, 1984.
33. Шмырев А. Н., 1961. Успокоители качки судов: А.Н. Шмырев, В.А. Мореншильдт, С.Г. Ильина. – Ленинград: Гос. союзное изд-во судостроительной пром-сти.

34. Луговский В.В. Динамика моря. – Ленинград: Судостроение, 1976
35. Холодилин А. Н. Мореходность и стабилизация судов на волнении: справочник / А. Н. Холодилин, А. Н. Шмырев. Ленинград : Судостроение, 1976.

## Priedai

Priedas Nr. 1. Iš programos Flow-3D gauti duomenys

f=0.55 rad/s				f=0.58 rad/s			
laikas	x ašimi	z ašimi	pagreitis	laikas	x ašimi	z ašimi	pagreitis
s	N	N	m/s <sup>2</sup>	s	N	N	m/s <sup>2</sup>
0.03	7375948.5	363885.5	0	0.03	7386026.5	364218.25	0.00
0.37	7642905	372510.91	0.40	0.37	7795936.5	377464.25	0.62
0.73	7968785.5	382012.38	0.78	0.73	8272074.5	391231.12	1.16
1.09	8365003	391834.03	1.13	1.09	8858960	405232.5	1.60
1.45	8860996	402688.19	1.43	1.45	9503481	417883.38	1.89
1.81	9393980	412705.75	1.68	1.81	10022525	424818.03	2.00
2.17	9849980	419674.72	1.86	2.17	10252371	423671.12	1.93
2.53	10157558	423012.28	1.97	2.53	10085565	414207.56	1.67
2.89	10296185	422918.09	2.00	2.89	9632957	400873.34	1.27
3.25	10276238	421059.91	1.95	3.25	9124227	389856.38	0.74
3.61	10121777	418331.81	1.83	3.61	8565125	381314.84	0.15
3.97	9837558	414463.47	1.64	3.97	7835195	371587.66	-0.46
4.33	9412235	408517.47	1.38	4.31	6889853.5	353550.06	-1.00
4.69	8855116	399475.91	1.07	4.67	5796471	326543.53	-1.47
5.05	8185784	385867.72	0.71	5.04	4861817	299199.44	-1.82
5.41	7511807	370342.47	0.33	5.40	4239020	280579.56	-1.99
5.77	6936278	355795.62	-0.06	5.75	3927510	270710.62	-1.97
6.13	6494797.5	344270.94	-0.45	6.11	3999588.5	275408.84	-1.77
6.49	6154671.5	334437.72	-0.83	6.48	4620897	298918.19	-1.40
6.85	5916298	326982.66	-1.17	6.84	6026975.5	341446.19	-0.90
7.21	5748919.5	321209.47	-1.47	7.20	8271682.5	388487	-0.33
7.57	5637197	317038.41	-1.71	7.56	9260155	395208.38	0.29
7.93	5551442.5	313653.56	-1.88	7.92	9779753	293759.06	0.87
8.29	5477509.5	311045.16	-1.98	8.28	9683342	421903.03	1.37
8.65	5403547.5	309058.5	-2.00	8.63	10291828	425055.69	1.74
9.01	5331937.5	307845.12	-1.94	8.99	10641638	422659.66	1.96
9.37	5262230.5	307234.78	-1.81	9.36	10686936	427913.31	1.99
9.73	5248728.5	308823.78	-1.61	9.72	10392452	429824.97	1.83
10.09	5323375	313092.69	-1.34	10.08	9306353	415779.84	1.51
10.45	5620713	323258.34	-1.02	10.44	8348556	396536.31	1.04
10.81	6172672	338498.19	-0.66	10.80	7590931.5	372792.81	0.48
11.17	7041399.5	358298.72	-0.28	11.16	6843561.5	352613.94	-0.12
11.53	7868909	373208.12	0.11	11.52	6285330	334065.62	-0.72
11.89	8395220	382657.09	0.50	11.88	5871253	326059.16	-1.25
12.25	8898932	392173.75	0.88	12.25	5431540	315147.44	-1.66
12.61	9333377	401951.06	1.21	12.59	5161382	306542.69	-1.92
12.97	9584882	409623.78	1.50	12.96	5114419.5	304714.81	-2.00
13.33	9720387	415224.34	1.73	13.31	5244620	308231.78	-1.90

f=0.55 rad/s				f=0.58 rad/s			
laikas	x ašimi	z ašimi	pagreitis	laikas	x ašimi	z ašimi	pagreitis
s	N	N	m/s <sup>2</sup>	s	N	N	m/s <sup>2</sup>
13.69	9835411	419790.16	1.89	13.68	5589390.5	317210.16	-1.61
14.05	9833295	421227.22	1.98	14.04	6002548.5	328666.47	-1.18
14.41	9741788	419805.44	2.00	14.40	6424119.5	339073.25	-0.64
14.77	9609507	417073.12	1.93	14.77	6909813	352034.56	-0.03
15.13	9406336	412025.38	1.79	15.11	7680613.5	373715.44	0.55
15.49	9179187	406435.94	1.58	15.47	8513441	397920.28	1.11
15.85	8937800	400477.16	1.30	15.84	9274541	414589.28	1.56
16.21	8660334	393359.19	0.98	16.20	9986426	425581.69	1.86
16.57	8269753	382971.38	0.62	16.56	10760795	428469.59	2.00
16.93	7882688.5	373105.03	0.23	16.92	11033327	335701.66	1.94
17.29	7477919	363649.88	-0.17	17.28	10157327	424524.69	1.70
17.65	7049607.5	353851.5	-0.55	17.64	9710745	414135.34	1.31
18.00	6540529	341130.66	-0.92	18.00	9305430	399291.28	0.79
18.36	6063562.5	329219.97	-1.25	18.36	8658055	392791.44	0.20
18.72	5628088.5	318262.22	-1.53	18.72	7546369.5	372629.31	-0.41
19.08	5250954.5	308668.09	-1.75	19.08	6074762	341649.28	-0.98
19.44	4907043.5	298696.38	-1.91	19.44	5079713.5	310785.03	-1.45
19.80	4743006	294750.5	-1.99	19.80	4487530	287777.97	-1.80
20.16	4734723	295174.16	-1.99	20.16	4184955.8	276465.5	-1.98
20.52	4942470	301557.69	-1.92	20.52	4280461	280522.34	-1.97
20.88	5365027	312308.59	-1.77	20.88	4618373.5	294028.75	-1.78
21.24	5936042.5	324958.28	-1.55	21.24	5385214	319462.12	-1.43
21.60	6407017.5	332962.66	-1.27	21.60	6698802.5	350994.03	-0.94
21.96	6645035.5	338163.44	-0.94	21.96	8349775.5	376661.44	-0.37
22.32	6978831.5	349015.31	-0.57	22.32	8529120	377958.88	0.25
22.68	7389250	363249.03	-0.19	22.68	8894368	389031.62	0.83
23.04	7401664.5	368050.03	0.21	23.04	9664159	407477	1.34
23.40	7645755	376132.78	0.60	23.40	10208910	417298.62	1.73
23.76	8408505	392427.31	0.96	23.76	10143920	424395.94	1.95
24.11	8969744	400964.25	1.28	24.12	9648289	421829.94	1.99
24.47	9116090	403461.69	1.56	24.48	9620239	420195.03	1.85
24.83	9637190	413833.5	1.77	24.84	9103142	406674.28	1.53
25.19	9988752	421347.81	1.92	25.20	8542860	392182.41	1.07
25.55	9934627	421300.34	1.99	25.56	8094429.5	377926.16	0.53
25.91	10002580	421306.22	1.99	25.91	7547243	363965.62	-0.07
26.27	10104748	421830.19	1.90	26.28	6881229.5	348758.62	-0.68
26.63	9870411	415384.78	1.75	26.64	6325330	336662.5	-1.22
26.99	9574654	409749.16	1.52	27.00	5743175.5	322318.47	-1.63
27.35	9203897	402775.09	1.24	27.36	5243660	307535.25	-1.91
27.71	8701983	394037.38	0.90	27.72	4940134.5	300454.94	-2.00
28.09	7976087	378872.66	0.51	28.08	4816502	298130.66	-1.91

f=0.55 rad/s				f=0.58 rad/s			
laikas	x ašimi	z ašimi	pagreitis	laikas	x ašimi	z ašimi	pagreitis
s	N	N	m/s <sup>2</sup>	s	N	N	m/s <sup>2</sup>
28.43	7418670.5	366694.28	0.14	28.44	4965941.5	305104.97	-1.64
28.79	6869262.5	353404.28	-0.25	28.80	5249814	311524.34	-1.22
29.15	6414318.5	341516.84	-0.64	29.15	5958857.5	331404.16	-0.69
29.51	5980298.5	328616.44	-1.00	29.52	7055488.5	360535.88	-0.08
29.87	5701932	320914.28	-1.32	29.88	8165000	386928.59	0.52
30.25	5544499	317127.62	-1.60	30.24	9318057	409627.41	1.08
30.61	5361457.5	310308.62	-1.81	30.60	10232451	423205.84	1.54
30.97	5307997	307656.62	-1.94	30.97	10541812	421936.88	1.85
31.32	5361009	308954.75	-2.00	31.32	10713034	420338.03	1.99
31.68	5393430.5	309319.47	-1.98	31.68	10733344	419297.09	1.95
32.04	5375730	308195.06	-1.88	32.04	10456262	419551.09	1.73
32.40	5447000	312038.19	-1.72	32.40	9977812	414473.72	1.34
32.76	5537507	316900.72	-1.48	32.76	9320159	406993.09	0.82
33.12	5659193.5	322077.59	-1.19	33.12	8062195	386872.09	0.25
33.48	5988138	332755.25	-0.85	33.48	6636270	353797	-0.37
33.84	6607099.5	348755.59	-0.47	33.84	5547922.5	321391.41	-0.93
34.20	7405056	364653.34	-0.08	34.20	4931502.5	302519.28	-1.43
34.57	7970719.5	374251.47	0.32	34.56	4643723.5	292503.75	-1.78
34.92	8387214.5	384966	0.70	34.92	4569051	289289.97	-1.97
35.28	9089451	399878.78	1.06	35.28	4769670.5	296037.41	-1.98
35.64	9388912	408060.56	1.37	35.64	5259859.5	311158.81	-1.80
36.00	9420044	409685.31	1.63	36.002747	5965623.5	328702.59	-1.45