

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS

Donatas PAULAUSKAS

LAIVŲ MANEVRINIŲ SAVYBIŲ
IR JŲ RYŠIO SU UOSTO
INFRASTRUKTŪROS
PARAMETRAIS TYRIMAI

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
TRANSPORTO INŽINERIJA (T 003)

Klaipėda, 2019

Disertacija rengta 2012–2019 metais Klaipėdos universitete

Moksliniai vadovai:

2015–2019 dr. Jolanta JANUTĖNIENĖ (Klaipėdos universitetas, transporto inžinerija – T 003),

2012–2015 prof. habil. dr. Vytautas PAULASKAS (Klaipėdos universitetas, transporto inžinerija – T 003).

Klaipėdos universiteto Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. habil. dr. Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – T 003).

Nariai:

prof. habil. dr. Sergejus LEBEDEVAS (Klaipėdos universitetas, transporto inžinerija – T 003),

prof. dr. Žilvinas BAZARAS (Kauno technologijos universitetas, transporto inžinerija – T 003),

dr. Jūratė KRIAUCIŪNIENĖ (Lietuvos energetikos institutas, aplinkos inžinerija – T 004),

prof. habil. dr. Lucjan GUCMA (Ščecino jūrų universitetas, Lenkija, transporto inžinerija – T 003).

Disertacija bus ginama viešame Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje, 2019 m. kovo 25 d., 13.00 val. Klaipėdos universiteto Aula Magna korpuso Konferencijų salėje.

Adresas: Herkaus Manto g. 84, LT-92294 Klaipėda, Lietuva

Tel.: 8 46 398 936; faks.: 8 46 398 999; el. p.: ingrida.borisenko@ku.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2019 m. vasario 22 d.

Disertaciją galima peržiūrėti interneto svetainėje adresu <https://www.ku.lt/mokslas/doktorantura/ginamos-apgintos-disertacijos/> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva), Klaipėdos universiteto (K. Donelaičio g. 3, LT-92144 Klaipėda, Lietuva), Aleksandro Stulginskio universiteto (Studentų g. 11, LT-53361 Akademija, Kauno raj., Lietuva), Kauno technologijos universiteto (K. Donelaičio g. 20, LT-44239 Kaunas, Lietuva) bibliotekose.

ISBN 978-609-457-722-2

© Klaipėdos universiteto leidykla, 2019

© Donatas Paulauskas, 2019

paulauskasd75@gmail.com

KLAIPĖDA UNIVERSITY

Donatas PAULAUSKAS

THE RESEARCH ON
SHIP'S MANEUVERABILITY AND ITS
PARAMETERS IN RELATION WITH
PORT INFRASTRUCTURE

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
TRANSPORT ENGINEERING (T 003)

Klaipėda, 2019

Doctoral dissertation was prepared at Klaipėda university in 2012–2019.

Scientific Supervisors:

2015–2019 dr. Jolanta JANUTĖNIENĖ (Klaipėda University, Transport Engineering – T 003),
2012–2015 prof. dr. habil. Vytautas PAULAUSKAS (Klaipėda University, Transport Engineering – T 003).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Transport Engineering of Klaipėda University:

Chairman

prof. habil. dr. Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilnius Gedimino Technical University, Transport Engineering – T 003).

Members:

prof. habil. dr. Sergejus LEBEDEVAS (Klaipėda University, Transport Engineering – T 003),
prof. dr. Žilvinas BAZARAS (Kaunas Technology University, Transport Engineering – T 003),
dr. Jūratė KRIAUCIŪNIENĖ (Lithuanian Energy Institute, Environmental Engineering – T 004),
prof. habil. dr. Lucjan GUCMA (Maritime University of Szczecin, Transport Engineering – T 003).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Transport Engineering in Aula Magna Conference room of Klaipėda University at 13.00 on 25th of March 2019.

Address: Herkaus Manto Str. 84, LT-92294 Klaipėda, Lithuania.

Phone: +370 46 398 936; fax: +370 46 398 999; e-mail: ingrida.borisenko@ku.lt

Notifications of the intended defence of the dissertation were sent out on 22 February 2019.

Copies of the doctoral dissertation are available for review at the internet website <https://www.ku.lt/mokslas/doktorantura/ginamos-apgintos-disertacijos/> and at the Libraries of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio alley 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania), Klaipėda University (K. Donelaičio st. 3, LT-92144 Klaipėda, Lithuania), Aleksandras Stulginskis University (Studentų st. 11, LT-53361 Akademija, Kaunas dist., Lithuania) and Kaunas University of Technology (K. Donelaičio st. 20, LT-44239 Kaunas, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamos laivų manevrinės savybės esant mažam gyliui, atsižvelgiant į laivybos saugumo reikalavimus uostuose. Pastarąjį dešimtmetį labai išaugo jūrinių vežimų apimtys, statomi vis didesnių matmenų laivai, atitinkamai griežtėja techniniai uostams keliami reikalavimai, kad esama uostų infrastruktūra, jo kanalai, apsisukimo baseinai būtų suprojektuoti ir įrengti taip, kad užtikrintų būtina laivybos saugumą uostuose bei jų prieigose. Tyrimų objektas šiame darbe yra laivas ir jo manevrinės savybės. Laivo dinamika nagrinėjama esant mažam gyliui, ji skiriasi nuo dinamikos esant dideliame gyliui – atsiranda papildomų išorinių jėgų, kurias būtina įvertinti. Kita vertus, nagrinėjami uostų infrastruktūros parametrai, atsižvelgiant į įplaukiančių laivų manevravimui būtinus uostų kanalų ir apsisukimo baseinų matmenis. Disertacijoje sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai: atliekami laivo manevrinų parametru skaičiavimai, simuliacinis laivo judėjimo modeliavimas, eksperimentiniai tyrimai. Visų atliktų tyrimų pagrindu sukurta laivo manevravimo uoste vertinimo metodika, kuria remiantis galima nustatyti būtinas uosto infrastruktūros parametru reikšmes.

Disertaciją sudaro: įvadas, keturi skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros ir autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašai.

Įvadiniame skyriuje aptariama tiriamoji problema ir darbo aktualumas.

Pirmas skyrius skirtas problematikos analizei. Čia paaiškinta laivo judėjimo uoste specifika, pateikta mokslininkų atliktų tyrimų analizė. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrame skyriuje pateikiami metodologiniai pagrindai ir matematiniai modeliai, aprašantys laivo manevravimą uoste. Esant mažam gyliui atsiranda papildomų jėgų, kurias būtina įvertinti skaičiuojant laivo stabdymo kelią ir apsisukimo trajektorijos parametrus. Pateikiama eksperimentinių laivo manevravimo uoste tyrimų metodika ir įranga.

Trečiame skyriuje pateikiami laivo judėjimo uoste matematiniai skaičiavimai, atsižvelgiant į laivo techninius ir geometrinius parametrus. Be to, pateikiami skaičiavimo, simuliacinio programine įranga ir eksperimentinių tyrimų rezultatai, manevruojant laivams realiomis uostų sąlygomis.

Ketvirtame skyriuje aptarti disertacijos išvadų įgyvendinimo uostuose rezultatai, vykdam uostų plėtros projektus.

Disertacijos tema atspausdinta monografija, disertantas yra jos bendraautoris (Paulauskas et al. 2009), publikuota 30 mokslinių straipsnių: 8 – mokslo žurnaluose, kurie įtraukti į *Thomson ISI* cituojamų žurnalų sąrašą; 13 – konferencijų medžiagoje, kurios cituojamos *ISI*, *Inspec* ir kitose duomenų bazėse, 9 – Lietuvos ir užsienio recenzuojamuose žurnaluose (publikacijų sąrašas pateiktas disertacijos pabaigoje). Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai paskelbti 20 tarptautinių mokslinių konferencijų Lietuvoje ir užsienyje. Disertacijos rezultatai buvo panaudoti vykdant uostų plėtros projektus Lietuvoje (4 projektai) ir užsienyje (1 projektas).

Abstract

The dissertation examines the maneuvering characteristics of ships at low depth, taking into account the maritime safety requirements in ports. Over the last decade, the volume of maritime transport has increased dramatically, the size of ships under construction has increased, and the technical requirements for ports have been increased, so that the existing port infrastructure, its canals, and swimming pools are designed and equipped to ensure the necessary safety of shipping at ports and port access. The object of the research in this work is the ship and its maneuverability. The dynamics of the ship are analyzed at low depths, which are different from those at large depths, resulting in additional external forces that need to be assessed. On the other hand, port infrastructure parameters are considered, taking into account the dimensions of port ducts and swim pools required for maneuvering inbound ships. The dissertation deals with several main tasks: calculations of the maneuvering parameters of the ship, simulation of simulation of the movement of the vessel, experimental studies. The basis of all the researches carried out was the methodology for evaluating the ship's port in the port, on the basis of which the necessary values of port infrastructure parameters can be determined.

The dissertation consists of an introduction, four chapters, a summary of the results, the literature used and the author's publications on the dissertation topic.

The introductory section discusses the research problem and the relevance of the work.

The first chapter deals with problem analysis. It explains the specifics of the vessel's movement in the port and provides an analysis of the research conducted by the scientists. At the end of the chapter, conclusions are formulated and tasks of the dissertation are revised.

The second chapter presents the methodological bases and mathematical models describing the ship's maneuvering in the port. At low depths, additional forces occur which must be assessed in the calculation of the ship's stopping distance and parameters of the revolutionary trajectory. Methods and equipment for experimental vessel maneuvering in port are presented.

The third chapter presents the mathematical calculations of the ship's movement in the port, taking into account the technical and geometrical parameters of the ship. The results of computation, simulation software, and experimental research are provided by maneuvering ships in real port conditions.

The fourth chapter is devoted to the implementation of dissertation results in port development projects.

Dissertation topic is published in the monograph, where the author is co-author (Paulauskas D., Paulauskas V. 2009), 30 scientific publications: 8 – in scientific jour-

nals, which are Thomson ISI reviewed; 13 – conference articles, which are reviewed in ISI, Inspect and other data bases; 9 – Lithuanian and foreign reviewed journals (list of publications is presented at the end of the dissertation). The research results in this dissertation were presented in 20 international scientific conferences across Lithuania and foreign countries. The results of the dissertation were implemented into port development projects in Lithuania (4 projects) and foreign countries (1 project).

Terminai ir apibrėžimai

Ribinės sąlygos	Hidrometeorologinės sąlygos, kurioms esant galima saugiai praplukdyti laivą.
Uosto infrastruktūros elementų ribinės vertės	Hidrotechninių ir inžinerinių įrenginių, statinių komplekso elementų maksimalūs dydžiai, kuriems esant galima saugiai plukdyti laivą.
Laivo manevrinės savybės (valdomumas)	Laivo techninės galimybės judėti planuota trajektorija ir nuo jos nenukrypti, sustoti numatytu atstumu arba numatytoje vietoje.
Uosto infrastruktūra	Hidrotechninių ir inžinerinių įrenginių, statinių, navigacinių įrenginių, kelių bei privažiuojamųjų geležinkelio kelių kompleksas (disertacijoje tiriami uosto kanalai ir akvatorijos, t. y. infrastruktūros elementai, susiję su laivo valdomumu).
Uosto superstruktūra	Laivų krovos įrenginių kompleksas ir kiti statiniai bei įrenginiai, nepriskirti uosto infrastruktūrai (krovos įranga, sandėliai).
Uosto akvatorija	Nustatytų ribų vandens plotas vandens uoste, kuriame yra laivybos kanalas, plūdrieji statiniai ir vidinis bei išorinis reidai.
Uosto laivybos kanalas	Laivybos kelias uoste, skirtas laivams manevruoti ir inkaruotis.
Mažas gylis	Gylis, kuriam esant laivo grimzlės ir vandens gylio santykis yra lygus arba didesnis už 0,8.
Laivo valdomumo (manevravimo) standartai	Informacija apie konkretaus laivo valdomumą ir jo inercines charakteristikas, parengta atsižvelgiant į Tarptautinės jūrinės organizacijos (IMO) bei klasifikacinių bendrovių taisykles.
Laivo konstrukcinės ypatybės	Laivo konstrukcinių elementų (korpusas, antstatai, varytuvai) visuma.
Didelis gylis	Gylis, kuriam esant laivo grimzlės ir vandens gylio santykis yra mažesnis už 0,8.
Klirensas (prošvaiva)	Atstumas tarp laivo korpuso ir kanalo dugno.
Laivo apsisukimo trajektorija (cirkuliacija)	Laivo apsisukimas, atsižvelgiant į vairo plokštės posūkio kampą.
Laivo parametrai (geometriniai matmenys)	Fizikiniai laivo dydžiai (ilgis, plotis, grimzlė, keliamoji galia ir pan.).
Optimalus laivas	Laivas, saugumo ir ekonominiu požiūriu gebantis nuvežti galimą didžiausią krovinių kiekį į numatytą vietą.
Optimalūs uosto infrastruktūros parametrai	Infrastruktūros parametrai, leidžiantys saugiai įplukdyti į uostą galimus maksimalaus dydžio laivus.

Kabeltas	0,1 jūrmylės, t. y. 185,2 m
Kampinio greičio evoliucinis periodas	Laikas, per kurį laivo sukimosi kampinis greitis pasiekia maksimalią reikšmę.
Kanalo gylis	Gylis nuo vandens paviršiaus, esant žemiausiam – nuliniam vandens lygiui iki didžiausios išsikūšusios kliūties dugne (navigacinis gylis).
Kanalo plotis	Kanalo plotis dugne, atitinkantis projektinį gylį.
Konvencinis laivas	Laivas, turintis tradicinį laivo sraigą ir vairo plokštę.
Laivyba	Laivų ir kitų vandens transporto priemonių plaukiojimas pasauliniuose vandenyse.
Laivo grimzlė	Laivo maksimali grimzlė, į jį pakrovus konkretų kiekį krovinių arba balasto.
Laivo stabdymo parametrai	Laivo stabdymo kelias ir greitis stabdymo metu.
Navigacinis gylis	Gylis, leidžiantis saugiai plukdyti laivą planuotu maršrutu.
Aktyvus laivo stabdymas	Laivo stabdymas atgal besisukančiu sraigtu
Laivo plukdymas	Laivo plukdymas planuotu maršrutu
Kinematiniai parametrai	Laivo greitis, kampinis sukimosi greitis, dreifo kampas.
Dedveitas	Pakrauto ir tuščio laivo skirtumas (tonomis).
Španhautas	Laivo korpuso griaučių skersinė borto sija.
Krenas	Šoninis laivo posvyris.
Laivo „prasėdimas“	Laivo grimzlės padidėjimas dėl laivo greičio.
Pakankamas laivybos saugumas	Tikimybinė samprata, reiškianti garantuotą laivo saugaus plaukimo 95 % tikimybę, esant įprastoms sąlygoms, pavyzdžiui, SGD tanklaiviams priimama 99,7 % tikimybė.
Papildomos atsargos	Laivybos saugumo požiūriu – papildomos gylio ir kanalų bei akvatorijų pločio atsargos, priimamos nesant tikslios informacijos, pavyzdžiui, matavimo, užnešimo nešmenimis ir kt.
Pasyvusis stabdymas	Laivo stabdymas dėl trinties tarp laivo korpuso ir vandens.
Propulsinis kompleksas	Laivo pagrindinio variklio, sraigto ir vairo plokštės derinys.
Uosto infrastruktūra navigaciniu požiūriu	Uosto statiniai (kanalai, molai, krantinės, navigacinė įranga, taip pat įranga, naudojama tam, kad laivas saugiai įplauktų į uostą, stovėtų jame ir išplauktų iš jo).

Santrumpos

Simboliai

ABS	Amerikos laivybos biuras (angl. <i>American Bureau of Shipping</i>)
AIS	Automatinė padėties nustatymo sistema
AIS-LERS	Automatinė laivų nustatymo sistema, integruota su laivų eismo reguliavimo sistema
BS	Britanijos standartas (angl. <i>British standart</i>)
DWT	Laivo dedveitas (pakrauto ir tuščio laivo svorio skirtumas, tonomis arba m ³)
DP	Laivo vidurinė plokštuma
GL-DNV	Klasifikacinė bendrovė (vok. <i>Germanish Loid det Norske Veritas</i>)
Q-Flex	Suskystintųjų dujų (SGD) tanklaivis, vežantis iki 220 000 m ³ SGD
EAU	ES Hidrotechninių statinių, uostų ir vandens kelių komiteto rekomendacijos (angl. <i>Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways</i>)
E-Sea Fix	Ypač tiksli navigacinė sistema
IMO SOLAS 74	1974 metų Tarptautinės jūrų organizacijos dokumentas „Konvencija dėl žmogaus gyvybės apsaugos jūroje“
KLTC	Klaipėdos laivybos tyrimų centras
KVJUD	Klaipėdos valstybinė jūrų uosto direkcija
LNS „Dockmaster 3“	Lazerinė navigacinė ypač tiksli sistema
NVK	Naudingojo veikimo koeficientas
RTK	Realaus laiko kinematinė sistema (navigacinė) (angl. <i>Real time kinematic</i>), pavyzdžiui, „E-Sea Fix“ sistema
OPTIMOOR	Laivų švartavimo simulatorius
PIANC	Tarptautinė navigacijos organizacija (angl. <i>Permanent International Association of Navigational Congress</i>)
PM	Paryžiaus memorandumas
PANAMAX	Didžiausių parametrų laivas, galintis praplaukti senaisiais Panamos kanalo šliuzais (ilgis – iki 295 m, plotis – iki 33 m, grimzlė – iki 12,5 m)

POST PANAMAX	Didesnis negu PANAMAX tipo laivas, kuriuo vežami konteineriai (nuo 5000 iki 8000 TEU)
POST PANAMAX PLUS	Didesnis negu POST PANAMAX tipo laivas, kuriuo vežami konteineriai (nuo 8000 iki 12 500 TEU), dabar vadinamas New PANAMAX
MEGA	Laivo tipas, taikytinas konteinerių vežimo laivams (nuo 14 000 TEU)
SGD	Suskystintos gamtinės dujos
SSS	Trumpųjų nuotolių laivyba (angl. <i>Short Sea Shipping</i>)
SIMFLEX	Vizualusis laivo tiltelio treniruoklis (simuliatorius)
SUECMAX	Didžiausių parametrų laivas, galintis plaukti Sueco kanalu (grimzlė – iki 17,2 m)

Formulių simboliai

F_X	Jėga, veikianti X ašies atžvilgiu, N
F_Y	Jėga, veikianti Y ašies atžvilgiu, N
M_A	Jėgos momentas, N·m
V	Laivo tūrinė vandentalpa, m ³
k_{11}	Pridėtosios skysčio (vandens) masės koeficientas, laivui judant tiesiai
v	Laivo plaukimo greitis, m/s
t	Laikas, s
β	Laivo dreifo kampas, rad.
k_{22}	Pridėtosios skysčio (vandens) masės koeficientas, laivui švartuojantis
I_Z	Laivo inercijos momentas Z ašies atžvilgiu, kg·m ²
λ_{66}	Pridėtosios skysčio (vandens) masės inercijos momentas Z ašies atžvilgiu, kg·m ²
ω	Laivo sukimosi kampinis greitis, rad./s
X_K	Laivo korpuso pasipriešinimo jėga, veikianti X ašies atžvilgiu, N
Y_K	Laivo korpuso pasipriešinimo jėga, veikianti Y ašies atžvilgiu, N
M_K	Laivo korpuso pasipriešinimo momentas, N·m
X_β	Laivo korpuso, kaip „sparno“, jėga, veikianti X ašies atžvilgiu, N
Y_β	Laivo korpuso, kaip „sparno“, jėga, veikianti Y ašies atžvilgiu, N
M_β	Laivo korpuso, kaip „sparno“, momentas, N·m
X_p	Vairo plokštės jėga, veikianti X ašies atžvilgiu, N
Y_p	Vairo plokštės jėga, veikianti Y ašies atžvilgiu, N
M_p	Vairo plokštės momentas, N·m
X_a	Aerodinaminė jėga, veikianti X ašies atžvilgiu, N
Y_a	Aerodinaminė jėga, veikianti Y ašies atžvilgiu, N
M_a	Aerodinaminis momentas, N·m
X_b	Bangų sudaroma jėga, veikianti X ašies atžvilgiu, N
Y_b	Bangų sudaroma jėga, veikianti Y ašies atžvilgiu, N
M_b	Bangų sudaromas momentas, N·m
X_{sr}	Srovės sudaroma jėga, veikianti X ašies atžvilgiu, N
Y_{sr}	Srovės sudaroma jėga, veikianti Y ašies atžvilgiu, N
M_{sr}	Srovės sudaromas momentas, N·m
X_{sek}	Seklumos poveikio sudaroma jėga, veikianti X ašies atžvilgiu, N
Y_{sek}	Seklumos poveikio sudaroma jėga, veikianti Y ašies atžvilgiu, N
M_{sek}	Seklumos poveikio sudaromas momentas, N·m
T_x	Laivo sraigto sukuriama stūmos jėga X ašies atžvilgiu, N
T_y	Laivo sraigto sukuriama stūmos jėga Y ašies atžvilgiu, N
M_T	Laivo sraigto sukuriamas stūmos momentas, N·m
X_N	Laivo pavairavimo įrenginių sukuriama jėga X ašies atžvilgiu, N
Y_N	Laivo pavairavimo įrenginių sukuriama jėga Y ašies atžvilgiu, N
M_N	Laivo pavairavimo įrenginių sukuriamas momentas, N·m
X_V	Vilkikų traukos sukuriama jėga X ašies atžvilgiu, N
Y_V	Vilkikų traukos sukuriama jėga Y ašies atžvilgiu, N

M_V	Vilkikų traukos sukuriamas momentas, N·m
φ	Laivo greičio kampas, rad.
ψ	Laivo kurso kampas, rad.
T	Laivo vidutinė grimzlė, m
L	Laivo ilgis tarp statmenų, m
B	Laivo plotis, m
ρ	Vandens tankis, kg/m ³
δ	Bendrasis laivo korpuso pilnumo koeficientas
k	Koeficientas, priklausantis nuo santykio L/B
k'_{11}	Pridėtosios skysčio (vandens) masės koeficientas laivui judant išilgai X ašies, esant mažam gyliui
v_0	Laivo greitis, esant dideliame gyliui, m/s
ρ'	Vandens tankio koeficientas
v_s	Laivo greitis kanale, m/s
S'_2	Santykis tarp laivo ir kanalo skerspjūvio pločio
H	Kanalo gylis, m
B_e	Efektyvusis kanalo plotis, m
B_{kv}	Kanalo plotis vandens lygyje, m
B_{kd}	Kanalo plotis dugne, m
ω_s	Laivo sukimosi kampinis greitis, manevruojant mažame gylyje, rad./s
k_ω	Laivo sukimosi kampinio greičio koeficientas
x_0	Laivo sukimosi poliaus abscisė
T_{lg}	Laivagalio grimzlė, m
T_{lp}	Laivapriekio grimzlė, m
α^0	Vairo plokštės pasukimo kampas, laips.
S_{sr}	Srovės poveikis, m
v_{sr}	Srovės greitis, m/s
q_{sr}	Srovės kurso kampas, rad.
t_s	Laivo plaukimo laikas, s
C_y	Vairo plokštės hidrodinaminis koeficientas
S'	Vairo plokštės projekcijos į viduriniąją plokštumą plotas, m ²
n	Sraigto sukimosi dažnis, s ⁻¹
D_s	Sraigto skersmuo, m
k_r	Sraigto koeficientas
C_a	Aerodinaminės jėgos koeficientas
S_x	Laivo viršvandeninės dalies projekcijos į viduriniąją plokštumą plotas, m ²
v_a	Vėjo greitis, m/s
$\sin q_\alpha$	Vėjo kurso kampo sinusas pradiniame laivo manevro taške
x_a	Aerodinaminės jėgos abscisė
C_B	Bangos poveikio koeficientas
k_B	Bangos energijos pernešimo koeficientas
k_{R11}	Laivo pasipriešinimo koeficientas, laivui judant tiesiai
k_{R22}	Laivo pasipriešinimo koeficientas, laivui švartuojantis
k^1_{R11}	Laivo bortų papildomas pasipriešinimo koeficientas
k'_{R11}	Laivo pasipriešinimo koeficientas, laivui judant tiesiai siauru kanalu
k_R	Papildomas pasipriešinimo koeficientas

k_{in}	Laivo inercijos koeficientas
k'_{in}	Laivo inercijos koeficientas seklumoje
F_s	Sraigto įrašos jėga, N
F_v	Vilkiko traukimo jėga, N
ΔM	Papildomas momentas, atsirandantis dėl laivo korpuso nelygumo, N·m
v'_{min}	Minimalus laivo valdomumo greitis, neveikiant išorinėms jėgoms, m/s
v_{min}	Minimalus laivo valdomumo greitis, veikiant išorinėms jėgoms, m/s
q_a	Vėjo kurso kampas, laips.
Y_s	Sraigta veikianti šoninė jėga, N
K'_1	Sraigto įrašos jėgos koeficientas, sraigtui sukantis atbuline eiga
$n_{a.e}$	Sraigto sukimosi atbuline eiga dažnis, s ⁻¹
α_s	Sraigto srauto nuokrypos kampas, laips.
m	Laivo masė kartu su pridėtąja skysčio mase, kg
R	Laivo korpuso pasipriešinimo jėga, N
T_s	Laivo sraigto įrašos jėga, N
T_{pv}	Laivo pavairavimo įrenginių sukuriama jėga, N
T_v	Vilkikų sukuriama jėga, N
C	Hidrodinaminis koeficientas
Ω	Sudrėkintasis laivo korpuso plotas, m ²
C_y	Hidrodinaminis koeficientas, priklausantis nuo srovės kurso kampo
F_d	Laivo povandeninės dalies projekcijos į vidurinę plokštumą plotas, m ²
\wp	Laivo povandeninės dalies vidurinės plokštumos pilnumo koeficientas
q_l	Oro tankis, kg/m ³
S_y	Laivo viršvandeninės dalies projekcijos į midelio plokštumą plotas, m ²
ΔT_V	Laivo grimzlės padidėjimas dėl „prasėdimo“, m
ΔT_θ	Laivo grimzlės padidėjimas dėl posvyrio, m
ΔT_ψ	Laivo grimzlės padidėjimas dėl bangavimo poveikio, m
ΔH_m	Gylio matavimo tikslumas, m
$\Delta H_{V.L}$	Vandens lygio pokytis konkrečioje vietoje, m
$\Delta H_{\Delta V.L}$	Vandens lygio matavimo tikslumas, m
ΔH_n	Navigacinė atsarga, m
K_{11}	Pridėtoji skysčio masė, esant dideliame gyliui, kg
K'_{11}	Pridėtoji skysčio masė seklumoje, kg
θ	Laivo posvyrio kampas, laips.
R''	Laivo korpuso vidurinės dalies užapvalinimo spindulys, m
γ	Midelio španto pilnumo koeficientas
B_k	Kanalo plotis, m
ΔK	Laivo krypavimo kampas apie kursą, plaukiant kanalu, laips.
b_n	Navigacinė atsarga, priklausanti nuo kanalo šlaitų tikslumo ir pastovumo, m
P''	Tikimybinis aprūpinimo koeficientas
σ_y	Laivo vietos nustatymo kanalo ašies atžvilgiu tikslumas
v_d	Laivo dreifo greitis, m/s
B_v	Vilkiko plotis, m
D	Laivų apsisukimo baseino skersmuo, m
$\Delta b'$	Papildoma vilkiko, praplaukiančio pro laivą, atsarga, m

Turinys

ĮVADAS	21
1. LAIVŲ MANEVRINIŲ SAVYBIŲ IR UOSTO INFRASTRUKTŪROS TYRIMŲ ANALIZĖ	25
1.1. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametrų mokslinių tyrimų analizė	28
1.2. Laivų manevrinės savybės, jų ryšys su uosto infrastruktūra	35
1.3. Pirmo skyriaus apibendrinimas	38
2. UOSTO INFRASTRUKTŪROS PLĖTROS IR RIBINĖS SĄLYGAS ATITINKANČIŲ LAIVŲ MANEVRINIŲ PARAMETRŲ TYRIMAS	41
2.1. Laivo manevravimo uoste eksperimentiniai tyrimai	41
2.1.1. Laivo manevravimo uoste eksperimentų atlikimo metodika	41
2.1.2. Matavimo įranga	43
2.1.3. Eksperimentiniai laivo manevravimo parametrų tyrimai	49
2.2. Laivo valdomumo charakteristikos	49
2.3. Laivo judėjimo charakteristikos ir laivo grimzlės padidėjimas esant mažam gyliui	54
2.4. Laivo kreivalinijinio judėjimo charakteristikos esant mažam gyliui	58
2.5. Laivo stabdymo ir įsibėgėjimo charakteristikos esant mažam gyliui	63
2.6. Minimalus laivo valdomumo greitis stabdant	69
2.7. Uoste švartuojamą laivą veikiančios jėgos	73
2.8. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametrų tyrimai	76

2.9. Būtni minimalūs uosto akvatorijos (kanalų, laivų apsisukimo baseinų) parametrai, įvertinant laivo manevrines savybes	78
2.10. Antro skyriaus apibendrinimas	82
3. LAIVO MANEVRINIŲ SAVYBIŲ IR UOSTO INFRASTRUKTŪROS PARAMETRŲ TYRIMAI	83
3.1. Laivo kreivalinijinio judėjimo charakteristikų esant mažam gyliui tyrimai	83
3.2. Laivo judėjimo charakteristikų ir laivo grimzlės padidėjimo esant mažam gyliui tyrimai	95
3.3. Laivo stabdymo, įsibėgėjimo ir valdomumo stabdant charakteristikų esant mažam gyliui tyrimai, jų svarba planuojant uosto infrastruktūrą	99
3.4. Laivo grimzlės pokyčio uosto kanaluose, uosto kanalų ir laivų apsisukimo baseinų palyginamieji ir ribinių sąlygų tyrimai	107
3.5. Kanalo parametrų nustatymas, atsižvelgiant į laivų manevrines savybes	114
3.6. Ribinės uosto infrastruktūros sąlygos laivo valdomumo ir grimzlės atžvilgiu	116
4. TYRIMO REZULTATŲ TAIKYMAS PLĖTOJANT UOSTŲ INFRASTRUKTŪRĄ	121
5. BENDROSIOS IŠVADOS	127
LITERATŪRA	129
DISERTACINIO DARBO APROBAVIMAS MOKSLO LEIDINIUOSE	137
SUMMARY IN ENGLISH	141

Contents

INTRODUCTION	21
1. ANALYSIS OF VESSEL MANEUVERABILITY AND PORT INFRASTRUCTURE RESEARCH	25
1.1. Analysis of ship's maneuverability and port infrastructure parameters research	28
1.2. Naval maneuvers, their connection with port infrastructure	35
1.3. Brief summary of the first chapter	38
2. DEVELOPMENT OF PORT INFRASTRUCTURE AND SHUNTING PARAMETERS OF SHIPS COMPLIANT WITH EXTREME CONDITIONS	41
2.1. Investigation of the maneuvering of a ship in a port	41
2.1.1. Methodology for conducting experiments in the shunting port of a ship	41
2.1.2. Measuring equipment	43
2.1.3. Experimental tests of vessel maneuvering parameters	49
2.2. Performance characteristics of the ship	49
2.3. Vessel movement characteristics and increase in draft at shallow waters	54
2.4. Vessel curvilinear movement characteristics at shallow waters	58
2.5. Vessel braking and acceleration characteristics at shallow waters	63
2.6. Minimum vessel steerability in case of braking	69
2.7. Mooring of the vessel in the port and active forces	73
2.8. Principles of Port Infrastructure Design (Planning) in Assessing Ship Management Parameters	76

2.9. Minimum parameters of the port waters (channels, boat rotation basins) are required, taking into account the maneuverability of the vessel	78
2.10. Brief summary of the second chapter	82
3. INVESTIGATIONS OF THE VESSEL'S MANEUVERABILITY AND PORT INFRASTRUCTURE PARAMETERS	83
3.1. Investigations of the vessel's crevival movement characteristics at shallow waters	83
3.2. Investigations of the vessel's movement characteristics and the growth of the draft at shallow waters	95
3.3. Investigation of the performance of braking, acceleration and reduced braking performance at shallow waters, their importance in port infrastructure planning	99
3.4. Comparison of vessel draft changes in port channels and vessel turning basins comparative and threshold conditions	107
3.5. Channel settings based on vessel maneuverability	114
3.6. Limiting Port Infrastructure Requirements for Ship Management and Draft	116
4. APPLICATION OF RESEARCH RESULTS IN THE DEVELOPMENT OF PORT INFRASTRUCTURE	121
5. GENERAL CONCLUSSIONS	127
REFERENCES	129
LIST OF THE AUTHORS SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION	137
SUMMARY IN ENGLISH	141

Įvadas

Problemos formulavimas

Uosto veikla apima laivybą, laivų aptarnavimą ir laivybai tinkamos infrastruktūros užtikrinimą. Planuojant uosto infrastruktūros plėtrą įvertinamos esamos uosto teritorijos, krovinių srautai, iš kitų uostų atplaukiančių laivų techniniai parametrai ir jų manevravimui būtini duomenys.

Analizuojant uosto infrastruktūrą ir laivų įplaukimo į šiuos uostus galimybes įvertinami šie aspektai:

- įplaukiančių laivų dydis (plotis, ilgis, grimzlė);
- uosto infrastruktūros ir superstruktūros techninės charakteristikos;
- krovinių rūšys (skystieji, birieji, konteineriniai, generaliniai), nes konkrečioms krovinių rūšims naudojami specializuoti laivai.

Uosto plėtra planuojama, atsižvelgiant į priimamų laivų dydžius, uosto ribinius parametrus ir maksimalias galimas infrastruktūros plėtros sąlygas.

Atsižvelgiant į uosto infrastruktūros parametrus, gali būti nustatyta viršutinė laivų dydžio riba, t. y. didžiausi laivai, kurie gali įplaukti, pavyzdžiui, į Baltijos jūros uostus.

Atsižvelgiant į esamus didžiausius gylius Baltijos jūros sąsiauriuose (Zundo, Mažojo Belto, Didžiojo Belto), maksimali laivų grimzlė, kurią turėdamas laivas gali praplaukti minėtus sąsiaurius, – iki 15,0 m, tai laivai, kurių vandentalpa neviršija 120 000–150 000 tonų.

Žinant galimus maksimalius laivų dydžius galima apskaičiuoti infrastruktūros techninius parametrus, kuriais remiantis projektuoti uosto kanalus, krantines, apsisukimo baseinus, kitus infrastruktūros elementus.

Todėl prieš pradėdant uosto plėtrą analizuojami esamo uosto pajėgumai, atliekami naujas sąlygas atitinkantys būtini uosto infrastruktūros elementų skaičiavimai, kartu atsižvelgiama į planuojamas investicijas. Visus šiuos skaičiavimus reikia suderinti tarpusavyje ir atrasti naudingiausią sprendinį.

Mokslinė problema

Uosto infrastruktūra ir superstruktūra turi būti taip suprojektuota, kad galėtų priimti įplaukiančius numatyto dydžio laivus ir užtikrintų būtiną jų apsaugą. Deja, daugeliu atvejų uosto infrastruktūros plėtra planuojama nepakankamai tiksliai įvertinus įplaukiančių laivų dydžius, jiems manevruoti būtinas sąlygas, o tai dažnai nulemia tai, kad į uostų plėtrą arba per daug investuojama, arba uostuose ir jų prieigose neužtikrinamas būtinas laivybos saugumas.

Uosto įplaukos kanalų, akvatorių gylis ir plotis bei krantinių techniniai parametrai lemia į uostą įplaukiančių laivų galimybes saugiai manevruoti. Į uostą įplaukiančių laivų dydžiai, grimzlė ir kitos charakteristikos priklauso nuo gabenamų krovinių rūšies ir gabenimo atstumo. Todėl planuojant uosto infrastruktūros plėtrą labai svarbūs laivų manevravimo tyrimai, tikslinant galimus uosto įplaukos kanalų, laivų apsisukimo baseinų, prieigų prie krantinių ir pačių krantinių parametrus.

Iki šiol uostų infrastruktūros plėtra buvo vykdoma atsižvelgiant į vietinius standartus ir tarptautines rekomendacijas (EAU, PIANC), kuriose įvertinamos tipinės uostų sąlygos, tačiau kiekvienu konkrečiu atveju kyla specifinių klausimų, kurių sprendimų standartai nenumato.

Esamuose infrastruktūros skaičiavimo ir projektavimo standartuose neatsižvelgiama į tai, kokie uosto infrastruktūros elementų parametrai (kanalo gylis, plotis, apsisukti būtinas plotas) būtini, kad įplaukiantys laivai galėtų manevruoti. Todėl laivų navigacinis avaringumas uostuose ir prieigose prie jų daugelį metų išlieka aktuali problema.

Naujausios pasaulinės laivybos tendencijos, projektuojami ir statomi vis didesnio dydžio laivai nulemia didesnes investicijas į uosto infrastruktūrą. Ypač aktualus tampa uosto gylis ir laivų manevrinių galimybių tarpusavio suderinimo klausimais.

Disertacijoje nagrinėjama mokslinė problema: būtinos metodikos, siekiant įvertinti įplaukiančių laivų manevrinius parametrus ir jų pagrindu nustatyti uosto infrastruktūros elementų ribines technines charakteristikas bei racionaliai planuoti uosto infrastruktūros plėtrai numatomas investicijas, sukūrimas.

Disertacijos tikslas

Sukurti matematinio modeliavimu ir eksperimentiniais tyrimais pagrįstą skaičiavimo metodiką, kurioje būtų įvertinami į uostą įplaukiančių laivų manevravimui būtini uosto kanalų ir apsisukimo baseinų dydžiai, uostų infrastruktūros techniniai parametrai, laivybos saugumo sąlygos bei investicijos uosto plėtrai.

Disertacijos uždaviniai

1. Sukurti laivo manevravimo uosto prieigose ir akvatorijoje vertinimo metodiką, atsižvelgiant į saugios laivybos reikalavimus (pagal PIANC rekomendacijas).
2. Atlikti uosto infrastruktūros elementų palyginamąją analizę ir nustatyti svarbiausius, į kuriuos būtina atsižvelgti planuojant uostų plėtrą.
3. Taikant matematinį modelį, aprašantį laivo dinamiką uoste, apskaičiuoti laivo manevrinius parametrus. Remiantis gautais rezultatais ir naudojant navigacinius treniruoklius bei atliekant realius laivų manevravimo eksperimentus, nustatyti ribines laivų plaukiojimo uostuose, kanaluose ir prieigose prie uostų sąlygas.
4. Remiantis analitinių, skaitinio modeliavimo ir eksperimentinių tyrimų rezultatais, parengti išvadas, kaip racionaliai naudoti uosto infrastruktūrą, derinant jos techninius parametrus su laivų manevravimo uostuose ir jų prieigose duomenimis.

Mokslinis naujumas

1. Laivo judėjimo lygtys papildytos seklumos poveikio ir „sparno“ efekto jėgų ir momentų dedamosiomis, kurios leidžia įvertinti laivo manevravimo ypatumus uosto prieigose ir akvatorijoje.
2. Sukurta laivo manevravimo uosto prieigose ir akvatorijoje vertinimo metodika leidžia nustatyti uosto infrastruktūros elementų ribines vertes bei užtikrinti saugų laivų manevravimą.

Disertacijos ginamieji teiginiai

1. Remiantis teoriniais ir eksperimentiniais tyrimais, sukurta kompleksinė metodika, kurią taikant apskaičiuojamos laivo manevrinės savybės ir jo manevravimui būtini minimalūs uosto infrastruktūros elementų parametrai (laivybos kanalai ir laivų apsisukimo baseinai).
2. Tiksliau įvertinus laivo manevrines savybes, galima didinti į uostą plukdomų laivų parametrus esamos uosto infrastruktūros sąlygomis, kartu užtikrinti saugų laivų manevravimą.

Praktinė reikšmė

Sukurta laivo manevrinių savybių uosto prieigose ir akvatorijoje vertinimo, uosto ribinių sąlygų (ribinių laivo dydžių) skaičiavimo metodika leidžia patikslinti uosto infrastruktūros technines galimybes.

Sukurtas laivo manevrinių savybių uosto prieigose ir akvatorijoje, uosto infrastruktūros elementų tyrimų modelis leidžia:

- patikslinti laivo manevrines savybes uosto prieigose ir akvatorijoje;
- didinti laivybos saugumą uosto prieigose ir akvatorijoje;
- racionaliai panaudoti investicijas į uosto infrastruktūros elementų plėtrą (remiantis tyrimo rezultatais).

Racionalus investicijų naudojimas gerinant uosto infrastruktūrą leidžia greičiau sušgražinti investicijas nedidinant uosto rinkliavų, kartu didinti uosto konkurencingumą.

Darbo metodika

Disertaciją sudaro analitiniai, eksperimentiniai ir matematinio modeliavimo metodai.

Eksperimentiniai laivo manevravimo parametrų tyrimai atlikti DFDS „Optima Seaways“ laive. Naudota ypač tiksli navigacinė įranga „E-SeaFix“, vizualusis laivo tiltelio treniruoklis „Simflex Navigator“, AIS (automatinė padėties nustatymo sistema), kuri integruota su Laivų eismo reguliavimo sistema (angl. *Vessel Traffic System* – VTS).

Mokslinio darbo aprobavimas

Disertacijos tema publikuota monografija „Laivo valdymas uoste“ (2009) – disertantas yra bendraautoris, 30 mokslinių straipsnių: 8 – mokslo žurnaluose, kurie įtraukti į *Thomson ISI* cituojamų žurnalų sąrašą; 13 – konferencijų medžiagose, kurios cituojamos *ISI*, *Inspec* ir kitose duomenų bazėse, 9 – Lietuvos ir užsienio recenzuojamuose žurnaluose (publikacijų sąrašas pateiktas disertacijos pabaigoje).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai paskelbti 20-yje tarptautinių mokslinių konferencijų Lietuvoje ir užsienyje.

Disertacijos rezultatai panaudoti vykdant uostų plėtros projektus Lietuvoje (4 projektai) ir užsienyje (1 projektas).

Darbo apimtis ir struktūra:

Disertaciją sudaro: įvadas, 4 skyriai, išvados, literatūros sąrašas, autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas. Disertacijos teksto apimtis – 128 lapai. Darbe yra 47 paveikslai ir 11 lentelių. Literatūros sąrašą sudaro 145 šaltiniai.

Laivų manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros tyrimų analizė

Uosto infrastruktūros (uosto kanalai, laivų apsisukimo baseinai, vidinė uosto akvatorija) plėtra (gilinimo darbai) yra vienas sudėtingiausių ir brangiausių darbų, todėl ypač svarbu juos racionaliai projektuoti, atlikti kanalo gilinimo darbus, atsižvelgiant į įplaukiančių laivų grimzlę ir jų manevrines savybes. Uostų techniniai parametrai (kanalų plotis ir gylis, uosto akvatorių plotas, laivų apsisukimo baseinų matmenys) yra svarbūs, siekiant užtikrinti būtiną navigacinį saugumą. Kita vertus, investicijos į jų plėtrą turi būti racionalios. Uostų plėtros problemų moksliniams tyrimams daug dėmesio skiria uostus turinčios šalys, nemažai tyrimų atlieka ir Lietuvos mokslininkai.

Laivo valdomumas, apibrėžiamas kaip laivo judėjimas numatyta trajektorija ir gebėjimas joje išsilaikyti, sustoti numatytu atstumu arba numatytime taške, tirtas daugelio mokslininkų Lietuvoje ir užsienyje.

IMO SOLAS 74 konvencijoje „Dėl žmogaus gyvybės apsaugos jūroje“ (SOLAS 1974) pateikti reikalavimai dėl laivų manevrinių savybių informacijos pateikimo. Ši informacija turi būti laive, ja remiantis parengti laivo valdomumo standartai ir taisyklės.

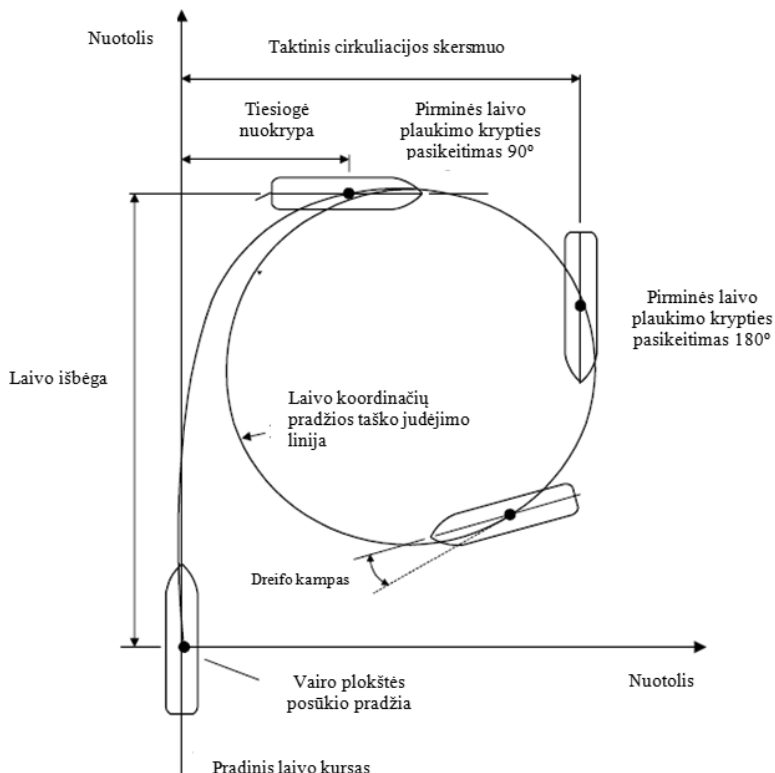
Laivų klasifikacinės bendrovės Amerikos laivybos biuras (angl. *American Bureau of Shipping* – ABS) (ABS 2005), remdamasis Tarptautinės jūrų organizacijos (angl. *International maritime organization* – IMO) patvirtintu laivų valdomumo standartu (laivo manevrinių charakteristikų lentelė) (IMO 2002), pateikia laivo manevrines savybes:

1. Laivų manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros tyrimų analizė

- laivo apsisukimo trajektorija, esant maksimaliam vairo plokštės posūkio kampui (iki 5 laivo korpuso ilgių), kaip parodyta 1.1 paveiksle;
- laivo judėjimo trajektorija aktyviai stabdant laivą, kaip parodyta 1.2 paveiksle.

Nurodytas laivo manevrines charakteristikas būtina žinoti projektuojant laivus, siekiant tiksliai nustatyti laivo sraigto ir jo vairo plokštės konstrukcinius matmenis, jų įtaką laivo manevringumui, kai neveikia papildomos išorinės jėgos (vėjo, srovės, bangavimo).

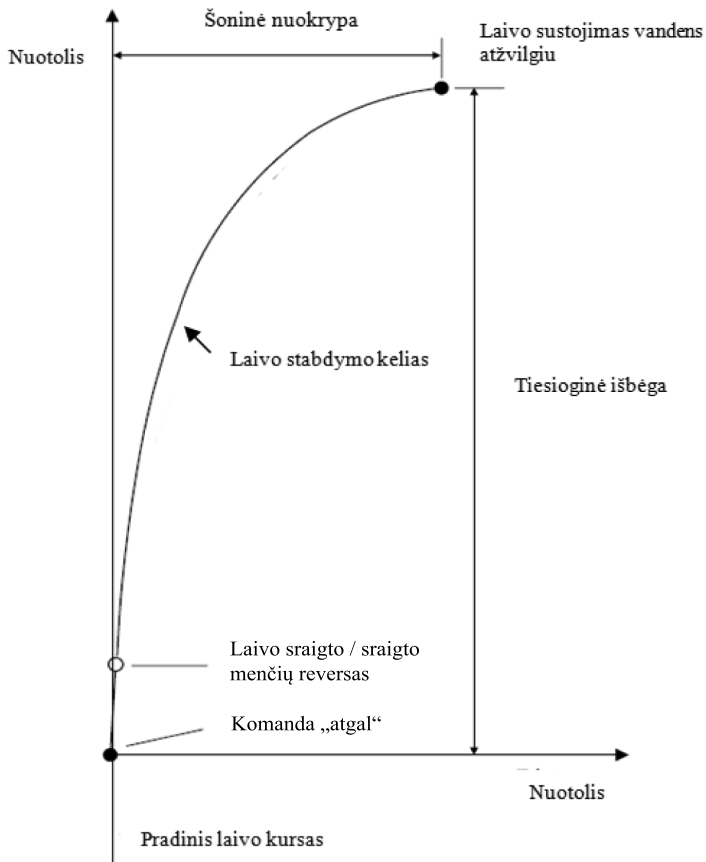
IMO standarte pateiktos galimos laivo taktinio apsisukimo skersmens ir stabdymo kelio ribos laivo ilgio atžvilgiu. Taigi IMO ir įvairių laivų klasifikacinių bendrovių (pavyzdžiui, Vokietijos „Germanish Loid det Norske Veritas – GL-DNV“, Prancūzijos „Biuro Veritas“ ir kitos) reikalavimai yra panašūs ir taikomi projektuojant laivus, siekiant nustatyti laivo manevrines savybes. Tačiau šiuose dokumentuose nepateikti uostų ir vandens kelių infrastruktūros reikalavimai.



1.1 pav. Laivo apsisukimo trajektorija (ABS 2005)

Fig. 1.1. Ship's circular trajectory (ABS 2005)

1. Laivų manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros tyrimų analizė



1.2 pav. Laivo stabdymo trajektorija (ABS 2005)

Fig. 1.2. Ship's stopping trajectory (ABS 2005)

SOLAS 74 konvencija (SOLAS 1974) ir kiti laivybos saugumą reglamentuojantys dokumentai (IMO reikalavimai ar klasifikacinių bendrovių taisyklės) numato, kad laivuose turi būti saugoma informacija apie laivo manevrinių savybių parametrus (stabdymo kelias, laivo apsisukimo skersmuo ir kt.). Laivų patikra, atliekama pagal Paryžiaus memorandumo taisyklės (PM 2014), atskleidė, kad apie 30 % laivų būtinos informacijos (laivo sukimosi trajektorija, stabdymo parametrai) laivuose nėra. Remiantis pasaulyje atliktų mokslinių tyrimų rezultatais suformuluotas aktualus uždavinys: parengti praktiškai taikytiną laivų manevrinių savybių vertinimo metodiką, esant mažam gyliui (uostų sąlygos), kartu didinti laivų navigacinį saugumą uostuose ir jų prieigose.

1. Laivų manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros tyrimų analizė

Įplaukiant laivui į uostą ir jame manevruojant laivo valdomumą veikia vėjas, srovė, sekluma. Taigi svarbu tiksliai nustatyti laivo sukimosi trajektoriją, žinoti stabdymo parametrus, minimalų laivo valdomumo greitį, laivo grimzlės pokyčius, esant mažam gyliui, laivo, kaip „sparno“, įtaką laivo manevrinėms savybėms, būtinas papildomas valdomumo priemonės (stūmos, vilkikai).

Uostuose ir laivuose diegiama nauja navigacinė įranga, griežtinami laivų įgulos nariams keliami reikalavimai, vis dėlto laivų avaringumas uostuose ir jų prieigose jau daugelį metų išlieka panašus (PM 2014; Hassel et al. 2011). Taigi būtini moksliniai tyrimai ir atitinkami sprendimai, susiję su laivų manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametrų suderinamumu, kurie padėtų mažinti avaringumą uostuose ir jų prieigose.

Laivų manevrinių savybių uostų prieigose ir akvatorijose bei galimo jų ryšio su uosto kanalų ir akvatorijų parametrais mokslinių tyrimų trūksta, todėl šio skyriaus tikslas – apibendrinti šia tema atliktus tyrimus, įvertinti rezultatus ir nustatyti laivo manevravimo parametrų, į kuriuos reikia atsižvelgti projektuojant uosto infrastruktūrą, tikslumą ir, remiantis gautais rezultatais, patikslinti disertacijos tikslus bei uždavinius.

1.1. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametrų mokslinių tyrimų analizė

Lietuvos, kaip ir kitų šalių, moksliniuose darbuose kreipiamas dėmesys į laivo manevrines savybes, analizuojama uosto infrastruktūra, siekiant užtikrinti saugų laivų įplaukimą, nagrinėjamos uosto gylio ir vandens kelių optimizavimo problemos. Inžinierius S. Šimoliūnas (Šimoliūnas 1936), vienas pirmųjų Lietuvoje projektuodamas Šventosios uostą 1930–1937 metais, nagrinėjo optimalaus uosto gylio problemas.

Išsamūs tyrimai buvo atliekami planuojant ro-ro laivų kompleksą Klaipėda–Mukranas, tuo metu paskelbti V. Paulausko darbai (Paulauskas 1986; 1989), tiesa, jie daugiausia buvo susiję su kanalo pločio įtaka ro-ro laivų navigaciniam saugumui.

Atkūrus Lietuvos nepriklausomybę ir patvirtinus Lietuvos Respublikos transporto strategijos plėtros programą (Lietuvos Respublikos SM 1993), pradėjus intensyviai plėtoti Klaipėdos uostą, mokslininkams dalyvaujant tarptautiniuose projektuose, intensyviau atliekami moksliniai tyrimai šia kryptimi. Iš tokių tyrimų galima pažymėti: A. Baublio mokslinius darbus, kurie skirti transporto rūšių plėtrai ir sąveikai (Baublys 2007), V. Paulausko mokslinius darbus, kurie skirti laivų manevrinių savybių, esant dideliame gyliui, ir uosto plėtros tyrimams (Paulauskas 2000 D; 2006; 2011; Paulauskas D., Paulauskas V. 2009; Paulauskas D. 2013), B. Plačienės ir kitų darbus, kurie skirti uostų tarpusavio sąveikai ir trumpajai jūrinei laivybai (Plačienė et al. 2007), V. Paulausko ir D. Paulausko mokslinį darbą, kuris skirtas laivo valdymui uoste (Paulauskas

D., Paulauskas V. 2009). Minėtų autorių darbai yra svarbūs, nors jie neatliko išsamių tyrimų dėl laivų manevrinių savybių, esant mažam gyliui, nevertino laivų manevrinių parametrų, planuojant uosto plėtrą ir nustatant optimalius uosto infrastruktūros (kanalo gylis, uosto akvatorijos, apsisukimo baseinų ir kt.) parametrus.

A. Baublio darbe tirtos uosto infrastruktūros parametrų sąsajos su kelių transportu, tai labai svarbu, siekiant išnaudoti uosto pajėgumus (Baublys 2001), bet tik iš dalies įvertinti į uostą įplaukiančių laivų parametrai.

V. Paulauskas (Paulauskas 2000A) tyrė laivybos klausimus, kurie susiję su didžiųjų konteinervežių įplaukimo į Baltijos jūros uostus galimybėmis, bet šiame darbe netyrė laivybos saugumo, priimant į uostus didžiausius galimus konteinervežius, ypatumų ir šių laivų plaukimo uosto įplaukos kanaluose sąlygų. Mokslininkas tyrė ir laivų manevrines savybes (Paulauskas 1994; 1999B), bet neanalizavo jų ryšio su laivų plaukiojimo uoste sąlygomis, galimos uosto infrastruktūros plėtros. Kai kurie atlikti tyrimai (Paulauskas 2000D; 2006) susiję su uostų plėtra, bet ne visiškai įvertinta uosto infrastruktūros plėtra, atsižvelgiant įplaukiančių laivų manevrines savybes. Kituose tyrimuose nagrinėjama uostų plėtra, atsižvelgiant į ekonominius ir saugos veiksnius (Paulauskas 2011; Jurevičius et al. 2009), bet neapartas tiesioginės uosto infrastruktūros plėtros atitikimas įplaukiančių laivų manevrinėms savybėms.

B. Gailiušio (2001), J. Kriauciūnienės ir bendraautorių (2013) tyrimai apima galimus didžiausius gylius uoste, planuojant gilinimo darbus, tačiau nenagrinėti saugios laivybos uostų prieigose ir uostuose klausimai.

B. Plačienės ir kitų mokslininkų tyrimuose (Plačienė et al. 2007) nagrinėti kanalų gyliai uostuose, bet liko neaparti klausimai, susiję su kanalo parametrų tobulinimu ir kaip tai galima išnaudoti žinant laivo manevrines savybes.

Plėtojant ro-ro vežimus Klaipėdos uoste atlikta nemažai tyrimų, kurie susiję su ro-ro laivybos plėtra, iš jų galima pažymėti R. Maksimavičiaus darbus (Maksimavičius 1999; Maksimavičius et al. 2001), kuriuose nagrinėti ro-ro laivų ekonominiai, saugios laivybos aspektai, bet netirtos racionalaus uosto infrastruktūros panaudojimo galimybės.

Lietuvos mokslininkai atliko nemažai intelektinių transporto sistemų tyrimų, kurie svarbūs uostų plėtrai. Čia galima paminėti A. Jarašūnienės (Jarašūnienė 2008), A. Jurkausko (Jurkauskas 2004) ir kitų darbus.

Lietuvos mokslininkai tyrė būtiną uosto akvatorijų ir kanalų gylį, būtiną minimalų klirensą, bet mažai nagrinėjo laivo manevrinių savybių išnaudojimo, esant mažam gyliui, atsižvelgiant į laivų konstrukcines ypatybes, klausimus.

Nepakankamai iširtas hidrodinaminis „sparno“ efekto poveikis laivo manevravimui uoste, plukdant navigaciniais kanalais, kas neleidžia efektyviai išnaudoti uosto infrastruktūros. Dėl to mažėja uosto konkurencingumas, atliekamos papildomos uosto operacijos (peršvartuojamas laivas), o tai lemia papildomas laivo uoste laiko sąnaudas, atitinkamai ir papildomas išlaidas.

1. Laivų manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros tyrimų analizė

Taigi galima teigti, kad Lietuvos mokslininkų indėlis į uostų ir vandens kelių plėtos tyrimus yra nemažas, šių tyrimų pagrindu buvo ir yra plėtojamas Klaipėdos uostas, paruošti Šventosios mažųjų laivų ir Būtingės giliavandens uostų projektai, vis dėlto dar lieka nemažai netirtų sričių, kurios susijusios su laivų manevravimo galimybėmis, esant mažam uosto gyliui, manevruojant ypač ribotomis sąlygomis. Tokios laivų manevravimo sąlygos būdingos uostams ir vandens keliams, todėl įvertinus laivo manevravimui būtinus uosto kanalo bei akvatorijos geometrinius parametrus, galima juos optimizuoti, kartu užtikrinant ir saugios laivybos sąlygas.

Užsienio šalių, ypač Belgijos, Nyderlandų, Prancūzijos, mokslininkų tyrimai apima įvairius uostų ir vandens kelių plėtos aspektus, minimalių gylių uostuose ir jų kanaluose skaičiavimą, ypač daug dėmesio skiriama potvynių ir atoslūgių poveikiui, laivų plukdymui per vadinamąjį „leistinąjį langą“, tai 1 valanda iki maksimalaus potvynio lygio ir 1 valanda po maksimalaus potvynio lygio (Desaulniers et al. 2000).

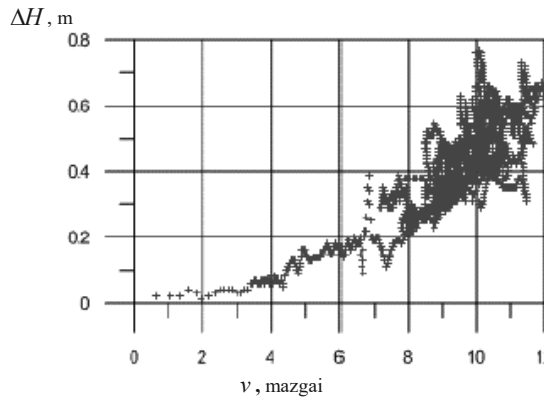
Atliekami moksliniai tyrimai, taikant simuliacinį modeliavimą, ypač Danijoje, Olandijoje, kur nemažai nagrinėjamas galimas minimalus gylis (Hagath et al. 1994; Theirs et al. 1998). Čia ypatingas dėmesys skiriamas tiksliam uostų infrastruktūros parametrų nustatymui taikant simuliacines priemones. Nemažai tyrimų atlikta Prancūzijoje, ištirtos laivų plukdymo Senos upe iki Ruano uosto sąlygos (PIANC 2010). Panašūs tyrimai atlikti Jungtinėje Karalystėje, JAV ir kitose šalyse (Fagerholt 1999; Köse et al. 2003; Somanathan et al. 2009; Gucma et al. 2018).

Kaip pavyzdį galima pateikti laivų „prasėdimo“ didėjant plaukimo greičiui tyrimus, atliktus Senos upėje nuo deltos iki Ruano uosto (1.3 pav.). Šioje Senos upės dalyje plaukioja jūriniai laivai, kurių dedveitas (DWT) sudaro iki 40 000 tonų, maksimali laivų grimzlė – iki 9,8 m. Laivai, kurių grimzlė didesnė kaip 6,5 m, plaukia į Ruano uostą ir iš jo laikydamiesi „leistinojo lango“ principo, todėl jų „prasėdimo“ didėjant plaukimo greičiui tyrimai ypač svarbūs. Tyrimai atlikti Senos upėje – nuo deltos iki Ruano uosto, jūriniuose laivuose, kurių bendrasis pilnumo koeficientas – 0,65–0,75. Jų rezultatai (PIANC 2010) pateikti 1.3 paveiksle.

Panašios problemos nagrinėjamos Y. Zhongzhen'o ir bendraautorių darbe (Zhongzhen et al. 2014), esant ribiniam gyliui, tačiau jie netyrė laivų manevravimo problemų, esant mažam gyliui.

Atlikta nemažai mokslinių tyrimų, kurie susiję su transporto rūšių sąveikos uostuose simuliacinių programų kūrimu (Adamko et al. 2005; Backeberg 1999; Wei Zhaug et al. 2017), bet juose nenagrinėti laivybos saugumo klausimai, esant ribotoms plaukiojimo sąlygoms.

E. Barsari tyrė laivo tiltelio ir mašinų skyriaus komunikavimo klausimus (Barsari 2006), kurie ypač svarbūs laivybos saugumui, bet netyrė laivo manevravimo parametrų ir nesiejo jų su uostų bei kanalų gyliu ir kitais laivų plaukiojimui svarbiais parametrais.



1.3 pav. Laivo „prasėdimo“ matavimo rezultatai (PIANC 2010)

Fig. 1.3. Ships „squat“ experimental results (PIANC 2010)

H. Chang-Ing'as su bendraautoriais (Chaug-Ing et al. 2007) tyrė laivų įplaukimo į uostą klausimus, laivybos saugumą, bet neaptarė laivo manevrinių savybių ir uosto gylio bei kitų jų parametrų suderinamumo klausimų.

Chun-Ki Leel su bendraautoriumi (Chun-Ki Leel et al. 2008) tyrė hidrodinaminę laivo ir uosto seklos sąveiką, tai ypač svarbu planuojant uostų įplaukos ir vidinius navigacinius kanalus, bet šiame darbe nevertintos laivų manevrinės savybės, atsižvelgiant į laivų konstrukciją, vairo ir sraigto komplekso charakteristikas.

E. Demirci tyrė uosto plėtros ir tam būtinų investicijų planavimo modelius, kurie svarbūs, siekiant optimizuoti uosto infrastruktūrą (Demirci 2003; Tan et al. 2018), bet neaptarė laivybos saugumo uoste ir jo prieigose aspektų.

K. Fagerholt nagrinėjo optimalių laivų projektavimo konkretiems vandens keliams klausimus (Fagerholt 1999), bet neaptarė uosto infrastruktūros ir laivybos saugumo klausimų.

Ch. Gung-Rong'as ir F. Ming-Chung'as tyrė hidrodinaminę prasilenkiančių laivų sąveiką bandomajame baseine, esant bangavimui (tai atitinka uosto įplaukos kanalų sąlygas), bet neatliko eksperimentinių tyrimų su realiais laivais, todėl galimos didelės paklaidos gautus rezultatus taikant realiomis sąlygomis (Gung-Rong et al. 2001).

I. Akio ir bendraautoriai tyrė konteinerinių laivų įplaukimą į skirstymo uostus (Akio et al. 2009), bet jų tyrimai neapėmė laivų manevrinių parametrų, į kuriuos reikia atsižvelgti projektuojant uostų infrastruktūrą.

E. Kose ir bendraautoriai tyrinėjo laivų judėjimo Bosforo sąsiauryje sąlygas (Kose et al. 2003), bet netyrė sąsiaurių geometrinių parametrų įtakos laivų manevrinėms savybėms.

Belgijos mokslininkai tyrė uostų gylis, galimybę išnaudoti potvynių ir atoslūgių efektą plukdant laivus, nagrinėjo uosto akvatorijos optimizavimo problemas, daugiausia tyrė konkrečias uosto vietas (prieigas prie uosto šliuzų) (Strubbe 1997).

1. Laivų manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros tyrimų analizė

Olandijos mokslininkų darbuose daug dėmesio skirta uostų gilinimo techninėms problemoms, laivų manevravimui esant mažam gyliui (Wijnolst et al. 1997), bet mažai tirti ir vertinti uostų akvatorijų bei laivų apsisukimo baseinų optimizavimo klausimai.

Anglijos ir kitų Vakarų Europos mokslininkų darbai, susiję su laivų plaukiojimu uostuose, dažniausia remiasi Didžiosios Britanijos standartais ir kitomis rekomendacijomis, pavyzdžiui, BS4963 (*British standart 4963*), kurie aprobuoti ir publikuoti norminiuose dokumentuose ir standartuose (BS 1994; 2003; PIANC 1995; 2002; EAU 2012), bet minėti standartai ir rekomendacijos priimti prieš keletą ar keliolika metų, o jų atnaujinimo procesas yra gana ilgas. Pavyzdžiui, BS 6349: 2000 (BS 1994; 2003) standartuose pateikti uosto infrastruktūros projektavimo ir eksploatacijos reikalavimai, bet tik minimaliai atsižvelgta į laivų manevrines savybes (tik bendri principai), išskyrus laivo lietimosi su krantine greitį. PIANC (angl. *Permanent International Association of Navigational Congresses*, PIANC 1995; 2002) rekomendacijos numato krantinių įrangos ir laivų dydžių ryšį, bet neapima laivų manevrinių savybių.

EAU (angl. *Recommendations of the Committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways*, EAU 2012) rekomendacijose pateikti uosto infrastruktūros projektavimo principai ir metodai, bet nepakankamai atsižvelgta į laivų manevrines savybes, į kurias vis dėlto reikėtų atsižvelgti, norint parinkti optimalų uosto kanalų gylį ir kitus akvatorijos parametrus.

Anglijos ir kitų šalių mokslininkų darbuose (Peckham 2001) kruopščiai ištirtos problemos, susijusios su laivų plukdymu esant maksimaliam vandens lygiui (potvyniui), bet netirtos laivų manevrinės savybės, neįvertintos laivo konstrukcinės ypatybės, laivų „prasėdimas“, esant ribiniam gyliui.

Nemažai užsienio šalių mokslininkų darbų susiję su simuliacinės įrangos naudojimu modeliuojant uostų infrastruktūrą (Barsan 2006; Demirci 2003; Hagath et al. 1994). Darbuose analizuojamos treniruoklių (simuliatorių) kūrimo problemos ir jų sprendimo būdai, kreipiant dėmesį į ekonominius aspektus, bet dažnai juose naudojamos laivų manevrinės savybės netikslios, todėl jais gaunamus rezultatus būtina koreguoti.

Y. Hatach'as ir bendraautoriai (Hatach et al. 1994) tyrinėjo uostus, kurie modeliuojami naudojant treniruoklius, bet ir čia neatsižvelgta į laivų manevrines savybes plaukiant ribotomis sąlygomis, į kurias reikėtų atsižvelgti planuojant uostų infrastruktūros plėtrą. Analogiškus tyrimus atliko H. Hensen'as (Hensen 1999). K. Strem'as (Strem 2004) savo darbe daugiausia susitelkė ties saugios laivybos klausimais ir nenagrinėjo infrastruktūros parametrų.

Pažymėtina, kad daugelyje treniruoklių naudojami „standartiniai“ laivai. Šie treniruokliai dažnai neįvertina laivo konstrukcinių ypatumų, tikslaus kanalo gylio, kuris būtinas jam manevruoti, todėl prieš juos naudojant uostų plėtros tikslams būtina įvertinti laivo manevrines savybes ir laivų parametrus treniruokliuose papildyti bent keliais realiems laivams būdingais elementais, tada tik naudoti atliekant tyrimus, taip mažinant galimas paklaidas.

Ypač tikslios navigacinės sistemos uostui yra svarbios, nes jas turint galima tiksliau nustatyti uosto kanalų, akvatorijų, laivų apsisukimo baseinų ribas ir laivo vietą, optimalius uosto parametrus, gilinimo darbų apimtis, taip užtikrinant uoste saugią laivybą. Šias temas nagrinėjo T. B. Boffey'us su bendraautoriais (Boffey et al. 1979), T. Cakmak'as su bendraautoriumi (Cakmak et al. 2007) ir kiti mokslininkai. A. Amberton'o darbe atlikti tyrimai apėmė jūrų transporto problemas, tačiau neakcentuotos laivo manevrinės savybės, į kurias svarbu atsižvelgti nustatant optimalius uosto infrastruktūros parametrus, neapibrėžtas navigacinių matavimų tikslumas (Amberton 1995).

T. B. Boffey'aus ir bendraautorių darbe pateikti laivų dvipusio judėjimo tyrimai ypač svarbūs, siekiant užtikrinti laivybos saugumą (Boffey et al. 1979), šiame darbe priimti vidutiniai laivų parametrai, nekonkretizuojant jų manevrinių savybių, netaikytos tikslios navigacinės sistemos, į jas neatsižvelgta parenkant uosto infrastruktūros parametrus. T. Catmak'as ir bendraautoriai (Catmak et al. 2007) tyrė jūrų transporto problemas atsižvelgdami į vieną kriterijų, tarpusavyje nederindami laivo manevrinių savybių, naujų navigacinių sistemų ir optimalių uosto infrastruktūros parametru.

J. J. Evans'as su bendraautoriumi (Evans et al. 1997) tyrė finansinę jūrų transporto pusę, kuriai įtakos turi naujausių navigacinių sistemų naudojimas, siekiant optimizuoti uostų ir vandens kelių infrastruktūros parametrus.

Nemažai mokslinių darbų sietini su bendromis transporto problemomis: vertinamas tyrimo pobūdis ir poreikis konkrečiu laikotarpiu, laivo valdomumo savybių tyrimai ir rezultatų panaudojimas skaičiuojant uosto infrastruktūros parametrus (Alderton 1995; Casey et al. 2000; Cascetta et al. 2001; Coyle et al. 1997; Fagerholt 1999; Sussman 2000; Goulias 2003; Ortuzar et al. 2004; Browne 2014; Aleksandridis et al. 2018; Kisialiou et al. 2018 ir kiti). Jie yra svarbūs tiriant uostų ir vandens kelių perspektyvas, kartu ir galimus optimalius vandens kelių bei uostų infrastruktūros parametrus.

Nemažai mokslinių tyrimų atlikta plėtojant konteinerių vežimą, kuris neišvengiamai susijęs su laivybos saugumu uosto prieigose ir uoste (Chaug-Ing et al. 2007; Eyre 2007; Wei Yim et al. 2004). Tyrimuose susitelkta daugiausia ties įplaukimo į uostus galimybėmis, neaptariant laivybos saugumo aspektų, neatsižvelgiant į laivų manevrines galimybes esant mažam gyliui. Tokios sąlygos būdingos daugeliui konteinerių terminalų.

Intensyvi ro-ro vežimų plėtra, ypač Baltijos jūroje, kurioje didžiausias pasaulyje ro-ro laivybos linijų tankis, paskatino mokslininkus susidomėti ir šia sritimi (Gross 2000), vis dėlto laivų manevrinės savybės ir čia neanalizuotos.

Pradėjus ES diegti trumpųjų nuotolių jūrų laivybos (angl. *Short Sea Shipping* – SSS) elementus, atlikta nemažai mokslinių tyrimų, siekiant kiek įmanoma sumažinti laivų plaukimo tarp uostų laiką, įvertinus ir uosto kanalų parametrus bei ekonominius klausimus (Brotcorne et al. 2000; García-Menéndez et al. 2009; Ancor et al. 2015), bet neatsižvelgta į laivams manevruoti būtinus uosto infrastruktūros parametrus.

1. Laivų manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros tyrimų analizė

Laivybos saugumas uoste ir jo prieigose neatsiejamas nuo žmogiškojo veiksnio, todėl tiriant laivo manevrinių savybių ir optimalių uosto infrastruktūros elementų parametrų parinkimą, siekiant užtikrinti būtiną laivybos saugumą, šia tema atlikta nemažai mokslinių tyrimų (Cho et al. 1996; Hee et al. 1999; Peckham 2001; Brian et al. 2005; Grech et al. 2008; Podvezko et al. 2013; Irannezhad et al. 2018), juose daug dėmesio skirta psichologiniams aspektams, organizuojant laivybą uoste, bet netirti saugumo aspektu ypač svarbūs laivų manevravimui uoste būtini parametrai.

Laivybos saugumui uoste ir jo prieigose užtikrinti ypač svarbu naudoti modernią navigacinę įrangą. Moksliniuose straipsniuose nagrinėjamos laivų manevravimo uostuose problemos (Bogdan et al. 1997; Cascetta et al. 2001; Breivik et al. 2004; Roger et al. 2005; Somanathan et al. 2009), bet netirtas laivo manevrinių savybių ir kanalo parametrų tarpusavio ryšys.

Modeliuojant laivo judėjimą uostuose simuliacinėmis programomis (Hagath et al. 1994; Hensen 1999; Theirs et al. 1998) pastebėtas svarbus jų trūkumas – koordinacinių neatitikimas, nes dalis elektroninių jūrlapių parengti remiantis popierinių jūrlapių, kuriuose koordinatės yra netikslios, informacija. Dėl matavimo netikslumų rengiant jūrlapius (dažnai taikyti tradiciniai jūriniai astronominiai metodai) pakeistos koordinatės (kariniais ar kitais tikslais), neatnaujinta jūrlapių informacija ir pan. Tokiais atvejais, atliekant uosto plėtros mokslinius tyrimus, būtina išanalizuoti esamą navigacinę, hidrologinę ir hidrografinę informaciją simulatoriuose, ją įvertinti bei atnaujinti.

Plėtojant uostus ir terminalus visada būtina įvertinti ir tarpusavyje suderinti ekonominius aspektus, uosto infrastruktūros elementus ir jų parametrus, paisant saugios laivybos reikalavimų. Šia tema paskelbta nemažai publikacijų (Evans 1997; Rahja 2000; Yang et al. 2000; Lo et al. 2001; Demirci 2003; Ancor et al. 2014; Gang Dong et al. 2018 ir kiti). Darbuose nagrinėjami uostų ir terminalų ekonominiai klausimai, įvertinant vidutinio skaičiuojamojo laivo charakteristikas. Tokiu atveju beveik neįmanoma nustatyti laivams manevruoti būtinų parametrų ir juos suderinti, siekiant parinkti optimalius uosto infrastruktūros parametrus.

Apibendrinant užsienio mokslininkų atliktus uosto plėtros, vandens kelių ir kitos uosto infrastruktūros tyrimus, tikslinga pažymėti, kad nepakankamai iširtos laivo manevrinės savybės esant ypač mažiems klirensams, neįvertintas hidrodinaminis „sparno“ efektas laivui, manevruojant ypač ribotomis sąlygomis.

Taigi galima teigti, kad užsienio mokslininkų paskelbti darbai yra labai svarbūs, juos galima plėtoti ir atlikti disertacijoje numatytus tyrimus, tačiau dėl nepakankamo laivo manevrinių savybių iširtumo, jų suderinimo su uostų kanalų, akvatorijų ir laivų apsisukimo baseinų optimaliais parametrais būtina atlikti tyrimus, kurie numatyti disertacijos tiksluose ir uždaviniuose.

1.2. Laivų manevrinės savybės, jų ryšys su uosto infrastruktūra

Transporto sistema apima transporto priemones (laivas, automobilis, traukinys, lėktuvas), infrastruktūrą ir superstruktūrą. Infrastruktūra – tai hidrotechninių ir inžinerinių statinių, navigacinių įrenginių, inžinerinių tinklų, kelių ir privažiuojamųjų geležinkelių kompleksas. Daugeliui infrastruktūros elementų įrengti reikia didelių investicijų, kurių atsipirkimas išdėstomas per keliolika ar keliasdešimt metų.

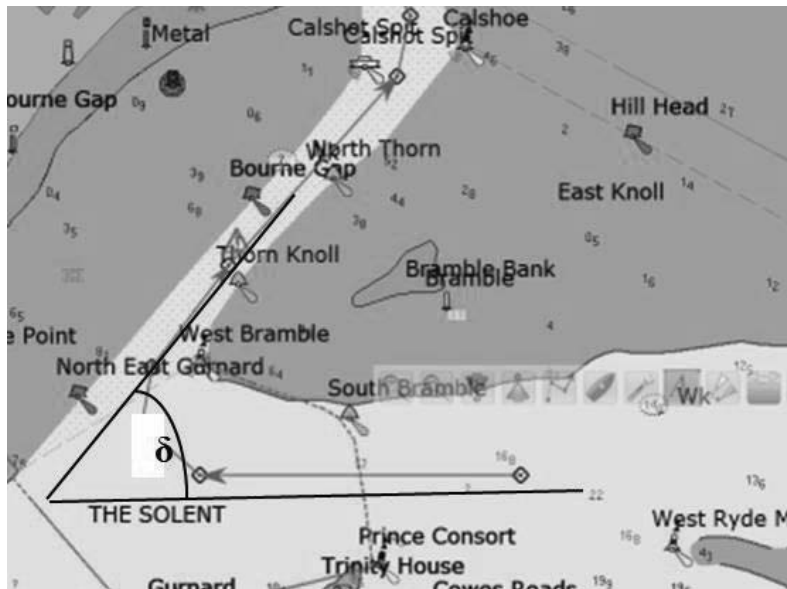
Uosto infrastruktūra turi derėti su didžiausių numatytų (skaičiuojamųjų) laivų parametrais ir charakteristikomis, užtikrinti būtinas laivų manevravimo sąlygas. Būtina pažymėti, kad oficialūs reikalavimai, tokie kaip SOLAS 74 konvencija (SOLAS 1974), nacionalinės įstatymų bazės, įvairios rekomendacijos ir standartai (BS 2003; EAU 2012) iki šiol nelabai atsižvelgdavo į laivų manevrinės savybes, esant mažam vandens gyliui. Planuojant uosto infrastruktūrą paprastai naudojamos bazinės skaičiuojamųjų laivų charakteristikos (ilgis, plotis, grimzlė), todėl neišvengiama netikslumų, kai pasikruose uostuose priimamas nepagrįstai didelis klirensas (atstumas tarp laivo korpuso ir kanalo dugno), kanalo plotis, laivų apsisukimo baseinų skersmenys, todėl vėliau uostą naudojant tenka papildomai investuoti į jo ir prieigų prie jo atnaujinimą arba nepagrįstai didinti laivų navigacinę riziką (Rahja 2000).

Šie klausimai ypač aktualūs tuose uosto įplaukos kanaluose, kuriais plaukia ribinių dydžių laivai ar kanalo konfigūracija yra labai sudėtinga (posūkliai – daugiau kaip 120–150 laipsnių), o gylis – minimalus.

Siekiant užtikrinti laivybos saugumą svarbūs uosto infrastruktūros tyrimai ir išankstinis uosto ribinių parametrų nustatymas. Pavyzdžiui, Sautamptono uosto įplaukos kanalas turi du posūkius, vieno kurių kampas – apie 130°, be to, kanale, posūkio vietoje, keičiasi gylis – nuo 28 m iki 17 m (esant maksimaliam potvynio lygiui sizigi-joje) (1.4 pav.). Kanalu plaukioja laivai, kurių grimzlė sudaro iki 15 m.

Sautamptono uosto įplaukos kanalo gylis, esant žemam vandens lygiui, siekia 13,5 m, kanalo posūklis yra apie 130°, todėl plaukiant į uostą dėl posūkyje sumažėjusio gylio ir padidėjusio srovės greičio bei ribotų galimybių tiksliai įvertinti laivo manevrinės galimybes gali didėti avarių tikimybė. Plaukiant tokiomis vietomis reikia imtis papildomų atsargos priemonių – pasitelkti vilkikus, o tai didina laivų, kartu ir krovinių vežimo sąnaudas.

Kitas pavyzdys gali būti Antverpeno uosto įplaukos kanalas Šeldos upėje. Jis turi 2 posūkius: *Hasweert* ir *Bath*, kurių posūkių kampai siekia atitinkamai iki 130° ir 165°. Didžiausių laivų, plaukiančių į Antverpeno uostą, parametrai sudaro: ilgis – iki 398 m, plotis – iki 56 m, grimzlė – iki 15,5 m (MEGA konteinerių vežimo laivai). Šeldos upėje, siekiant pagerinti laivų manevravimą, vilkikai naudojami tik išimtiniais atvejais, nes labai išauga papildomos sąnaudos. Tokiu atveju posūkiuose dažniausia ribojamas dvipusis eismas, praplaukiant dideliems laivams, tačiau tai ne visada pade- da išvengti laivų užplaukimo ant seklumos.



1.4 pav. Sautamptono uosto įplaukos kanalo posūkis $\delta \sim 130^\circ$ (Open Sea maps 2016)

Fig. 1.4. Southampton port approach channel bend $\delta \sim 130^\circ$ (Open Sea maps 2016)

Įplaukos į Antverpeno uostą kanalo Šeldos upėje ilgis – apie 80 km, juo plaukioja laivai, kurių grimzlė siekia iki 16,2 m. Veikiančios potvynių ir atoslūgių srovės bei upės tėkmė kasmet „suneša“ navigacinėje upės dalyje iki 20 mln. m³ sąnašinio grunto, kuris šalinamas žemsiurbėmis (Antwerp 2014).

Antverpeno uosto Hasverto (*Hasweert*) įplaukos kanalo posūkis (apie 165°) ypatingas tuo, kad šioje vietoje dėl upės deltos išsišakojimo dažnai keičiasi srovių pobūdis, todėl tai būtina įvertinti kiekvieno plaukimo metu. Nesant tikslių ir praktiškai naudotinų laivo judėjimo, esant mažam gyliui, trajektorijos vertinimo metodikų, tenka gerokai padidinti laivybos kanalo plotį, todėl šiame posūkyje palaikomas kanalo plotis sudaro apie 600 m.

Tuo tarpu kito Antverpeno uosto Bato (*Bath*) įplaukos kanalo posūkis (apie 135°) neturi upės vagų išsišakojimų, srovės pobūdis yra prognozuojamas, galima tiksliau numatyti laivo judėjimo trajektoriją, todėl reikia mažesnio navigacinio kanalo pločio. Šiame posūkyje minimalus navigacinio kanalo plotis – 280 m.

Plukdant į uostą labai didelius laivus reikia tikslios informacijos apie jų manevrines savybes esant mažam gyliui, laivų manevrinės charakteristikos turi atitikti kanalų konfigūraciją. Siekdami saugiai įplaukti labai dideli laivai stengiasi „laikytis“ ašinės navigacinio kanalo linijos.

1. Laivų manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros tyrimų analizė

Visos klaidos ir netikslumai, dideliems laivams plaukiant sudėtingais kanalais, jei neįvertinamos laivo manevrinės savybės, gali lemti didelę laivų avarijų (užplaukimo ant seklumos, laivų susidūrimo) tikimybę. 1.5 paveiksle parodyta, kaip Antverpeno uosto įplaukos kanale (Šeldos upėje) konteinernežiui užplaukus ant seklumos jo korpusas iš dalies lūžo ir dėl 3 dienas trukusios laivo gelbėjimo operacijos sumažėjo uosto įplaukos kanalo pralaidumas (į uostą ir iš jo neplukdyti dideli laivai, kurių ilgis – 300 m ir daugiau).



1.5 pav. Ant seklumos Šeldos upėje užplaukęs konteinernežis (Marine traffic)

Fig. 1.5. Grauded container vessel in Shelda river (Marine traffic)

Laivams apsisukant uosto laivų apsisukimo baseinuose dėl išorinių jėgų poveikio kinta jų manevrinės savybės. Laivams įplaukiant į uostus ir išplaukiant iš jų dažnai užsakomi papildomi – arba nepagrįstai didelio galingumo (traukimo jėgos), arba, neįvertinus tam tikrų pokyčių, per silpni – vilkikai, kas didina arba laivybos sąnaudas, arba laivų manevravimo (navigacinę) riziką.

Tyrėjai (Paulauskas 2006; Paulauskas D. 2013; Maksimavičius et al. 2001) ištyrė laivuose turimą laivų manevrinių parametrų informaciją. Atlikus tyrimą nustatyta, kad nemažai laivų naudoja netikslius laivų manevrinių charakteristikų duomenis.

Labai trūksta informacijos apie laivo manevravimo parametrus esant mažam gyliui. Nustatyta, kad informacija apie laivų manevravimui būtinus uosto kanalų matmenis beveik nenaudojama planuojant uosto infrastruktūros plėtrą, apsiribojama tik vidutiniais dydžiais (Chowdhury et al. 2003; Maksimavičius et al. 2001).

Lietuvos ir kitų šalių laivų, atplaukiančių į Klaipėdos uostą, patikrinimai, atlikti Uosto valstybės kontrolės inspektorių, bei laivo manevrinių savybių informacijos analizė atskleidė (PM 2014), kad:

1. Laivų manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros tyrimų analizė

- apie 80 % laivų turi informaciją apie laivo manevrines savybes esant dideliam gyliui;
- apie 30 % laivų turi informaciją apie laivo manevrines savybes esant mažam gyliui, kaip to reikalauja SOLAS 74 konvencija (SOLAS 1974), kai laivo grimzlės (T) ir gylio (H) santykis $T/H = 0,8$, nors uostuose paprastai didžiausių į uostą įplaukiančių laivų grimzlės ir gylio santykis $T/H = 0,93-0,96$;
- apie 20 % laivų iš viso neturi rašytinės informacijos apie laivų manevravimo parametrus (manevrinių elementų lentelių, locmano kortelių ir kt.) (PM 2014).

Kadangi laivuose turimos informacijos apie jiems manevruoti būtinus parametrus nepakankama, planuojant uosto infrastruktūrą paprastai remiamasi įvairiomis rekomendacijomis, tokiomis kaip PIANC (PIANC 2005), EAU (EAU 2012), BS (BS 2003; 1994) ir kitomis, kurios yra tik bendro pobūdžio.

Remiantis atliktos analizės rezultatais akivaizdžiai matyti, kad siekiant racionaliai planuoti uosto infrastruktūros plėtrą, būtina žinoti įplaukiančių laivų manevrines savybes, esant dideliam ir mažam gyliams. Tuo tikslu būtina sukurti tikslesnius laivų manevrinių savybių vertinimo metodus. Gautus laivų manevravimo duomenis panaudoti projektuojant ir statant uosto įplaukos kanalus bei laivų apsisukimo baseinus. Be to, svarbu sukurti metodus, kurie padėtų tiksliau nustatyti būtiną minimalų vilkikų galumą, atsižvelgiant į laivo manevrines savybes. Būtina įvertinti papildomų išorinių jėgų poveikio įtaką. Planuojant uosto kanalų ir laivų apsisukimo baseinų parametrus, įvertinti didžiausio skaičiuojamojo laivo manevrines charakteristikas. Kita vertus, atsižvelgiant į esamus uosto infrastruktūros parametrus, nustatyti galimą didžiausių laivų, kurie galėtų įplaukti į uostą, dydį, siekiant užtikrinti laivybos saugumą.

1.3. Pirmojo skyriaus apibendrinimas

Šiame skyriuje minėta, kad Lietuvos ir užsienio šalių mokslininkai atliko nemažai mokslinių tyrimų, kurie susiję su uosto dalių – kanalų, akvatorijų, laivų apsisukimo baseinų ir kitos uostų infrastruktūros – optimalių parametru vertinimu. Vis dėlto daugelyje Lietuvos ir užsienio mokslininkų paskelbtų darbų neminama, kaip racionaliai suplanuoti infrastruktūrą, įvertinus kanalų gylį ir apsisukimo baseinų plotus, kas būtina, siekiant užtikrinti saugų laivų manevravimą. Esamuose laivų manevravimo treniruokliuose nepakanka informacijos apie įvairius laivų modelius ir jų manevrines savybes, todėl gaunami rezultatai neleidžia iki galo gautais treniruoklių rezultatais pasitikėti.

Apibendrinant Lietuvos ir užsienio mokslininkų atliktus tyrimus apie uosto plėtos galimybes, vandens kelius ir kitus uosto infrastruktūros elementus, galima pažymėti, kad nepakankamai iširtos laivo manevrinės savybės ir manevravimo galimybės esant ypač mažiems klirensams, mažai iširtos ir įvertintos laivo manevravimo galimybės ribotomis sąlygomis, esant srovei. Minėtos sąlygos atitinka kai kurių uostų ir ribotų

1. Laivų manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros tyrimų analizė

parametrų kanalų bei kitų vandens kelių ir laivų apsisukimo baseinų sąlygas, kurių neįvertinus, prireiks nepagrįstai didelių papildomų uosto navigacinių kanalų pločio ir gylis atsargų.

Nepakankama uostuose turima navigacinė informacija riboja galimybes teisingai parinkti optimalius uosto infrastruktūros parametrus.

Taigi atlikus Lietuvos ir užsienio šalių mokslininkų skelbtų darbų, kuriuose analizuojamas uosto gylis nustatymas, uosto navigacinių kanalų ir laivų apsisukimo baseinų parametrai (atsižvelgiant į laivų manevrines galimybes, jų konstrukcines ypatybes, navigacinės informacijos išsamumą, tikslumą ir patikimumą), analizę, galima teigti, kad metodikų, kurios leistų tiksliai nustatyti laivui manevruoti būtinus uosto parametrus (kanalo gylis, apsisukimo baseinas ir kt.), nepakanka. Tai ypač aktualu, esant mažam uosto gyliui.

Taigi nurodytos problemos iširtos rengiant disertaciją, siekiant nustatyti tikslus, praktiškai priimtinius ir taikytinus laivų manevrinių savybių skaičiavimo ir vertinimo metodus, suderinti juos su uosto infrastruktūros planavimu, užtikrinant laivybos saugumą uostuose bei jų prieigose.

Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų manevrinių parametru tyrimas

Pagrindinis tyrimo objektas planuojant ir vykdant uostų plėtrą yra į tiriamą uostą galintys įplaukti laivai. Tikslios laivų įplaukimo ir manevravimo judesių atlikimo galimybės tiesiogiai susijusios su uosto infrastruktūros, jos akvatorijų, kanalų, laivų apsisukimo baseinų techniniais parametrais. Todėl svarbu iširti laivų plaukimo ir manevravimo parametrus uostų sąlygomis, esant nedideliame vandens gyliui, ribotiems akvatorijų ir kanalų parametrams ir, remiantis gautais rezultatais, pateikti uosto infrastruktūros parametrus: gilio uosto kanaluose ir akvatorijose, kanalų geometrinius parametrus.

2.1. Laivo manevravimo uoste eksperimentiniai tyrimai

Siekiant nustatyti realius laivo manevravimo uoste parametrus, esant mažam gyliui, pasirinkta atlikti laivo judesių matavimus simuliacinėmis ir realiomis sąlygomis. Atlikti eksperimentiniai laivo manevravimo parametru realiomis sąlygomis, laivui plaukiant į uostą ir manevruojant jame, tyrimai.

2.1.1. Laivo manevravimo uoste eksperimentų atlikimo metodika

Sukurta eksperimentų atlikimo metodika (2.1 pav.) remiasi trijų etapų principu:

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

1. Pradinių duomenų apie tiriamus laivus kaupimas ir analizė. Matavimų įrangos kalibravimas.
2. Simuliaciniai laivo manevravimo uoste tyrimai treniruokliu. Paklaidų vertinimas.
3. Eksperimentiniai matavimai realiomis sąlygomis, jų rezultatų analizė, palyginimas su rezultatais, kurie gauti atlikus tyrimus treniruokliais, bei skaičiavimo rezultatais.

Pirmame etape atliekami analitiniai skaičiavimai ir vertinimai, remiantis turimais realių objektų (laivų, kitų objektų) faktiniais duomenimis kalibruojama tyrimų įranga. Taikomi du įrangos kalibravimo metodai:

1. Jei pakanka realių objektų faktinių duomenų, koreguojami skaitmeniniai blokai, siekiant nustatyti kuo realesnes objektų savybes (laivų eigos, manevrines ir panašiai).
2. Jei realių objektų faktinių duomenų nepakanka, skaičiuojamos konkrečių parametų pataisos ir galimos paklaidos (laivo linijinio ir kampinio sukimosi greičių, esant ribotam gyliui, trajektorijos parametų ir panašiai).

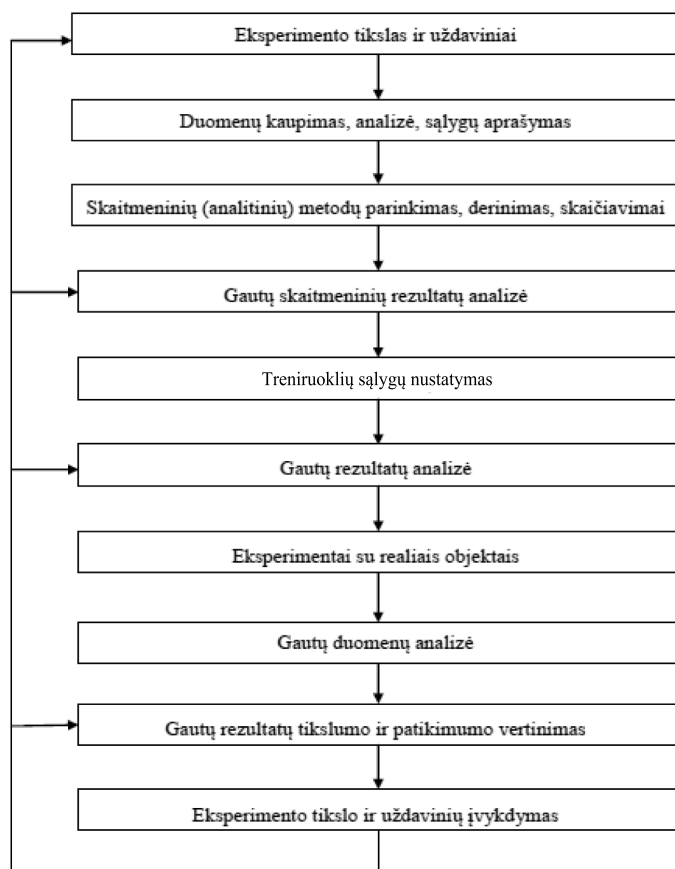
Antrame etape, sukalibravus vizualųjį laivo tiltelio treniruoklį konkrečiam eksperimentui, atliekami bandymai šiuo treniruokliu ar kitais simulatoriais, taip sukaupiamas reikiamas duomenų kiekis ir skaičiuojamos paklaidos, pavyzdžiui, maksimalios distribucijos metodu (Paulauskas 2013). Šiame etape gauti rezultatai dar kartą tikrinami analitiniais metodais.

Trečiame etape atliekami eksperimentai su realiais objektais (laivais), kurie tiksliai atitinka skaičiuojamuosius arba yra į juos panašūs. Įvedus atitinkamas pataisas, analizuojami gauti rezultatai ir įvertinamos galimos jų paklaidos. Šiame etape paprastai naudojama ypač tiksli navigacinė įranga (pavyzdžiui, „E-Sea Fix“, AIS-LERS, AIS), siekiant gautų rezultatų tikslumą ir patikimumą patvirtinti analitiniu būdu bei naudojant treniruoklius ar kitus simulatorius (pavyzdžiui, OPTIMOOR [OPTIMOOR 2010]).

Atlikus išsamius analitinius ir eksperimentinius tyrimus, analizuojami gauti rezultatai, skaičiuojamos jų paklaidos ir rengiamos išvados.

Kadangi kiekviena įranga turi savų privalumų ir trūkumų bei ribotumą, siekiant nustatyti pastarųjų įtaką galutiniam rezultatui, reikia atlikti išsamius mokslinius tyrimus (teorinius ir praktinius), taip galima gerokai padidinti galutinių rezultatų patikimumą bei sumažinti galimų paklaidų.

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...



2.1 pav. Eksperimentų atlikimo metodika (seka) (Paulauskas D.)

Fig. 2.1. Methodics for execution of experiments (Paulauskas D.)

2.1.2. Matavimo įranga

Eksperimentams ir eksperimentiniams tyrimams atlikti naudota ypač tiksli navigacinė įranga, laivo simulatoriai, uostuose ir laivuose esama laivų vietos bei jų judėjimo parametrų registracijos įranga (2.1 lentelė).

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

2.1 lentelė. Laivo judėjimo uoste matavimo įranga

2.1 table. Measurement equipment for vessel movement in port

Įrangos pavadinimas	Paskirtis	Tikslumas
Navigacinė įranga (E-Sea Fix 2012)	<p>Matuoti realių laivų manevrines savybes ir tikrinti, ar jos atitinka skaitiniu būdu gautus rezultatus. Įranga dirba trimis režimais:</p> <p><i>planavimo režimas</i> – užduodami plaukimo maršrutai ir taškai, pro kuriuos turi praplaukti laivas;</p> <p><i>navigacinis režimas</i> – nustato laivo padėtį elektroniniame jūrlapyje, parodo laivo judėjimo parametrus, laivo nukrypimo nuo užduotos plaukimo linijos dydžius, naudojamų palydovų skaičių, kokių režimu dirba įranga (GPS, DGPS ar RTK);</p> <p><i>švartavimo režimas</i> – pateikia laivo padėtį elektroniniame jūrlapyje, laivapriekio ir laivagalio judėjimo vektorius, laivo kurso ir kelio kryptį bei laivo sukimosi kampinį greitį</p>	<p>GPS – 3÷5 m; DGPS režimo (atstumas nuo DGPS atraminių stočių – iki 10 jūrmylių) tikslumas – iki 0,5 m, nuolat fiksuojant X, Y, Z koordinates, greičius, pagreičius, DGPS pataisas; RTK režimo, naudojantis RTK atramine stotimi, kuri nutolusi iki 10 jūrmylių, – ne daugiau kaip 3–5 cm, nuolat fiksuojant X, Y, Z koordinates, greičius, pagreičius. Padėties fiksavimo tikslumas: horizontalus – ne daugiau kaip 10 mm; vertikalus – ne daugiau kaip 40 mm; objekto greitis – iki 1 cm/s; kursas (kryptis) – iki 0,2 laips.; objekto kampinis sukimosi greitis – iki 0,3 laips./min</p>
Laivo tiltelio treniruokliai (SimFlex 2012; SimFlex 2014)	<p>Atlikti laivo valdomumo tyrimus ir nustatyti laivo valdomumo ryšį su uosto infrastruktūros elementų parametrais, be to, įvairius eksperimentus, kurių rezultatus vėliau būtina patikrinti realiomis sąlygomis su realiais laivais, naudojant ypač tikslią navigacinę įrangą (pavyzdžiui, „E-Sea Fix“ sistemą, laivų automatinio nustatymo (reguliavimo) sistemą AIS arba AIS-LERS)</p>	<p>Analogiškas „E-Sea Fix“ sistemos tikslumui</p>
Automatinė laivų padėties nustatymo sistema (AIS), integruota su laivų eismo reguliavimo sistema (AIS-LERS 2015)	<p>Faktiniams laivų judėjimo parametrams fiksuoti ir palyginti juos su gautais skaitmeniniais rezultatais</p>	<p>Laivo padėties fiksavimas elektroninio jūrlapio mastelyje – 10–12 m, laivo greitis – 0,2 m/s, laivo sukimosi kampinis greitis – iki 1 laips./s</p>

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

Įrangos pavadinimas	Paskirtis	Tikslumas
Laivų švartavimo simulatorius (OPTIMOOR 2010)	Laivų švartavimo parametrų, įvairioms nestandartinėms situacijoms švartuojantis modeliuoti ir tirti. Gali būti naudojamas tiek laivo įgulos, tiek uosto / terminalų darbuotojų mokymams	
Lazerinė sistema „Dockmaster 3“ vertinti laivų artėjimo prie krantinės parametrai	Ypač tiksliam laivo artėjimo prie krantinės greičiui ir atstumui fiksuoti, laivo judesiams, stovint prie krantinės, matuoti	Nuotolis – iki 3 mm, greitis – iki 0,2 cm/s

Navigacinė ir gylio matavimo įranga turi būti tiksli bei patikima, siekiant užtikrinti saugų laivo manevravimą uoste. Todėl vis kuriama naujesnė, tikslesnė įranga.

Laivų turima navigacinė įranga paprastai tenkina esamus reikalavimus, bet ne visi laivai turi pačią naujausią. Savaimė suprantama, kad naujos įrangos diegimas užima daug laiko, be to, tam reikia nemažų investicijų, todėl naujausios įrangos diegimas laivuose paprastai atidedamas, o ją įdiegus dažnai išnaudojamos ne visos įrangos galimybės.

Pavyzdžiui, Klaipėdos uoste įdiegta nauja uosto navigacinė sistema „E-Sea Fix“ (E-Sea Fix 2012), laivų švartavimo ir stovėjimo prie krantinės lazerinė kontrolės sistema „Dockmaster-3“ (LNS 2003), kartu su išorinio poveikio veiksnių (vėjo, bangavimo, srovių) matavimo stotimis. Visos jos integruotos į bendrą sistemą, kuri leidžia tiksliau išmatuoti laivo vietą uosto kanaluose ir akvatorijoje, prognozuoti laivo trajektoriją į priekį nuo 1-os iki 12-os minučių, esant konkrečiai situacijai, nustatyti krantinės ir jos įrangos apkrovas laivui stovint prie krantinės.

Mobilioji „E-Sea Fix“ sistema (E-Sea Fix 2012), AIS (automatinė padėties nustatymo sistema) integruota su uosto LERS (laivų eismo reguliavimo sistema) (AIS-LERS 2015), atvirąja AIS (AIS 2015), laivo tiltelio vizualieji treniruokliai „Simflex Navigator“ (SimFlex 2012) ir „SimpFlex 4“ (SimFlex 2014) naudoti tiriant treniruokliais ir matuojant realių laivų judėjimą kanaluose bei uostų akvatorijose. „E-Sea Fix“ sistema (E-Sea Fix 2012) naudota matuojant realių laivų manevrines savybes ir tikrinant, ar jos atitinka analitiniu būdu gautus rezultatus. Be to, laivų plaukimo ir manevravimo parametrai Klaipėdos bei kituose uostuose fiksuoti AIS-LERS ir AIS (AIS-LERS 2015; AIS 2015). Vizualieji laivo tiltelio treniruokliai, juos kalibravus pagal realius laivus (SimFlex 2012; 2014), naudoti atliekant bandymus ir analizuojant analitiniais tyrimais gautus rezultatus.

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

„E-Sea Fix“ sistema (2.2 pav.) dirba trimis režimais: planavimo režimas leidžia užduoti plaukimo maršrutus ir taškus, pro kuriuos turi praplaukti laivas; navigacinis režimas leidžia nustatyti laivo padėtį elektroninio jūrlapio mastelyje, laivo judėjimo parametrus (laivo greitį vandens ir dugno atžvilgiu, jo sukimosi kampinį greitį), laivo nukrypimo nuo užduotos plaukimo linijos dydžius, naudojamų palydovų skaičių, koku režimu dirba GPS (globalinė padėties nustatymo sistema); DGPS (diferencialinė globalinė padėties nustatymo sistema); RTK (angl. *real time kinematic* – realaus kinematinio laiko).



2.2 pav. Ypač tiksli navigacinė įranga „E-Sea Fix“, kurios tikslumas RTK režimu – $\pm 2-5$ cm

Fig. 2.2. Very high accuracy navigation system, „E-Sea Fix“, which has accuracy in RTK mode – $\pm 2-5$ cm

Tyrimams naudota Klaipėdos universiteto laboratorijoje esanti navigacinė įranga „E-Sea Fix“, kurios tikslumas RTK režimu – $\pm 2-5$ cm.

Trečias – „E-Sea Fix“ švartavimo režimas pateikia laivo padėtį elektroninio jūrlapio mastelyje, laivapriekio ir laivagalio judėjimo vektorius, parodo laivo kurso ir laivo kelio kryptį, laivo sukimosi kampinį greitį.

„E-Sea Fix“ sistemos tikslumas dirbant DGPS ir RTK režimais: DGPS režimo (nutolimas nuo DGPS atraminių stočių – iki 10 jūrmylių) tikslumas – iki 0,5 m, nuolat fiksuojant X, Y, Z koordinates, greičius, pagreičius, DGPS pataisas; RTK režimo, naudojantis RTK atramine stotimi, kuri nutolusi iki 10 jūrmylių, – ne daugiau kaip 3–5 cm, nuolat fiksuojant X, Y, Z koordinates, greičius, pagreičius, RTK pataisas. Padėties fiksavimo tikslumas: horizontalus – ne daugiau kaip 10 mm; vertikalus –

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

ne daugiau kaip 40 mm; objekto greitis – iki 1 cm/s; kursas (kryptis) – iki 0,2 laips.; objekto kampinis sukimosi greitis – iki 0,3 laips./min.

Lazerinė „Dockmaster 3“ sistema, įdiegta Klaipėdos uosto krantinėse Nr. 1–2 ir SGD terminalo krantinėje (LNS 2003), naudojama laivo priartėjimo prie krantinės greičiui ir atstumui fiksuoti bei laivo judesiams, stovint prie krantinės, matuoti. Matuojama dviem lazeriais, kurie įrengti prie pagrindinės krantinės dalies. Matavimo tikslumas: greičio – iki 0,2 cm/s; atstumo – iki 3 mm. Taigi lazerine sistema „Dockmaster 3“ gaunami labai tikslūs laivo judesio, artėjant prie krantinės naudojant vilkikus ir / arba stūmas, parametrai, kuriais remiantis patikrinti analitiniai skaičiavimai.

AIS-LERS (automatinė padėties nustatymo sistema integruota su laivų eismo reguliavimo sistema, AIS-LERS 2015) tyrimuose naudota, siekiant nustatyti realių laivų manevrines savybes ir patikrinti analitinius laivo valdomumo parametrų skaičiavimo rezultatus, jų suderinamumą su uosto infrastruktūros elementų parametrais. AIS-LERS tikslumas atitinka kranto radiolokacinių stočių tikslumą laivo padėties, jo judėjimo parametrų atžvilgiu, t. y. laivo padėtis fiksuojama 10–12 m tikslumu (apskritiminės paklaidos spindulys), naudojant kranto radiolokatorių arba GPS, ir 1–3 m tikslumu, naudojant DGPS. Laivo greitis fiksuojamas 0,2 m/s, laivo kampinis sukimosi greitis –0,5 laipsnio per sekundę tikslumu.

LERS Klaipėdos uoste leidžia fiksuoti faktinius realių laivų judėjimo parametrus. Atviroji AIS (AIS 2015) leidžia fiksuoti laivo padėtį elektroninio jūrlapio mastelyje 10–12 m, laivo greitį – 0,2 m/s, laivo sukimosi kampinį greitį – iki 1 laipsnio per sekundę tikslumu. Nurodytas AIS tikslumas priimtinas tiriant laivų plaukimo ir manevravimo sąlygas, laivų manevrinių savybių suderinamumą su uosto infrastruktūros elementų parametrais, bet kartais naudinga pasinaudoti papildomomis laivo manevravimo parametrų fiksavimo (matavimo) priemonėmis, pavyzdžiui, stacionaria laivo įranga arba „E-Sea Fix“, arba kita panašia įranga.

Laivo tiltelio treniruoklis „Simflex Navigator“ modeliuoja uostų parametrus, jų dalis, tiria laivų plaukimo, esant ribinėms sąlygoms, situacijas. Vizualieji laivo tiltelio treniruokliai „Simflex Navigator“ (SimFlex 2012) ir „SimFlex 4“ (SimFlex 2014) kalibruoti, atsižvelgiant į realius laivus, ir naudoti įvairioms sąlygoms uostuose sukurti, laivų manevrinėms savybėms, esant įvairioms sąlygoms, laivų manevrinių savybių ir uostų infrastruktūros elementų suderinamumui tirti (2.3 pav.). Vizualieji treniruokliai leidžia sukurti įvairias laivų manevravimo, uosto infrastruktūros parametrų (gyliai, kanalų pločiai, apribojimai kanaluose ir akvatorijose, hidrometeorologinės, matomumo, laivų judėjimo bei prasilenkimo) sąlygas, įvertinti hidrodinaminį laivų ir laivo ar bet kurios kitos kliūtis (sekluma, krantinė, priešvartuoti laivai ir panašiai) tarpusavio poveikį.



2.3 pav. Laivo tiltelio treniruoklis „Simflex Navigator“

Fig. 2.3. Ship's bridge simulator „SimFlex Navigator“

Vizualiosios laivo tiltelio treniruoklių sistemos dalis – kalibruoti laivai: pradedant mažais laivais, pavyzdžiui, vilkikais, ir baigiant dideliais konteinernežiais ar labai didelės talpos (ULCC klasės) naftos tanklaiviais. Treniruokliuose pateikti įvairių uostų (apie 20) ir vandens kelių duomenys. Treniruokliais gaunamų rezultatų (laivo trajektorijos, laivo greičio, laivo kampinio sukimosi greičio) tikslumas atitinka „E-Sea Fix“ sistemos tikslumą.

Moksliniams uosto plėtros ir laivybos saugumo tyrimams atlikti į sistemą įdiegti uosto krantinių fragmentai, tokie kaip atmušai, laivų švartavimo stulpeliai ir panašiai.

Laivo tiltelio vizualiuoju treniruokliu gaunami 3D ir 2D vaizdai tiriamose vietose. Treniruokliai turi tiltelio valdymo bloką, kur įdiegta visa navigacinė ir laivo valdymo sistema. Simuliuojant gaunami šie duomenys: laivo, vilkikų ir aplinkos parametrai; laivo koordinatės ir trajektorija; laivo greitis; laivo kampinio sukimosi greitis bei kiti parametrai: laivo mašinos, stūmų, sraigto (sraigčių), vairo plokštės darbo, laivo dreifo, klirenso po laivo kiliu, laivo bendro grimzlės padidėjimo, laivo supimosi, gylio po laivo korpusu keliuose taškuose (iki 8 taškų), vėjo, srovės, bangavimo, taip pat galimos dienos ir nakties bei riboto matomumo situacijos.

Taigi vizualieji laivo tiltelio treniruokliai leidžia atlikti laivo manevravimo uoste tyrimus ir suderinti juos su uosto infrastruktūros elementų parametrais, įvairius eksperimentus, kuriais gautus rezultatus vėliau būtina patikrinti realiomis sąlygomis su realiais laivais, naudojant ypač tikslią navigacinę įrangą, pavyzdžiui, „E-Sea Fix“ sistemą, laivų eismo reguliavimo sistemą (VTS) arba VTS-LERS.

2.1.3. Eksperimentiniai laivo manevravimo parametrų tyrimai

Atlikti eksperimentiniai tyrimai, plaukiant realiems laivams, ir išmatuoti disertacijoje sukurtos metodikos tikrinimo parametrai:

- laivo, judančio šonu, pasipriešinimo koeficientas, k_{R22} ;
- laivo, judančio siauru kanalu tiesiai, pasipriešinimo koeficientas, k'_{R11} ;
- laivo, judančio tiesiai, pasipriešinimo jėga R_x , N;
- laivo, judančio šonu, pasipriešinimo jėga R_y , N;
- laivo minimalus valdomumo greitis (v_{min}) ir kiti parametrai.

Gauti eksperimentinių tyrimų rezultatai pateikti paveiksluose 2.8, 2.9, 2.10, 3.10, 3.11, 3.14 kartu su skaitinio modeliavimo rezultatais.

2.2. Laivo valdomumo charakteristikos

Laivo valdomumas apibrėžiamas kaip jo judėjimas numatyta trajektorija ir gebėjimas joje išsilaikyti bei sustoti numatytu atstumu arba numatytame taške. Taigi laivo valdomumą apibrėžia šios charakteristikos:

- laivo apsikimas;
- laivo stabdymo kelias;
- laivo įsibėgėjimo kelias.

Laivo manevravimo parametrų ir uosto akvatorijos elementų tarpusavio ryšys pateiktas 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Laivo manevravimo parametrų ir uosto akvatorijos elementai

2.2 table. The parameters of vessel's maneuvering and the elements of the port area

Laivas		Uostas
Laivo manevrinės savybės	laivo sukimasis → laivo stabdymas →	laivų apsisukimo baseino skersmuo kanalo plotis Apsisukimo baseinas Uosto kanalas
Laivo geometriniai parametrai	ilgis → plotis → grimzlė → →	laivų apsisukimo baseino skersmuo kanalo plotis kanalo gylis klirensas Apsisukimo baseinas Uosto kanalas
Laivo konstrukcinės ypatybės	korpuso pilnumo koeficientas → viršvandeninės dalies plotas →	kanalo gylis kanalo plotis Uosto kanalas

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

Laivo valdomumą užtikrina įvairių tipų ir konstrukcijų propulsiniai kompleksai (laivo mašina, vairo ir sraigto elementai). Įprastiniai vairo ir sraigto kompleksai naudojami vadinamuosiuose konvenciniuose laivuose, tuo tarpu specialiuose (ro-ro keltai, kruiziniai laivai, vilkikai) ir naujo tipo laivuose (greitaeigiai laivai, laivai ant oro pagalvių ir povandeninių sparnų, pan.) naudojamos naujos vairo ir sraigto sistemos: azimutiniai vairo ir sraigto kompleksai, vairavimo kolonėlės bei įrenginiai (stūmos), pan.

Tradiciniai, arba vadinamieji konvenciniai, laivai naudoja įprastinį vairo ir sraigto kompleksą, kurio pakanka užtikrinti laivo valdomumą tų laivų, kurie plaukioja dideliais atstumais, santykinai retai įplaukia į uostus ir juose manevruoja. Įprastinius vairo ir sraigto kompleksus daugiausia naudoja bendrųjų ir biriujų krovinių laivai bei tanklaiviai, nes šios įrangos santykinai maža savikaina, paprastesnė, lyginant su kitomis sistemomis, eksploatacija ir remontas.

Azimutinius vairo ir sraigto kompleksus („Azi-pod“) daugiausia naudoja laivai, kurie dažnai manevruoja sudėtingomis navigacinėmis sąlygomis, t. y. dažnai įplaukia į uostus ir išplaukia iš jų, nuolat manevruoja uostuose vykdydami įprastas funkcijas, pavyzdžiui, uosto vilkikai. Azimutinius vairo ir sraigto (sraigto) kompleksus dažniausia naudoja vilkikai, kuriems tenka nuolat manevruoti uostuose ar kitomis panašiomis sąlygomis; pagalbiniai ir specialūs laivai, turintys dinamines palaikymo sistemas, pavyzdžiui, vykdančios gręžimo darbus jūroje; kruiziniai laivai, dažnai įplaukiantys į uostus ir nenaudojantys vilkikų; ro-ro laivai dėl dažno įplaukimo ir manevravimo uostuose, siekiant sumažinti vilkikų naudojimą, kartu ir sąnaudas, vykdančios švartavimo operacijas; kiti panašūs laivai. Nors azimutiniai vairo ir sraigto kompleksai yra brangesni, palyginus su tradiciniais, ir jie sukuria tuos pačius parametrus (traukos bei šoninę jėgą), jų naudojimas ir remontas – sudėtingesnis ir brangesnis, bet padidina laivybos saugumą, o dažnai švartuojant laivus patiriamos bendros sąnaudos, palyginus su vilkikų sąnaudomis, yra mažesnės.

Pastaruoju metu pradėtas plačiai naudoti azimutinis dviejų sraigčių vairo ir sraigto kompleksas, leidžiantis pasiekti didesnę bendrą vairo ir sraigto komplekso naudingą veikimo koeficientą (NVK), sraigtams sukti pradėti naudoti hidrauliniai varikliai. Jie leido sumažinti azimutinio vairo ir sraigto gabaritus, pasiekiant tą pačią sraigčių įrašos jėgą, bei pagerinti laivo valdomumą plaukiant tiesiai, nes naudojami skirtingos sukio krypties sraigtai. Skirtingo sukio sraigčių azimutiniuose vairo ir sraigto kompleksuose naudojimas leidžia kompensuoti šonines sraigčių jėgas.

Laivų pavairavimo įrenginiai naudojami laivuose, kurie dažnai manevruoja ribotomis sąlygomis. Galimybė valdyti pavairavimo įrenginius iš laivo tiltelio didina valdymo operatyvumą, kartu ir laivybos saugumą.

2.3 lentelė. Santykinė laivų, naudojančių įvairius propulsinius kompleksus, klasifikacija

Table 2.3. Ships classification depend of the different propolsion systems

Laivo tipas	Konvencinis vairo ir sraigto kompleksas	„Azipod“ sistema	Pavairavimo įrenginiai	Pastabos
Tanklaiviai	+	–	+/-	Naudoja laivai iki PANAMAX tipo
Balkeriai	+	–	+/-	Naudoja laivai iki PANAMAX tipo
Kruiziniai		+	+	
Ro-pax	+	–	+	
Ro-ro	+	–	+	
Konteinervežiai	+	–	+	
Generalinių krovinių	+		+/-	Naudoja laivai iki HANDYSIZE tipo
Žvejybos	+	–	–	
Vilkikai	+	+		Seni vilkikai naudoja konvencinius kompleksus
Maži keltai	+	+	+	Didelė įvairovė

Laivo manevravimas gali būti aprašytas bendromis laivo judesio diferencialinėmis jėgų ir momentų lygtimis, taikant antrąjį Niutono dėsnį ir d’Alemberto principą dvi-matėje koordinatinių sistemoje.

Užrašomos laivo judėjimo diferencialinės lygtys, t. y. laivą veikiančių jėgų lygtis X (išilginės jėgos) ir Y (skersinės jėgos) kryptimis bei momentai, veikiantys vertikalės, einančios per koordinatinių pradžių, atžvilgiu, kurios pirmą kartą panašia forma pateiktos dar 1963 m. (Басин, 1963). Bet tuo metu ir vėliau pateiktose lygtyse nevertintas seklumos poveikis bei laivo korpusas, kaip „sparnas“.

$$\sum F_x = 0$$

$$V(1+k_{11})\rho \frac{dv_x}{dt} = X_k + X_\beta + X_p + X_a + X_b + X_{sr} + X_{sek} + T_x + X_N + X_V \quad (2.01)$$

$$\sum F_y = 0$$

$$V(1+k_{22})\rho \frac{dv_y}{dt} = Y_k + Y_\beta + Y_p + Y_a + Y_b + Y_{sr} + Y_{sek} + T_y + Y_N + Y_V \quad (2.02)$$

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

$$\Sigma M_A = 0$$

$$(I_z + \lambda_{66}) \frac{d\omega}{dt} \sin \beta \cos \beta = M_k + M_\beta + M_p + M_a + M_b + M_{sr} + M_{sek} + M_T + M_N + M_V \quad (2.03)$$

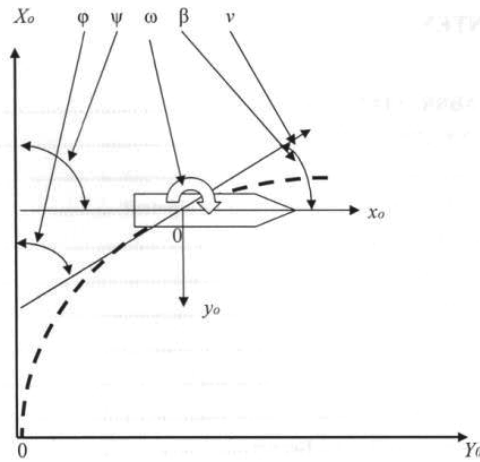
(2.01)–(2.03) lygtyse nurodyti dydžiai SI sistemoje, reiškia: V – laivo tūrinė vandentalpa, m³; k_{11} – pridėtosios skysčio (vandens) masės koeficientas, laivui judant tiesiai; v – laivo greitis, m/s; β – laivo dreifo kampas, rad.; k_{22} – pridėtosios skysčio (vandens) masės koeficientas, laivui judant šonu; I_z – laivo inercijos momentas Z ašies atžvilgiu, kg·m²; λ_{66} – pridėtosios skysčio (vandens) masės inercijos momentas Z ašies atžvilgiu, kg·m²; ω – laivo sukimosi kampinis greitis, rad./s; X_K, Y_K, M_K – laivo korpuso pasipriešinimo jėgos ir momentas, N, Nm; $X_\beta, Y_\beta, M_\beta$ – laivo korpuso, kaip „sparno“, jėgos ir momentas, N, Nm; X_p, Y_p, M_p – vairo plokštės arba kitos laivo vairavimo sistemos jėgos ir momentas, N, Nm; X_a, Y_a, M_a – aerodinaminės jėgos ir momentas, N, Nm; X_b, Y_b, M_b – bangų sudaromos jėgos ir momentas, N, Nm; X_{sr}, Y_{sr}, M_{sr} – jėgos ir momentas, kurias sudaro srovės, N, Nm; $X_{sek}, Y_{sek}, M_{sek}$ – seklumos poveikio sudaromos jėgos ir momentas, N, Nm; T_x, T_y, M_T – laivo sraigto sukuriamos stūmos jėgos ir momentas, N, Nm; X_N, Y_N, M_N – jėgos ir momentas, kurias sudaro laivo pavairavimo įrenginiai, N, Nm; X_V, Y_V, M_V – vilkikų (traukimo) sukuriamos jėgos ir momentas, N, Nm; $v_x = v \cos \beta$; $v_y = v \sin \beta$; $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$.

2.4 paveiksle pateiktos koordinačių sistemos naudojamos laivo manevravimo bei jam būtinų uosto infrastruktūros parametrų uždaviniams spręsti. Schemoje parodyta: $X_0, 0, Y_0$ – koordinatės, susijusios su Žemės paviršiumi; $x_0, 0, y_0$ – koordinatės, susijusios su laivu; v – laivo greičio vektorius koordinatėse, kurios susijusios su laivu; ω – laivo sukimosi kampinis greitis, rad./s; β – laivo dreifo kampas, rad.; ψ – laivo kurso kampas, rad.; φ – laivo greičio kampas, rad.

Nurodytos diferencialinių lygčių sistemoje (2.01)–(2.03) jėgos ir momentai leidžia apskaičiuoti laivo kinematinis judėjimo parametrus ir iš jų nustatyti laivo svorio centro (koordinačių pradžios) trajektoriją, kuri Žemės paviršiaus atžvilgiu skaičiuojama taip:

$$X_{oi} = \int_0^t v_{0x} dt ; \quad (2.04)$$

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...



2.4 pav. Koordinatinių sistemų ir laivo judesio kinematiniai parametrai

Fig. 2.4. Coordinates systems and ship's kinematic parameters

$$Y_{0i} = \int_0^t v_{0y} dt, \quad (2.05)$$

čia: v_{0x}, v_{0y} – laivo greičio vektoriai Žemės paviršiaus atžvilgiu; t – laikas nuo manevro pradžios, s.

Laivų manevravimo uoste ir uosto infrastruktūros parametrų skaičiavimo uždaviniuose taikomos dvi koordinatinių sistemų: koordinatės, susijusios su Žemės paviršiumi, ir koordinatės, susijusios su laivu.

Dvigubų arba trigubų koordinatinių naudojimas judančiuose objektuose (laivai, lėktuvai, mašinos ir panašiai) pagrįstas kinematinio judėjimo charakteristikų matavimo galimybėmis.

Koordinatinių sistemų tarpusavio ryšys (2.4 pav.) nustatomas pagal Oilerio formules:

$$v_{0x} = v \cdot \cos \varphi; \quad (2.06)$$

$$v_{0y} = v \cdot \sin \varphi. \quad (2.07)$$

Laivo greičio kampas φ gali būti užrašytas (Войткунский et al. 1985) pagal formulę:

$$\varphi = \psi - \beta. \quad (2.08)$$

Laivo kurso kampas, kaip matyti 2.4 paveiksle, gali būti apskaičiuotas pagal formulę:

$$\psi = \int_0^t \omega \cdot dt. \quad (2.09)$$

Tada laivo judesio trajektorijos koordinatės X_{0i} ir Y_{0i} gali būti užrašytos:

$$X_{0i} = \int_0^t v \cos \left(\int_0^t \omega \cdot dt - \beta \right) dt; \quad (2.10)$$

$$Y_{0i} = \int_0^t v \sin \left(\int_0^t \omega \cdot dt - \beta \right) dt. \quad (2.11)$$

Laivo judesio trajektorijai apskaičiuoti būtina turėti tris laivo judesio kinematinės charakteristikas: v , ω ir β .

Siekiant nustatyti minėtas laivo judesio kinematinės charakteristikas, būtina išspręsti (2.01)–(2.03) lygtis arba kitokiu būdu nustatyti laivo judesio kinematinės charakteristikas ar greičių vektorius v_{0x} ir v_{0y} , kurie susiję su Žemės paviršiumi.

Laivo trajektorijos elementų skaičiavimo metodika, pateikta šiame paragrafe, taikyta disertacijoje tiriant laivų manevrines savybes esant mažam gyliui bei nustatant uosto infrastruktūros ribines galimybes laivų atžvilgiu (laivų manevravimo judant uosto kanalais ir akvatorijomis) ir kitiems laivo manevravimo uždaviniams spręsti.

2.3. Laivo judėjimo charakteristikos ir laivo grimzlės padidėjimas esant mažam gyliui

Daugelyje uostų gyliai yra riboti, todėl laivai uostuose valdomi esant mažam klirensui (atstumui tarp laivo korpuso ir akvatorijos arba kanalo dugno). Tobulėjant šiuolaikinei navigacinei ir gylio matavimo įrangai, kai galima daug tiksliau nustatyti laivo vietą ir gylį bet kurioje akvatorijos vietoje, uostai stengiasi kuo geriau išnaudoti gylių galimybes ir minimizuoti klirensą.

Laivo manevravimo parametrai, esant mažam gyliui, kinta, palyginus su laivo judėjimo dideliame gylyje parametrais, dėl to atsiranda laivo kampinio ir linijinio greičio pokyčių, palyginus su analogiškais parametrais esant dideliame gyliui. Linijinio

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

laivo greičio pokytis, esant mažam gyliui, pagrįstas didesniu pasipriešinimu esant tam pačiam galingumui, kuris suteiktas sraigtiui (tam pačiam sraigto sukimosi dažniui). Dėl didesnio srauto greičio tarp laivo korpuso ir dugno mažėja slėgis, dėl to didėja laivo grimzlė ir laivas tarsi „pasunkėja“. Kita laivo „pasunkėjimo“ priežastis – padidėjusi pridėtoji skysčio masė. Taip laivui judant sekloje akvatorijoje (esant mažam klirensui) padidėja laivo grimzlė ir sumažėja laivo greitis (Strem, 2004).

Tą patį reiškinį galima paaiškinti ir naudojantis pridėtoja skysčio mase, kurios koeficientas k_{11} , dėl gylio sumažėjimo, laivui judant išilgine kryptimi, jis gali būti nustatytas naudojant nomogramą (2.5 pav.) (Paulauskas D., Paulauskas V. 2009).

2.4 lentelė. Pridėtosios skysčio masės koeficiento k_{11} priklausomybė nuo T/H santykio ir laivo plaukimo greičio v

2.4 table. Add mass coefficient depends of T/H

$v, m/s$	T/H	k'_{11}	$v, m/s$	T/H	k'_{11}	$v, m/s$	T/H	k'_{11}	$v, m/s$	T/H	k'_{11}
2 m/s	0	0,002	4 m/s	0	0,020	6 m/s	0	0,040	8 m/s	0	0,060
	0,2	0,010		0,2	0,032		0,2	0,055		0,2	0,080
	0,4	0,015		0,4	0,045		0,4	0,070		0,4	0,106
	0,6	0,025		0,6	0,068		0,6	0,100		0,6	0,135
	0,8	0,040		0,8	0,090		0,8	0,130		0,8	0,175
1	0,052	1	0,110	1	0,170	1	0,230				

Vertinant pridėtoją skysčio masę kaip papildomą apkrovą, laivo grimzlės padidėjimas gali būti apskaičiuotas pagal formulę (Paulauskas V. 1994):

$$\Delta T = \frac{k_{11} \cdot V}{L \cdot B \cdot \rho \cdot d}, \quad (2.12)$$

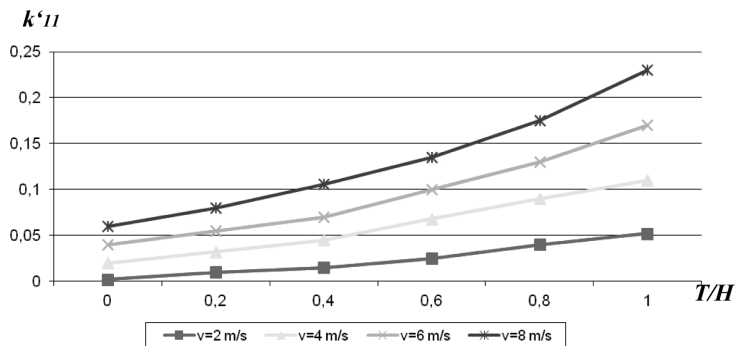
čia: L – laivo ilgis tarp statmenų, m; B – laivo plotis, m; V – laivo vandentalpa, m³; ρ – vandens tankis, kg/m³; d – bendrasis laivo korpuso pilnumo koeficientas.

Laivo grimzlės padidėjimas gali būti apskaičiuotas ir pagal kitą formulę (empirinę), kuri naudojama Vakarų Europos šalyse (Strem 2004):

$$\Delta T = \sqrt{\frac{T}{H}} \cdot \frac{(k^2 - 1) \cdot v^2}{2g}, \quad (2.13)$$

čia: k – koeficientas, priklausantis nuo santykio L/B , kai $L/B = 4$, $k = 1,32$; kai $L/B = 5$, $k = 1,23$; kai $L/B = 6$, $k = 1,23$, o kai $L/B = 9$, $k = 1,15$.

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...



2.5 pav. Pridėtosios skysčio masės koeficiento k_{11} priklausomybė nuo T/H santykio ir laivo plaukimo greičio v

Fig. 2.5. Water add mass coefficient k_{11} depends of the T/H and ship's speed v

Dėl papildomos laivo korpuso apkrovos (santykinės vandentalpos) didėja jo pasipriešinimas, kartu mažėja laivo greitis. Laivo greitį seklumoje galima apskaičiuoti pagal formulę (Paulauskas 1999):

$$v = \sqrt{\frac{1 + k'_{11}}{1 + k_{11}}} \cdot v_0, \quad (2.14)$$

čia: k'_{11} – pridėtosios laivo skysčio masės koeficientas, kai laivas juda išilgai (X ašimi), esant mažam gyliui; k_{11} – pridėtosios laivo skysčio masės koeficientas, kai laivas juda išilgai (X ašimi), esant dideliame gyliui, t. y. kai santykis T/H artimas nuliui; v_0 – laivo greitis, esant dideliame gyliui, m/s.

Plaukiant sąsiauriais ir kanalais labai svarbu iš anksto žinoti, kiek padidės laivo grimzlė, taip galima išvengti laivo korpuso ir dugno lietimosi, ypač kai dugno gruntas yra ne sąnašinis, o uolėtas arba nusėtas riedulių.

Siekiant išvengti per didelio laivo korpuso „prasėdimo“, kuris tam tikrais atvejais, gali būti iki metro ir daugiau, būtina iš anksto sumažinti greitį, tada nustos didėti ir laivo grimzlė: kad laivo grimzlė (kai $T/H \approx 0,8$) būtų tokia pat, kaip ir plaukiant giliame vandenyje, ne mažiau kaip du kartus būtina sumažinti laivo pradinį greitį (Paulauskas 2009). Taigi, jeigu laivas plaukia, kai santykis T/H yra apie 0,8, jo greitis neturėtų būti didesnis nei mažasis greitis (MG). Uostuose laivams tenka plaukti, kai T/H santykis siekia iki 0,94–0,96, tada laivo greitis turi būti minimalus, kad būtų galima laivą valdyti.

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

Taigi laivui plaukiant uoste arba jo prieigose, kur gylyai kinta, būtina atsižvelgti į galimus laivo greičio pokyčius ir laivo grimzlės padidėjimą. Uostuose gylyai dažniausia yra maži, todėl laivams plaukiant ir juos valdant reikia įvertinti mažų gylių poveikį laivo judėjimo ir manevravimo charakteristikoms.

Kadangi uoste laivų judėjimo greitis ribojamas, galima priimti, kad jis turi tiesinę priklausomybę nuo laivo santykinio svorio (įskaitant ir pridėtąją skysčio masę). Dėl to plaukiant uosto akvatorija ir kanalais būtina vertinti laivo judėjimo greičio pokyčius dėl mažo gylio poveikio, ypač atsižvelgiant į laivo įsibėgėjimo ir stabdymo charakteristikas.

Laivo grimzlės pokytis, kai gylis yra mažas, ypač svarbus, nes padidėjus grimzlei (laivui „prasėdus“) gali būti paliestas akvatorijos arba kanalo dugnas. Laivo grimzlės pokytis esant mažam gyliui gali būti analizuojamas keliais aspektais: atsižvelgiant į skysčio srauto tarp laivo korpuso ir akvatorijos arba kanalo dugno greičio padidėjimą ir hipotezę, kad pridėtoji skysčio masė laivą veikia kaip papildoma apkrova.

Atsižvelgiant į pridėtosios skysčio masės hipotezę, laivo grimzlės padidėjimas gali būti taip įvertintas:

$$\Delta T = \rho' \cdot V (k_{11} - k'_{11}) q, \quad (2.15)$$

čia: V – pirminis laivo tūris (laivui nejudant), m^3 ; ρ' – vandens tankio koeficientas, gėlo vandens – 1,0, jūros vandens, atsižvelgiant į jo sūrumą, gali būti iki 1,027; q – masė, tenkanti vienam grimzlės centimetrai, kg.

Apskaičiuotas laivo grimzlės padidėjimas taikytinas tik išilginiam laivo judėjimui. Laivo grimzlės padidėjimas (angl. *squat* arba *sinkage*, kai įvertinamas grimzlės pokytis dėl laivo greičio, supimosi, išilginio ir šoninio posvyrio) apskaičiuojamas pagal formules, kuriomis gaunami panašūs rezultatai, kaip ir anksčiau pateiktose formulėse (Strem 2004):

$$\Delta T = \frac{v_s^2}{2g} 3,75 \cdot \delta \cdot S_2'^{3/4} \cdot \left(\frac{v_s}{v} \right)^{1/12}, \quad (2.16)$$

čia: v_s – laivo greitis kanale, m/s; v – visas laivo greitis, m/s; δ – bendrasis laivo korpuso pilnumo koeficientas; S_2' – santykis tarp laivo ir kanalo charakteristikų, skaičiuojamas taip:

$$S_2' = BT / B_e H, \quad (2.17)$$

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

čia: H – gylis, m; B – laivo plotis, m; T – laivo grimzlė, m; B_e – efektyvus kanalo plotis, skaičiuojamas pagal formulę:

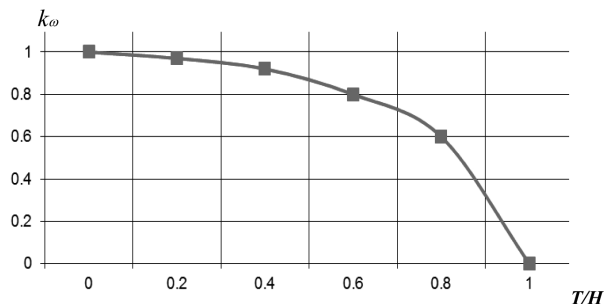
$$B_e = \frac{B_{kv} + B_{kd}}{2}, \quad (2.18)$$

čia: B_{kv} – kanalo plotis vandens lygyje, m; B_{kd} – kanalo plotis dugne, m.

Dėl to plaukiant uosto akvatorija ir kanalais turi būti atsižvelgta į laivo grimzlės pokyčius ir pasirinktas saugus plaukimo greitis, siekiant išvengti laivo korpuso lietimosi su akvatorijos arba kanalo dugnu ir užtikrinti laivo valdomumą.

2.4. Laivo kreivalinijinio judėjimo charakteristikos esant mažam gyliui

Laivo manevravimas esant mažam gyliui yra sudėtingesnis dėl papildomos pridėtosios skysčio masės ir laivo korpuso aptekėjimo pokyčio. Esant mažam gyliui mažėja laivo greitis, nors galinumas (sraigto sukimosi dažnis) išlieka toks pat, dėl pridėtosios skysčio masės laivas tarsi „pasunkėja“ ir esant tam pačiam vairo šoninės jėgos sudaromam laivo sukimo momentui mažėja jo kampinis greitis. Laivo kampinio greičio pokytis, esant mažam gyliui, gali būti apibūdinamas kampinio greičio koeficientu k_ω , kurio grafinė išraiška, atsižvelgiant į santykį T/H , pateikta 2.6 paveiksle (Paulauskas D., Paulauskas V. 2009; Strem 2004).



2.6 pav. Laivo sukimosi kampinio greičio koeficientas, atsižvelgiant į santykį T/H

Fig. 2.6. Ship's turning velocity coefficient depend of T/H

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

Laivo sukimosi kampinio greičio koeficiento priklausomybė, atsižvelgiant į santykį T/H , eksperimentiniais metodais gauta įvairių autorių (Strem 2004; Paulauskas D., Paulauskas V.), disertacijos autoriaus patikrinta realiuose laivuose, gali būti naudojama vertinant laivų kampinio greičio pokytį uosto sąlygomis.

Gauta formulė leidžia apskaičiuoti laivo sukimosi kampinio greičio koeficientą, atsižvelgiant į laivo grimzlės ir gylio santykį, bei toliau jį taikyti skaičiuojant laivo sukimosi kampinį greitį, esant mažam gyliui, ir laivo trajektoriją.

Taigi laivo kampinis greitis, jam manevruojant mažame gylyje, gali būti apskaičiuotas pagal formulę:

$$\omega_s = k_\omega \omega, \quad (2.19)$$

kur: k_ω – laivo kampinio greičio, kurio grafinė priklausomybė pateikta 2.6 paveiksle, koeficientas; ω – laivo kampinis greitis (rad./s), esant dideliui gyliui (T/H artimas 0).

Laivo dreifo kampas plaukiant sekluma beveik nekinta, bet gali būti patikslintas pagal formulę (Войткунский et al. 1985):

$$\sin \beta_{n(s)} = \frac{x_o \cdot \omega_{n(s)}}{v_{n(s)}}, \quad (2.20)$$

čia: x_o – laivo sukimosi poliaus abscisė, kurią galima apskaičiuoti pagal formulę (Paulauskas 1994):

$$x_o = L(0,4 + 11,5 \frac{T_{lg} - T_p}{L} - 0,0042 \alpha^0), \quad (2.21)$$

kur: T_{lg} – laivagalio grimzlė, m; T_p – laivapriekio grimzlė, m; α^0 – vairo plokštės pasukimo kampas, laipsniais.

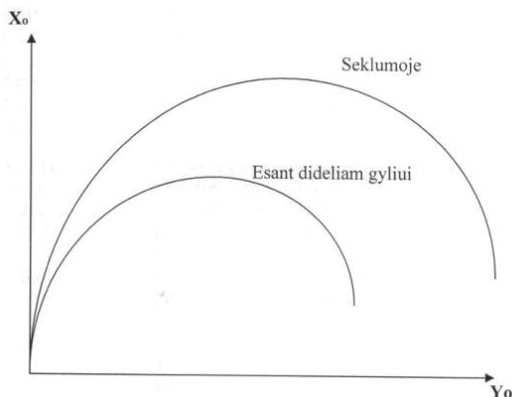
Laivo trajektorijos koordinatės, jam plaukiant uostų kanalais arba akvatorijomis, gali būti taip apskaičiuotos (Paulauskas D., Paulauskas V. 2009):

$$X_{0(s)} = \int_0^t v_s \cos \left(\int_0^t \omega_s dt - \beta \right) dt; \quad (2.22)$$

$$Y_{0(s)} = \int_0^t v_s \sin \left(\int_0^t \omega_s dt - \beta \right) dt. \quad (2.23)$$

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

Kaip matyti iš gautų koordinacinių lygčių, kai laivo greitis seklumoje mažesnis negu giliame vandenyje, laivas nuplaukia mažesnę atstumą negu esant toms pačioms sąlygoms giliame vandenyje, bet linijinio greičio pokytis yra mažesnis negu kampinio greičio pokytis, kuris gerokai sumažėja, kai santykis $T/H - 0,8$ ir daugiau, tai reiškia, kad padidėja trajektorijos spindulys. Grafinis vaizdas pateiktas 2.7 paveiksle.



2.7 pav. Laivo sukimosi trajektorija esant dideliui gyliui ir seklumoje

Fig. 2.7. Ship's circular trajectory in deep and shallow water

Dideli laivo plaukimo trajektorijos ir manevravimo pokyčiai išryškėja, kai santykis $T/H - 0,9$ ir daugiau, tada dvigubai ir net daugiau sumažėja laivo valdomumas – tai atitinka realias daugelio uostų sąlygas.

Daugelyje uostų yra vidinių ir išorinių kanalų posūkių. Laivui plaukiant tokiomis vietomis, jo saugiam manevravimui gali turėti įtakos šie veiksniai: sekluma, vėjas, srovės, kartais, ypač išoriniuose kanaluose, bangos. Srovės ir seklumos poveikiai skaičiuojami tiesiogiai, t. y. srovės poveikis vertinamas kaip judantis pagrindas, žinant plaukimo atstumą, gali būti apskaičiuotas laivo nunešimas:

$$S_{sr} = v_{sr} \cdot \sin q_{sr} \cdot t_s, \quad (2.24)$$

čia: v_{sr} – srovės greitis, m/s; q_{sr} – srovės kurso kampas (laivo pradinio plaukimo kelio atžvilgiu), laipsniais; t_s – laivo plaukimo laikas, s.

Srovės poveikiui kompensuoti turi būti išlaikomas atitinkamas dreifo kampas, kuris bus lygus:

$$\arctg \beta = \frac{S_{sr}}{S_{pl}} = \frac{v_{sr} \cdot \sin q_{sr}}{v}, \quad (2.25)$$

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

čia: v – vidutinis, arba faktinis, laivo plaukimo greitis, m/s.

Seklumos poveikis gali būti kompensuotas didesniu vairo plokštės pasukimo kampų arba papildomomis vairavimo priemonėmis, t. y. stūmomis arba vilkikais.

Vėjo ir bangavimo poveikis gali būti įvertintas užrašant momentų lygtį (Paulauskas D., Paulauskas V. 2009):

$$M_{\beta} + M_P + M_a + M_b + M_N = 0. \quad (2.26)$$

Vairo plokštės sukuriamas momentas, įvertinant seklumos poveikį, gali būti taip užrašytas:

$$M_{p(s)} = C_y \cdot \frac{\rho}{2} \cdot S \cdot v_s \cdot \frac{L}{2} k_{\omega}, \quad (2.27)$$

čia: C_y – vairo plokštės hidrodinaminis koeficientas; ρ – vandens tankis, kg/m^3 ; S – vairo plokštės projekcijos į vidurinę plokštumą plotas, m^2 ; v_s – vandens srauto greitis, kuris gali būti taip apskaičiuotas (EAU 2012):

$$v_s = 1,6 \cdot n \cdot D_s \cdot \sqrt{k_T}, \quad (2.28)$$

čia: n – sraigto sukimosi dažnis, sūk./s ; D_s – sraigto skersmuo, m; k_T – sraigto koeficientas, gali būti priimtas apie 0,35.

Naudojant vidutinį sraigto koeficiento dydį, vandens srauto greičio už sraigto formulė gali būti taip užrašyta:

$$v_s = 0,95 \cdot n \cdot D_s. \quad (2.29)$$

Be to, srauto greitis gali būti prilygintas nusistovėjusiam laivo judėjimo greičiui esant konkrečiam sraigto sukimosi dažniui arba sraigto menčių pasukimo kampui, t. y.

$$v_s \approx v_0. \quad (2.30)$$

Vėjo poveikis, arba aerodinaminis momentas, skaičiuojamas taip:

$$M_a = C_a \frac{\rho_1}{2} S_x (v_a \sin q_a + v)^2 x_a, \quad (2.31)$$

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

čia: C_a – aerodinaminis koeficientas, gali būti priimtas nuo 0,9 iki 1,3, atsižvelgiant į viršvandeninę laivo formą; S_x – laivo viršvandeninės dalies projekcijos į vidurinę plokštumą plotas, m²; v_a – tikrasis vėjo greitis, m/s; $\sin q_a$ – vėjo kurso kampo sinusas pradiniame laivo manevro taške; x_a – aerodinaminės jėgos abscisė.

Labai svarbi yra vėjo poveikio kryptis, kuri priklauso nuo aerodinaminės jėgos „ pridėjimo“ abscisės, t. y. x_a yra teigiama, kai aerodinaminės jėgos pridėjimo taškas išsidėstęs į priekį nuo laivo midelio: sukantis nuo vėjo krypties – teigiamas, sukantis į vėjo pusę – neigiamas (Strem 2004).

Bangos poveikis labiausiai priklauso nuo jos aukščio ir kurso kampo, pastarasis (bangos poveikio momentas) gali būti taip apskaičiuotas:

$$M_b = C_B \frac{\rho}{4} L^2 h_B (k_B v_a)^2 \sin q_B, \quad (2.32)$$

čia: C_B – bangos poveikio koeficientas, kuris gali būti priimtas kaip hidrodinaminis plokštės, išdėstytos skersai srauto, koeficientas. Atsižvelgiant į tai, kad laivo priekinė ir galinė dalys yra aptakios bangos poveikiui, šis koeficientas gali būti priimtas apie 1,2–1,5 (1,2 atitinka laivus, kurių santykinai mažas bendrasis laivo korpuso pilnumo koeficientas, t. y. mažesnis negu 0,7; 1,5 – laivus, kurių bendrasis laivo korpuso pilnumo koeficientas yra 0,7–0,9). Laivų, kurių bendrasis pilnumo koeficientas yra daugiau nei 0,9 (tai atitinka upių ir kitas panašias baržas arba pontonus), C_B yra apie 1,7–1,9; h_B – bangos aukštis, kurio sandauga su laivo ilgiu tarp statmenų (L) išreiškia realią plokštę, kurią veikia bangos; k_B – bangos energijos pernešimo (palyginus su vėjo greičiu) koeficientas, vidutiniškai gali būti priimtas apie 0,6; q_B – bangos kurso kampas, laipsniais.

Bangos poveikio momento ženklas priklauso nuo pusės, į kurią sukasi laivas ir kuriame kurso kampo ketvirtyje yra bangos kurso kampas. M_b ženklių matrica pateikta 2.5 lentelėje.

2.5 lentelė. M_b ženklių matrica

Table 2.5. Matrices of the M_b marks

Bangos kurso kampo ketvirčiai	1	2	3	4
Posūkis į dešinę	–	+	–	+
Posūkis į kairę	+	–	+	–

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

Taigi laivo vairavimo įrenginio (laivo valdomumas) efektyvumas įvertinamas pagal momentų lygtį, kuri išplėstine forma užrašoma taip:

$$\begin{aligned} C_y \frac{\rho}{2} S v_{sek}^2 \frac{L}{2} k_{\omega} + C_a \frac{\rho_1}{2} S_x (v_a \sin q_a + v_{sek})^2 + \\ + C_B \frac{\rho}{4} L^2 h_B (k_B v_a)^2 = 0 \end{aligned} \quad (2.33)$$

Bangos poveikio formulėje dydis $k_B \cdot v_a$ išreiškia bangos judėjimo greitį, m/s; koeficientas k_B sudaro nuo 0,6 iki 0,8, skaičiuojant šis dydis gali būti priimtas apie $0,7 v_a$. Vidinėse uostų akvatorijose arba kanaluose bangos poveikis paprastai minimalus arba jo iš viso nėra, tada išplėstinė momentų lygtis užrašoma taip:

$$C_y \frac{\rho}{2} S v_{sek}^2 \frac{L}{2} k_{\omega} + C_a \frac{\rho_1}{2} S_x (v_a \sin q_a + v_{sek})^2 = 0. \quad (2.34)$$

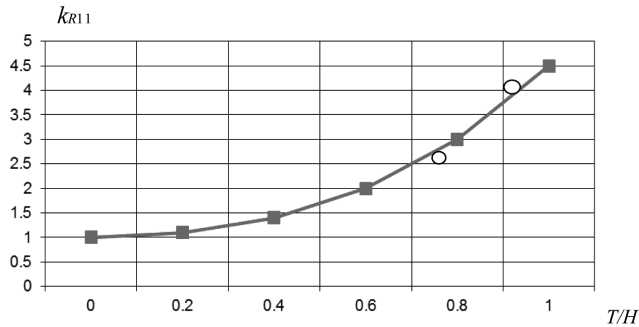
Laivas liks valdomas, kol vairo plokštės (esant laivagalio pavairavimo įrenginiams) ir laivagalio pavairavimo įrenginių sukuriamas sukimo momentas sudarys didesnį momentą, palyginus su kitais momentais, jeigu jų ženklas yra priešingas vairo ir pavairavimo įrenginių sukuriamiems momentams.

Laivo valdomumo galimybės, uostuose esant mažam gyliui, svarbios planuojant ir atliekant laivų manevrus uostų akvatorijose ir kanaluose, taip pat planuojant uostų infrastruktūros parametrus.

2.5. Laivo stabdymo ir įsibėgėjimo charakteristikos esant mažam gyliui

Esant mažam gyliui laivo stabdymo charakteristikos keičiasi dėl padidėjusio seklumos poveikio, t. y. padidėjusios laivo grimzlės, taip pat ir dėl pasipriešinimo, t. y. pridėtoji skysčio (vandens) masė „liečia“ kanalo arba akvatorijos dugną, kartu padidėja trinties pasipriešinimas. Laivo stabdymo charakteristikų pokytis gali būti išreikštas pasipriešinimo koeficientu, kuris priklauso nuo laivo grimzlės ir gylio santykio (T/H). Laivui judant tiesiai, jo pasipriešinimo koeficientas k_{R11} dėl seklumos poveikio pateiktas 2.8 paveiksle (Paulauskas D., Paulauskas V. 2009; Strem 2004). Eksperimentai buvo atlikti realiuose laivuose: lygintas laivo judėjimo greitis esant tam pačiam laivo variklio naudojamam galingumui, plaukiant dideliame ($H/T \geq 6$) ir mažame ($H/T \leq 6$) gyliuose. Laivo greičio matavimai atlikti ypač tikslia navigacine „E-Sea Fix“ įranga. Paklaidos dydis sudarė ne daugiau kaip 0,1 mazgo arba iki 1 % laivo pradinio greičio.

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...



2.8 pav. Laivo pasipriešinimo padidėjimo koeficientas k_{R11} , atsižvelgiant į laivo grimzlės ir gylio santykį T/H (skaičiavimų ir eksperimentų rezultatai pažymėti \circ).

Fig. 2.8. Ship's resistance coefficient k_{R11} , depends of ship's draft and depth T/H (calculation and experimental results shown as \circ)

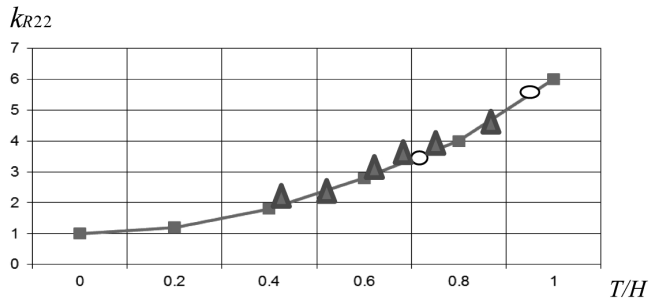
Laivo pasipriešinimo koeficientą, laivui judant tiesiai (k_{R11}), atsižvelgiant į T/H , galima apskaičiuoti pagal regresijos formulę:

$$k_{R11} = 1 + 3,45\left(\frac{T}{H}\right)^2; R^2 = 0,91. \quad (2.35)$$

Gautą laivo pasipriešinimo koeficiento, laivui judant tiesiai, regresijos formulę, atsižvelgiant į laivo grimzlės ir gylio santykį, galima pritaikyti skaitmeniniuose metoduose.

Laivui judant šonu, jo pasipriešinimo koeficientas, atsižvelgiant į santykį T/H , gautas atlikus bandymus AIS (AIS 2015) ir AIS-LERS (AIS-LERS 2018), pateiktas 2.9 paveiksle. Eksperimentuojant matuotas laivo dreifo kampas plaukiant dideliame ($T/H \geq 6$) ir mažame ($H/T \leq 6$) gyliuose. Laivo dreifo kampo matavimai buvo atliekami ypač tikslia navigacine įranga „E-Sea Fix“. Paklaidos dydis sudarė ne daugiau kaip 0,1°, arba iki 1 % laivo dreifo kampo, esant dideliame ir mažam gyliams.

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...



2.9 pav. Laivo papildomo pasipriešinimo, jam judant šonu, koeficientas k_{R22} , atsižvelgiant į santykį T/H (skaičiavimų ir eksperimentų rezultatai ○ – tanklaiviui: $L = 250$ m, ▲ – konteinernevežiui: $L = 365$ m)

Fig. 2.9. Ship's additional resistance coefficient k_{R22} , depends of ship's draft and depth T/H (calculation and experimental results shown as ○ ▲)

Laivo pasipriešinimo koeficientas, jam judant šonu (k_{R22}), atsižvelgiant į T/H , gali būti apskaičiuotas pagal regresijos formulę:

$$k_{R22} = 1 + 4,95\left(\frac{T}{H}\right)^2; \quad R^2 = 0,93. \quad (2.36)$$

Gauta laivo pasipriešinimo, judant šonu, koeficiento formulė leidžia apskaičiuoti realų laivo pasipriešinimą švartuojantis prie krantinės arba atsišvartuojant nuo jos. Tokia situacija ypač svarbi, kai laivai švartuojami esant mažam gyliui prie krantinių, išdėstytų dideliu kampu (50° – 90°) į srovės kryptį. Papildomas laivo pasipriešinimas jam judant šonu svarbus tiriant kanalus, kai yra mažas gylis, nes dėl nurodyto pasipriešinimo mažėja laivo dreifo greitis ir tuo pagrindu gali būti priimtas mažesnis kanalo plotis, palyginus su metodika ir rekomendacijomis, kuriomis remiamasi iki šiol, pavyzdžiui, PIANC (2005).

Regresijos metodu gautų formulių (2.35) ir (2.36) tyrimai atskleidė, kad ieškomų dydžių, taikant regresijos formules, paklaidos, palyginus su šaltinių ir eksperimentų, atliktų realiuose laivuose, rezultatais (Paulauskas D., Paulauskas V. 2009; Strem 2004), neviršija 5–7 %.

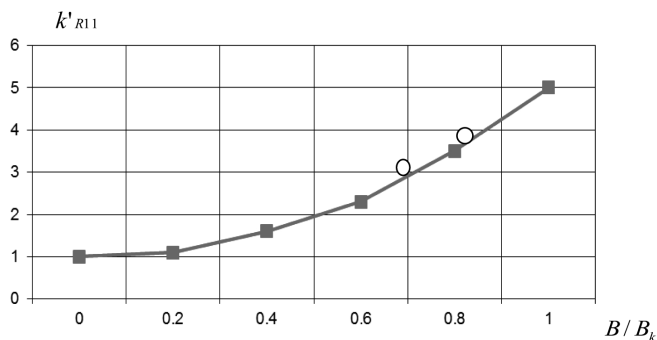
Laivui įplaukiant į šliuzus ir kitas laivo šonų atžvilgiu labai apribotas vietas, papildomo pasipriešinimo koeficientas gali būti apskaičiuotas taip pat, kaip ir judant tiesiai esant mažam gyliui, tik šiuo atveju papildomai būtina įvertinti ir laivo bortų pasipriešinimo padidėjimą.

Tada bortų papildomo pasipriešinimo koeficientas bus proporcingas santykiui B/B_k , t. y.

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

$$k'_{R11} \Rightarrow \frac{B}{B_k}, \quad (2.37)$$

ir gali būti apskaičiuotas kaip ir esant mažam gyliui, tik šiuo atveju vietoj T/H turi būti imamas santykis B/B_k (2.10 pav.). Eksperimentai buvo atlikti realiuose laivuose: lygintas laivo judėjimo greitis esant tam pačiam laivo variklio naudojamam galingumui, plaukiant atvira akvatorija ($B_k / B \geq 6$) ir siaurais kanalais ($B_k / B \leq 3$). Laivo greičio matavimai atlikti ypač tikslia navigacine įranga „E-Sea Fix“. Paklaidos dydis sudarė ne daugiau kaip 0,1 mazgo, arba iki 1 % laivo pradinio greičio.



2.10 pav. Papildomas laivo pasipriešinimo koeficientas k'_{R11} laivui judant siauru kanalu tiesiai (skaičiavimų ir \circ eksperimentų rezultatai)

Fig. 2.10. Ship's additional resistance coefficient k'_{R11} , in case of ship's sailing by narrow channel and dept (calculation and experimental \circ results)

Laivo pasipriešinimo koeficientas, jam judant tiesiai siauru kanalu (k'_{R11}), atsižvelgiant į B/B_k , gali būti apskaičiuotas pagal regresijos formulę:

$$k'_{R11} = 1 + 3,95 \left(\frac{B}{B_k} \right)^2; \quad R^2 = 0,965. \quad (2.38)$$

Nustatyta laivo pasipriešinimo koeficiento laivui judant siauru kanalu reikšmė, atsižvelgiant į laivo ir kanalo pločių santykį, labai svarbi laivui plaukiant pilno profilio kanalais, plukdant laivus į šliuzus, dokus ir kitas panašias vietas. Regresijos metodu gautos formulės (2.38) taikymas atskleidė, kad ieškomų dydžių, skaičiuojamų pagal

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

regresijos formulę, paklaidos, palyginus su literatūros šaltinių (Strem 2004) ir realiuose laivuose atliktų eksperimentų rezultatais, neviršija 6–9 %.

Laivui judant tiesiai siauru sekliu kanalu, bendras pasipriešinimo koeficientas bus lygus:

$$\sum k_{R11} = k_{R11} + k'_{R11}. \quad (2.39)$$

Išmatavus laivo „Neringa“ judėjimo greitį, plaukiant Korinto (*Korinthou*) kanalu (Graikija), greičio sumažėjimas, laivui plaukiant vidutiniu greičiu (esant dideliame gyliui, greitis siekia 14 mazgų), sudarė apie 70 %, t. y. laivo plaukimo greitis kanale buvo maždaug 4 mazgai (DFDS 2014). Analogiški rezultatai gauti skaičiuojant pagal 2.39 formulę.

Laivui judant kreivalinijine trajektorija arba su dreifo kampu, bendras papildomo pasipriešinimo koeficientas gali būti apskaičiuotas pagal formulę:

$$\sum k_R = k_{R11} \cdot \cos \beta + k_{R22} \cdot \sin \beta. \quad (2.40)$$

Naudojant papildomo pasipriešinimo dėl seklumos poveikio koeficientą bendra išilginių jėgų lygtis įgauna seklumos poveikio jėgos prasmę. Kadangi papildomos jėgos dėl seklumos poveikio sukelia didesnę laivo korpuso pasipriešinimą, jį galima išreikšti formule:

$$X_S = k_R \cdot R_X. \quad (2.41)$$

Tada laivo korpuso pasipriešinimą galima užrašyti kartu su seklumos poveikio jėga:

$$R_X + X_S = k_R \cdot R_X + R_X = R_X (1 + k_R). \quad (2.42)$$

Šiuo atveju išilginių jėgų lygtis (2.1), laivui plaukiant sekluma, kai jo neveikia kitos išorinio poveikio jėgos, užrašoma taip (Paulauskas, 2011):

$$m \frac{dv}{dt} = R_x (1 + k_R). \quad (2.43)$$

Kadangi k_R yra proporcingas laivo inercijos koeficientui, kuris nustatytas plaukiant giliame vandenyje, mažam gyliui jis taip perskaiciuojamas:

$$k'_{in} = \frac{k_{in}}{k_R}. \quad (2.44)$$

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

Turint laivo inercijos koeficientą ir įvertinus seklumos poveikį galima apskaičiuoti laivo stabdymo charakteristikas pagal tas pačias formules (Paulauskas 2011), kaip ir giliame vandenyje, tik vietoj k_{in} įrašomas k'_{in} .

Stabdant laivą vilkiku, t. y. kai laivas stabdomas trinties tarp laivo korpuso ir vandens jėgų, įvertinus seklumos poveikį, laivo sraigto ir vilkiko naudojimą, bendra jėgų lygtis X kryptimi taip užrašoma:

$$m \frac{dv}{dt} = R_x(1 + k_R) + T_X + F_V. \quad (2.45)$$

Lygties (2.45) tipiniai diferencialinės lygties sprendiniai stabdymo laikui ir keliui atrodo taip:

$$t_a = \frac{m}{\sqrt{k_{in} \cdot T_X \cdot F_V}} \left(\arctg \sqrt{\frac{k_{in}}{T_X + F_V}} \cdot v_0 - \arctg \sqrt{\frac{k_{in}}{T_X + F_V}} \cdot v \right); \quad (2.46)$$

$$S'_a = \frac{m}{2k_{in}} \ln \frac{k_{in} \cdot v_0^2 + T_X + F_V}{k_{in} \cdot v^2 + T_X + F_V}. \quad (2.47)$$

Laivui plaukiant sekluma (esant mažam gyliui), kinta jo stabdymo charakteristikos (trumpėja stabdymo kelias), į tai būtina atsižvelgti plaukiant uostų kanalais ir akvatorijomis, planuojant uosto infrastruktūros (kanalų, akvatorijų, laivų apsisukimo baseinų) plėtrą.

Plaukiant uoste būtina įvertinti ir laivo įsibėgėjimo charakteristikas, ypač tai svarbu iš uosto išplukdant didelius laivus esant ribinėms sąlygoms, t. y. esant dideliame vėjo ir (arba) priešpriešinės srovės greičiui, kai atstumas nuo krantinės iki uosto vartų yra nedidelis, ir kitose panašiose situacijose. Laivo įsibėgėjimas esant mažam gyliui dėl padidėjusio laivo pasipriešinimo skiriasi nuo įsibėgėjimo charakteristikų dideliame gylyje. Laivo įsibėgėjimo charakteristikos tiesiogiai priklauso nuo inercijos koeficiento, analogiškai kaip ir laivą stabdant.

Esant toms pačioms, kaip ir stabdymo atveju, papildomo pasipriešinimo dėl seklumos poveikio sąlygoms, inercijos koeficientas k'_{in} lieka toks pats kaip ir laivo stabdymo esant mažam gyliui atveju. Laivo įsibėgėjimo charakteristikos gali būti apskaičiuotos pagal tas pačias kaip ir giliame vandenyje formules. Tada laivo įsibėgėjimo charakteristikų lygtys užrašomos taip (Paulauskas D., Paulauskas V. 2009):

$$S_{is} = \frac{m \cdot v_0^2}{2R_0 \cdot (1 + k_R)} \ln \frac{F}{F - R_0 \cdot (1 + k_R) \cdot \left(\frac{v}{v_0}\right)^2}; \quad (2.48)$$

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

$$t_{is} = \frac{m \cdot v_0}{2\sqrt{F \cdot R_0 \cdot (1 + k_R)}} \ln \frac{\sqrt{\frac{F}{R_0 \cdot (1 + k_R)} + \frac{v}{v_0}}}{\sqrt{\frac{F}{R_0 \cdot (1 + k_R)} - \frac{v}{v_0}}} \quad (2.49)$$

Laivo įsibėgėjimas ypač svarbus uostuose, kur atstumas tarp krantinių ir uosto vartų yra nedidelis, o laivui uosto vartuose būtina pasiekti pakankamą jo valdymo ir dreifo bei nunešimo įveikimo greitį. Paskirais atvejais naudojamas dar ir vilkikas, kuris vilkdamas laivą sudaro papildomą jėgą, t. y. jėga F , esanti laivo įsibėgėjimo kelio ir laiko formulėse, šiuo atveju užrašoma taip:

$$F = F_s + F_v, \quad (2.50)$$

čia: F_s – sraigto įrąžos jėga, N; F_v – vilkiko traukimo jėga (jėga „ant kablo“), N.

Taigi laivo įsibėgėjimo parametrai ypač svarbūs planuojant uostų kanalus ir akvatorijas, ypač ribotomis sąlygomis, optimizuojant uostų infrastruktūros plėtrą. Siekiant padidinti laivybos saugumą uoste ir jo prieigose, numatomos papildomos priemonės, tokios kaip vilkikai, hidrometeorologinių sąlygų apribojimai ir panašiai.

2.6. Minimalus laivo valdomumo greitis stabdant

Minimalus laivo valdomumo greitis stabdant priimamas toks, kuriam esant laivas dar reaguoja į vairo plokštės sukuriamą momentą, kitaip tariant, kol „klauso“ vairo. Jis svarbus planuojant uosto kanalus, ypač vidines akvatorijas, kai būtina išlaikyti laivą numatytoje plaukimo juostoje plaukiant prie apsisukimo baseinų, krantinių ir kitų uosto vietų.

Minimalų laivo valdomumo greitį stabdant galima apskaičiuoti pagal momentų lygtį (2.03):

$$\begin{aligned} (I_Z + \lambda_{66}) \frac{d\omega}{dt} \sin \beta \cos \beta + M_K + M_\beta + M_P + M_a + M_b + \\ + M_{sr} + M_{sek} + M_T + M_N + M_V + \Delta M = 0 \end{aligned} \quad (2.51)$$

čia: ΔM – papildomas momentas, vadinamieji „triukšmai“, atsirandantys dėl laivo korpuso nelygumo (slemingo pasekmė), skirtingo laivo korpuso bortų apaugimo ir panašiai, dėl ko susidaro skirtingas laivo bortų pasipriešinimas ir dėl to papildomas momentas Z ašies atžvilgiu, N·m.

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

Įvertinus sąlygą, kad laivo valdomumas stabdant priimamas tol, kol jis juda pirminiu kursu, t. y. kol yra valdomas, paskutinė momentų lygtis užrašoma taip:

$$M_p + M_v + M_N + M_T + \Delta M = 0. \quad (2.52)$$

Nesant išorinių poveikio jėgų, momentų lygtis užrašoma taip:

$$M_p + \Delta M = 0. \quad (2.53)$$

Irašę M_p reikšmę, turime:

$$C_y \frac{\rho}{2} S \cdot v_{\min}^2 \cdot \frac{L}{2} = \Delta M. \quad (2.54)$$

Iš čia minimalus laivo valdomumo greitis, nesant išorinių poveikio jėgų v'_{\min} , gali būti taip apskaičiuotas:

$$v'_{\min} = \sqrt{\frac{4 \cdot \Delta M}{C_y \cdot \rho \cdot S \cdot L}}. \quad (2.55)$$

Gauta minimalaus laivo valdomumo greičio lygtis gali būti panaudota žinant papildomą momentą ΔM , bet jį apskaičiuoti sudėtinga, tai priklauso nuo laivo korpuso nelygumų, kurie, pavyzdžiui, susidarė nuo slemingo ir nėra simetriški, nuo laivo korpuso apaugimo ir kito dirbtinio šiuurkštumo, kurie taip pat nėra simetriški, todėl teoriškai apskaičiuoti papildomą momentą, kartu ir minimalų laivo valdomumo greitį v'_{\min} , gana sudėtinga.

Siekiant nustatyti v'_{\min} , tikslinga atlikti eksperimentą realiame laive. Eksperimentas atliekamas laivui judant, kai jo neveikia išorinės jėgos (smarkus vėjas, bangavimas, srovė), laivo mašina stabdoma arba kintamojo žingsnio sraigto mentės pasukamos į nulinę padėtį ir vairo laivas išlaikomas pirminio kurso padėtyje tol, kol nustoja jo „klausyti“. Greitis, kuriuo plaukdamas laivas nustoja „klausyti“ vairo, ir yra v'_{\min} .

Reikia pažymėti, kad laivai su kintamojo žingsnio sraigtais plaukia didesniu minimaliu laivo valdomumo greičiu, nes efektyvus vairo plokštės plotas, pasukus sraigto mentes į nulinę padėtį, sumažėja, kadangi „sraigto skydas“ dengia dalį vairo plokštės (Paulauskas D., Paulauskas V. 2009).

Atlikus bandymus nustatyta, kad laivai, turintys fiksuoto žingsnio sraigtus, pasiekia minimalų valdomumo greitį – nuo 1,0 iki 5,0 mazgų. Didesnis minimalus valdo-

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

mumo greitis yra pakrautiems laivams, nes mažesnis vairo plokštės ir povandeninės laivo dalies projekcijos į laivo vidurinę plokštumą, t. y. S/F_d , santykis (Strem 2004).

Laivų, turinčių kintamojo žingsnio sraigta, minimalus laivo valdomumo greitis (v'_{\min}) siekia nuo 3,0 iki 9,0 mazgų. Didesnę greitį pasiekia laivai su sraigtu tūtoje, kurie turi tik stabilizatorių arba jo neturi.

Veikiant išoriniams veiksniams, tokiems kaip vėjas ir srovė, minimalus laivo valdomumo greitis, sustabdžius laivo mašiną arba kintamojo žingsnio sraigto mentes pasukus į nulinę padėtį, didėja. Srovės poveikis neryškus, nes laivas šiuo atveju juda tarsi ant „judančios platformos“ ir srovė veikia tada, kai jos greitis kinta išilgai laivo. Vėjas tiesiogiai veikia minimalų laivo valdomumo greitį stabdant, o momentų lygtis šiuo atveju užrašoma taip:

$$M_p + M_v + \Delta M = 0. \quad (2.56)$$

Irašę momentų reikšmes į (2.56) lygtį, gausime:

$$C_y \frac{\rho}{2} S \cdot v_{\min}^2 \frac{L}{2} + C_v \frac{\rho_1}{2} S_x \cdot v_a^2 \cdot \sin g_a \cdot x_v + C_y \frac{\rho}{2} S (v'_{\min})^2 \frac{L}{2} = 0. \quad (2.57)$$

Iš (2.57) lygties v_{\min} apskaičiuojamas taip:

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{C_v \cdot \rho_1 \cdot S_x \cdot v_a^2 \cdot \sin q_a x_v + C_y \cdot \rho \cdot S (v'_{\min})^2 \frac{L}{2}}{C_y \cdot \rho \cdot S \cdot \frac{L}{2}}}. \quad (2.58)$$

Kaip matyti iš v_{\min} formulės, minimalus laivo valdomumo greitis proporcingas vėjo greičiui (v_a) ir vėjo kurso kampui q_a bei atvirkščiai proporcingas vairo plokštės plotui. Minimalus laivų valdomumo pasyviai stabdant greitis svarbus esant ribinėms uosto infrastruktūros sąlygoms, į tai būtina atsižvelgti planuojant uosto infrastruktūrą.

Laivo valdomumas aktyviai stabdant kinta dėl sparčiai kintančio vairo plokštės ploto ir šoninių sraigto jėgų poveikio. Jeigu vairo plokštė yra už sraigto, šiam sukantis atbuline eiga ir laivui judant į priekį, vairo plokštės aptekėjimas sraigto srauto zonoje tampa chaotiškas.

Efektyvioji vairo plokštės dalis lieka S_2 , o dalimi, kuri patenka į sraigto srautą S_1 , apteka chaotiškas srautas (Paulauskas D., Paulauskas V. 2009), dėl to vairo plokštės plotas S_1 tampa neefektyvus.

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

Tuo tarpu sraigto šoninė jėga Y_s , susidaranti dėl slėgio skirtumų sraigto viršutinėje ir apatinėje dalyse, sukuria vienos krypties jėgą (Paulauskas et al. 2009; Strem 2004), kurią galima taip apskaičiuoti (Paulauskas 1999B):

$$Y_s = K_1' \rho n_{a.e.}^2 D_s^4 \sin \alpha_s, \quad (2.59)$$

čia: K_1' – sraigto įrašos jėgos koeficientas sraigtui sukantis atbuline eiga; $n_{a.e.}$ – sraigto sukimosi atbuline eiga dažnis, sūk./s; D_s – sraigto skersmuo, m; α_s – sraigto srauto nuokrypos kampas, imamas kaip vidutinis, nes daugelio sraigčių svyruoja nuo 2^0 iki 4^0 , tada vidutinė jo reikšmė – maždaug 3^0 (Strem 2004).

Momentų lygtis laivą aktyviai stabdant, kai neveikia išorinio poveikio jėgos, taip užrašoma:

$$M_{Y_S} + M_{P_2} + \Delta M = 0. \quad (2.60)$$

Įrašius momentų reikšmes, (2.60) lygtis užrašoma taip:

$$K_1' \rho n_{a.e.}^2 D_s^4 \sin \alpha_s \frac{L}{2} + C_y \frac{\rho}{2} S_2 v_{\min}^2 \frac{L}{2} + C_y \frac{\rho}{2} S (v'_{\min})^2 \frac{L}{2} = 0. \quad (2.61)$$

Iš paskutinės lygties minimalus laivo valdomumo greitis aktyviai stabdant bus:

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{K_1' \cdot 2 \cdot n_{a.e.}^2 \cdot D_s^4 \cdot \sin \alpha_s + C_y \cdot S \cdot (v'_{\min})^2}{C_y \cdot S}}. \quad (2.62)$$

Kai aktyviai stabdomą laivą veikia išorinės poveikio jėgos, į jas būtina atsižvelgti. Labiausiai tokiais atvejais veikia aerodinaminė jėga, be to, paskirais atvejais gali būti svarbus bangų poveikis ir srovė. Momentų lygtis, esant išorinėms poveikio jėgoms, taip užrašoma (Paulauskas D., Paulauskas V. 2009):

$$M_{Y_S} + M_{S_2} + \Delta M + M_V + M_B + M_{S_r} + \dots = 0. \quad (2.63)$$

Kadangi minimalus laivo valdomumo greitis yra vairo plokštės momento M_{S_2} dėmuo, aktyviai stabdant jis taip skaičiuojamas:

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

$$v_{\min} = \sqrt{\frac{M_{y2} + \Delta M + M_V + M_B + M_{sr} + \dots}{C_y \frac{\rho}{2} S_2 \frac{L}{2}}} \quad (2.64)$$

Lygtyje (2.64) pateikti momentai nagrinėti anksčiau, todėl ši lygtis gali būti pritaikyta konkrečiam laivui ir apskaičiuotas minimalus laivo valdomumo greitis, esant konkrečioms aplinkybėms.

Minimalus laivo valdomumo greitis stabdant ypač svarbus manevruojant uostuose ir kitose ribotose vietose, nes valdomumą praradęs laivas, plaukdamas pirmyn santykinai dideliu greičiu, gali išplaukti už kanalo arba akvatorijos ribų, todėl planuojant uosto infrastruktūrą turi būti įvertintas minimalus skaičiuojamojo laivo valdomumo greitis laivą stabdant, o esant ribotiems uosto infrastruktūros elementų parametrams – ir būtinos vilkikų traukimo jėgos (jėga „ant kablo“), norint suvaldyti laivą esamo kanalo arba akvatorijos ribose.

2.7. Uoste švartuojamą laivą veikiančios jėgos

Švartuojant laivą prie krantinės ir atšvartuojant nuo jos, turi būti tiksliai nustatytos būtinos papildomos jėgos ir galingumai, kurie kompensuotų išorines poveikio jėgas. Bendru atveju švartuojamą laivą veikia šios jėgos: laivo inercinė (stabdant laivą arba jam suteikiant būtiną greitį); hidrodinaminės srovės tiesioginio poveikio; hidrodinaminės „sparno“ efekto (laivui judant prieš srovę arba jam stovint grunto atžvilgiu ir esant srovei); aerodinaminės; seklumos poveikio; kitos anksčiau nagrinėtos jėgos.

Švartuojamą laivą veikia dinaminės jėgos, dalį kurių įveikia laivo sraigto ir vairo kompleksas bei pavairavimo įrenginiai, jeigu tokie yra, kitas būtina įveikti naudojant vilkikus. Norint nustatyti būtiną vilkikų skaičių ir jų minimalų galingumą, pirmiausia reikia nustatyti galimas laivo poveikio jėgas.

Laivo inercinė jėga visada nustatoma jį stabdant arba jam išibėgėjant. Bendru atveju laivo inercinėms jėgoms skaičiuoti taikoma diferencialinė lygtis (Paulauskas D., Paulauskas V. 2009):

$$m \frac{dv}{dt} = R + T_s + T_{pv} + T_v, \quad (2.65)$$

čia: m – laivo masė kartu su pridėtają skysčio mase, kg; $\frac{dv}{dt}$ – laivo pagreitis, m/s^2 ; R – laivo korpuso pasipriešinimo jėga, N; T_s – laivo sraigto įrašos jėga, N; T_{pv} – laivo pavairavimo įrenginių sukuriama jėga, N; T_v – vilkikų sukuriama jėga, N.

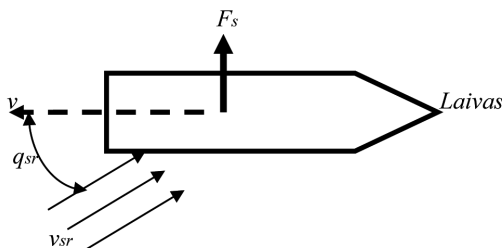
2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

Tiesioginis srovės poveikis pasireiškia kaip hidrodinaminis pasipriešinimas, kuris skaičiuojamas pagal formulę (Paulauskas 1994):

$$R = C \frac{\rho}{2} \Omega \cdot v^2 \cdot \sin q_{sr}, \quad (2.66)$$

čia: C – hidrodinaminis koeficientas; ρ – vandens tankis, kg/m^3 ; Ω – sudrėkintasis laivo korpuso plotas, m^2 ; v – judėjimo greitis, m/s ; q_{sr} – srovės poveikio kampas (srovės kurso kampas), laipsniais.

Srovės greitis ir jos poveikis yra svarbūs, kai laivas stovi vienoje vietoje grunto atžvilgiu arba juda prieš srovę. Hidrodinaminis srovės sukuriamas „sparno“ efekto poveikis svarbus laivui judant prieš srovę, kai susidaro „sparno“ efektas (2.11 pav.).



2.11 pav. Hidrodinaminis „sparno“ efekto poveikis laivui

Fig. 2.11. Hydrodynamic “wing’s” effect on ship

Dėl „sparno“ efekto atsiradusi papildoma srovės poveikio jėga sudaro šoninę jėgą, kuri skaičiuojama taip (Paulauskas D., Paulauskas V. 2009):

$$F_s = C_y \frac{\rho}{2} F_d \cdot (v_s - v)^2, \quad (2.67)$$

čia: C_y – hidrodinaminis koeficientas, kuris priklauso nuo srovės kurso kampo ir gali būti skaičiuojamas taip:

$$C_y = 2 \cdot q_{sr} / 57,3; \quad (2.68)$$

F_d – laivo povandeninės dalies projekcijos į vidurinę plokštumą plotas, kuris skaičiuojamas taip:

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

$$F_d = \wp LT, \quad (2.69)$$

čia: \wp – laivo povandeninės dalies vidurinės plokštumos pilnumo koeficientas, gali būti imamas 0,95 laivams be bulbos ir 1,0 – laivams su bulba; L – laivo ilgis tarp statmenų, m; T – vidutinė laivo grimzlė, m.

Hidrodinaminė „sparno“ efekto jėga svarbi tada, kai laivas juda kampu į srovę ir prieš srovę.

Laivo „Kuršis“ avarinė situacija 2015-07-28 Klaipėdos uoste susiklostė, kai švartuojant laivą prie krantinės nepaisyta „sparno“ efekto, dėl ko laivas „Kuršis“ savo foršteveniu įsirišė į keltą „Kintai“ (2.12 pav.). Srovė, ištekanti iš Danės upės, ir laivas „Kuršis“, plaukiantis kampu į srovę, sudarė „sparno“ efektą, todėl laivas dėl srovės poveikio judėjo ne srovės kryptimi, o statmenai savo korpuso kryptiai.



2.12 pav. Laivo „Kuršis“ susidūrimas su keltu „Kintai“

Fig. 2.12. Vessel's "Kuršis" collision with ferry "Kintai"

Aerodinaminė jėga priklauso nuo laivo viršvandeninės dalies architektūros ir vėjo greičio, ji skaičiuojama pagal formulę (Paulauskas et al. 2009):

$$F_a = C_v \frac{\rho_1}{2} \sqrt{(S_x^2 + S_y^2)} v_a^2 \cdot \sin q_a, \quad (2.70)$$

čia: C_v – aerodinaminės jėgos koeficientas; ρ_1 – oro tankis; S_x ir S_y – laivo viršvandeninės dalies projekcijos atitinkamai į vidurinę ir vidurinę ir vidurinę ir vidurinę plokštumas plotai; v_a – vėjo greitis; q_a – vėjo kurso kampas.

Aerodinaminė jėga ypač svarbi laivams, kurių dideli viršvandeniniai plotai. Seklumo poveikio jėga pasireiškia padidėjus pridėjajai skysčio masei, ji gali būti skaičiuojama atskirai arba vertinant laivo masę kartu su pridėjajai skysčio mase.

Bendruoju atveju jėgų ir momentų (2.01)–(2.03) lygtys, laivui švartuojantis, gali būti naudojamos, pritaikant jas konkrečioms sąlygoms. Pavyzdžiui, pagal (2.01) ir (2.02) lygtis gali būti apskaičiuojamos laivų švartavimosi sąlygos, būtinas papildomas vilkikų galingumas. Nustačius pastarąjį (traukimo jėgą) ir žinant, kiek uostas turi vilkikų, apskaičiuojamas būtinas minimalus vilkikų skaičius.

2.8. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametrų tyrimai

Uostų infrastruktūra – tai hidrotechniniai ir navigaciniai statiniai bei įranga, užtikrinanti saugų laivų įplaukimą į uostą, stovėjimą jame ir išplaukimą (Paulauskas D. 2013).

Planuojant uosto infrastruktūrą atsižvelgiama į laivų, galinčių įplaukti į uostą, parametrus. Paskirais atvejais uosto infrastruktūros plėtra planuojama turint politinių ar karinių motyvų, kitų tikslų. Uosto, ypač jūrų, infrastruktūros planavimas skiriasi nuo kitos transporto infrastruktūros planavimo. Pavyzdžiui, planuojant geležinkelio infrastruktūrą numatoma geležinkelio pločio, tunelių, viadukų ir tiltų virš geležinkelių atsarga, apkrova į ašį, remiamasi standartizuotais maksimaliais transporto priemonių geometriniais parametrais. Tuo tarpu planuojant jūrų uosto infrastruktūros plėtrą, pagrindinis ribojantis veiksnys yra maksimalūs sąsiaurių ir kitų jungčių geometriniai parametrai, jungiantys konkrečią jūrą, kurioje numatyta statyti uostą, su pasaulio vandenynu. Pavyzdžiui, Baltijos jūros uostų jungties parametras yra Belto sąsiaurio gylis (Alderton, 1995). Kartais uosto infrastruktūros parametrus gali lemti kiti techniniai veiksniai, pavyzdžiui, natūralių sąsiaurių plotis, kiti nekeičiami arba sunkiai keičiami techniniai parametrai, tokie kaip miestas prie sąsiaurio, kurio negalima nugriauti ar perstatyti.

Visi kiti galimi uosto planavimo apribojimai yra santykiniai ir dažniausia priklauso nuo rinkos ar kitų specifinių sąlygų ir reikalavimų, tokių kaip uostų akvatorijų dydis, uolų ribojamas įplaukimas į uostus, pavyzdžiui, Stokholmo, Helsinkio (Hackman, 2000).

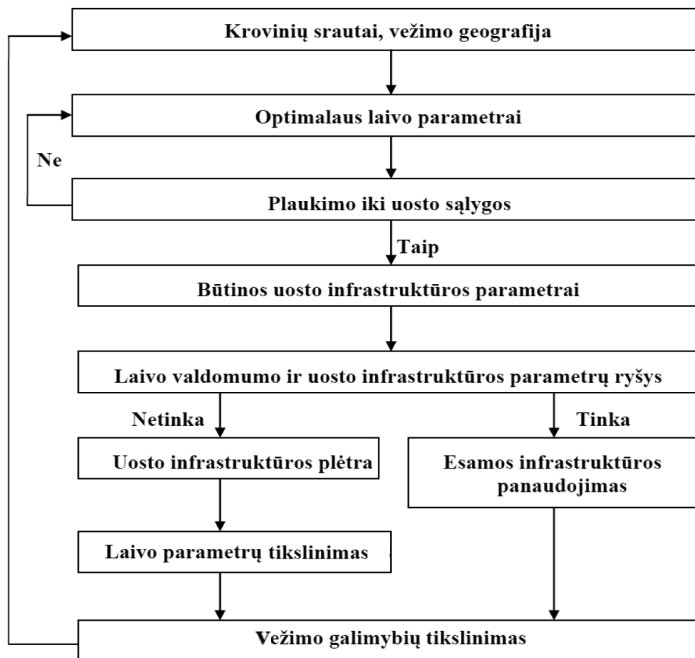
Todėl planuojant jūrų uostų infrastruktūros elementus ir nustatant laivų geometrinis parametrus bei jų manevrines galimybes, reikia įvertinti šias sąlygas:

- įplaukimo į jūrą iš pasaulio vandenyno apribojimai;
- uosto infrastruktūros plėtros apribojimai (pvz., per daug sudėtingi ir brangūs uostų prieigos plėtros darbai);
- esami ir numatomi krovinių srautai;
- esami ir numatomi laivų tipai, jų maksimalūs parametrai ir manevrinės savybės;

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

- uosto ekonominė situacija ir galimybės;
- aplinkosaugos reikalavimai ir galima neigiama aplinkos poveikio rizika;
- kiti galimi ribojimai.

Planuojant uosto infrastruktūrą tikslinga remtis principine uosto infrastruktūros planavimo schema (2.13 pav.), parengta autoriaus, pirmiausia remiantis numatomais kroviniais srautais ir krovinų vežimo geografija, nes krovinų rūšys lemia laivų tipus, o krovinų vežimo geografija – laivų dydžius (pavyzdžiui, vežant skystuosius krovinius iš Baltijos jūros regiono į pietryčių Azijos šalis tikslingiausia naudoti maksimalių parametrų laivus, kurie gali įplaukti į konkretų jūros regioną). Priėmus galimą didžiausią laivą, būtina patikrinti esamą uosto infrastruktūrą, t. y. gali laivas įplaukti į uostą ar ne (analizuojami esamos uosto infrastruktūros parametrai). Jeigu laivas gali įplaukti į uostą, tiriamos jo plaukimo sąlygos ir būtinos papildomos priemonės, tokios kaip vilkikai. Jeigu uosto infrastruktūra neleidžia priimti planuojamo laivo, sprendžiama: plėtoti uosto infrastruktūrą ar tikslinti laivo parametrus, ar galimą jo pakrovimo lygį (dalinis pakrovimas), tada tikslinama galima planuoto krovinų srauto vežimo galimybė.



2.13 pav. Uosto infrastruktūros planavimo principinė schema (Paulauskas D.)

Fig. 2.13. Port infrastructure planning scheme (Paulauskas D.)

Nurodyti uostų infrastruktūros parametų planavimo principai paprastai atsižvelgia į apribojimus, kurie pagrįsti techniniais, aplinkosaugos, organizaciniais ir juridiniais reikalavimais, pavyzdžiui, laivų dydžiais, esamais uosto infrastruktūros parametrais, kur galimi šie ribojantys veiksniai: krovinių srautai; įplaukimo į jūrą ar uostą apribojimai; aplinkosauginiai apribojimai; galimas techninis uosto dydis (geografiniai apribojimai); tikslingas uosto dydis rinkos požiūriu.

Tokio pobūdžio uosto infrastruktūros parametų planavimo principai yra svarbūs optimizuojant investicijas ir gali būti taikomi bendrai visam uostui arba konkreitiems jo terminalams.

2.9. Būtinai minimalūs uosto akvatorijos (kanalų, laivų apsisukimo baseinų) parametrai, įvertinant laivo manevrines savybes

Planuojant uostus ir paskiras jų dalis svarbu nustatyti minimalius uosto infrastruktūros (navigacinių kanalų plotis, kanalų ir akvatorijų gylis) parametrus. Įvertinus laivo manevrines savybes, būtina tiksliai apskaičiuoti būtinus minimalius gylius, orientuojantis į galimus maksimalius laivus, galimus minimalius kanalų plotius, laivų apsisukimo baseinų skersmenis, galimus minimalius prieigų prie krantinių parametrus.

Siekiant nustatyti būtinus uosto kanalų ir akvatorijų gylius svarbu įvertinti daugelį veiksnių, kurie turi įtakos laivybos saugumui. Kanalų ir akvatorijų gylis skaičiuojamas atsižvelgiant į: maksimalią laivo grimzlę; gylio matavimo tikslumą; vandens lygį ir galimą jo pokytį (vandens lygio matavimo tikslumą); laivo „prasėdimą“ dėl greičio; galimą laivo grimzlės padidėjimą dėl laivo išilginio ir šoninio posvyrio; navigacinę atsargą, kuri apima galimus dugno pokyčius.

Būtina žinoti, kaip keičiasi laivo grimzlė plaukiant uostų kanalais ir akvatorijomis, tai leidžia tiksliai nustatyti būtiną kanalų gylį ir numatyti investicijas į uosto plėtrą.

Taigi bendra minimalaus būtino gylio skaičiavimo formulė atrodo taip (Paulauskas D., Paulauskas V. 2009):

$$H_{\min} = T + \Delta T_v + \Delta T_\theta + \Delta T_\psi + \Delta H_m + \Delta H_{V.L} + \Delta H_{\Delta V.L} + \Delta H_n, \quad (2.71)$$

čia: T – maksimali laivo grimzlė, m; ΔT_v – laivo grimzlės padidėjimas dėl „prasėdimo“ (greičio), m; ΔT_θ – laivo grimzlės padidėjimas dėl pasvirimo, m; ΔT_ψ – laivo grimzlės padidėjimas dėl bangavimo poveikio, m; ΔH_m – gylio matavimo tikslumas, m; $\Delta H_{V.L}$ – vandens lygio pokytis konkrečioje uosto vietoje, m; $\Delta H_{\Delta V.L}$ – vandens lygio matavimo tikslumas, m; ΔH_n – navigacinė atsarga, m.

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

Laivo grimzlės padidėjimas dėl laivo plaukimo greičio, įvertinus pridėtosios skysčio masės pokytį esant mažam gyliui, gali būti taip apskaičiuotas:

$$\Delta T_V = \frac{T_S}{T} = \sqrt{\frac{1 + K_{11}^1}{1 + K_{11}}}, \quad (2.72)$$

čia: K_{11} ir K_{11}^1 – pridėtosios skysčio masės koeficientai esant dideliam gyliui ir seklumoje.

Laivo grimzlės padidėjimas dėl pasvirimo, kuris gali atsirasti dėl išorinių poveikio jėgų, t. y. vėjo, vilkikų poveikio, laivo pasvirimo jam sukantis ir panašiai, skaičiuojamas pagal formulę:

$$\Delta T_\theta = \left(\frac{B}{2} - R'\right) \cdot \operatorname{tg} \theta, \quad (2.73)$$

čia: θ – laivo pasvirimo kampas, kuris dideliems laivams, kai šoninis vėjas yra apie 12 m/s, gali būti iki 2° ; R' – laivo korpuso vidurinės dalies užapvalinimo spindulys yra svarbus esant ribiniams gyliams, nustatomas pagal klasifikacinių bendrovių taisyklės (visų pagrindinių klasifikacinių bendrovių plokščiadugnių laivų korpuso apatinės dalies kraštų užapvalinimo taisyklės, o visi dideli jūriniai laivai yra plokščiadugniai, yra panašios) ir gali būti taip apskaičiuotas (ABS 2005):

$$R' = 1,525 \cdot \sqrt{(1 - \gamma) \cdot B \cdot T}, \quad (2.74)$$

čia: γ – midelio španto pilnumo koeficientas, daugeliu atvejų dideliems laivams priimamas apie 0,95.

Gylio matavimo tikslumas priklauso nuo turimos įrangos. Naudojant vertikalios ir šoninio gylio skenavimo įrangą, šis tikslumas sudaro ne daugiau kaip 0,1 m. Vandens lygio konkrečioje uosto vietoje konkrečiu metu matavimo tikslumas sudaro nuo 0,05 iki 0,20 m, naudojant šiuolaikinę vandens lygio matavimo įrangą keliose uosto vietoje jis gali padidėti iki 0,05 m.

Navigacinė atsarga nustatoma, atsižvelgiant į matavimo dažnį ir tikslumą, dugno užnešimą ir kitus sudėtingus reiškinius, todėl įvairiuose uostuose ji skirtinga. Pavyzdžiui, Klaipėdos uoste, atsižvelgiant į iki šiol naudotą gilinimo darbų techniką ir įvertinant galimą dugno užnešimą bei periodinį dugno valymą, ji gali būti priimta apie 0,2–0,3 m.

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

Atliekant didžiųjų laivų plaukimo kanalais tyrimus būtina apimti: minimalų kanalo plotį; minimalius galimų kanalų ir akvatorijų gylius; laivų apsisukimo baseinų parametrus esant ribinėms sąlygoms. Atliekant teorinius tyrimus kaip pagrindas imami didžiausi numatyti laivai, pavyzdžiui, planuojant, kaip optimaliai išnaudoti Klaipėdos uosto Malkų įlanką, tirti šie galimi didžiausi laivai (esant 12 m gyliui):

- konteinervežis, kurio ilgis – 245 m, plotis – 32,8 m, grimzlė – 11 m;
- automobilių vežimo laivas, kurio ilgis – 230 m, plotis – 33 m, grimzlė – 11 m.

Kanalų plotis tyrinėjamas keliais būdais: taikant klasikinę kanalo pločio nustatymo teoriją, kai įvertinami laivo kinematiniai parametrai, gauti natūraliomis sąlygomis; skaičiuojant ir naudojant treniruoklius; remiantis PIANC rekomendacijomis analogiškomis sąlygoms; atliekant palyginamąją analizę (lyginama su kitais uostais).

Taikant klasikinę teoriją, kanalo plotis skaičiuojamas pagal formulę (Paulauskas 2011):

$$B_k = L \sin \beta + B \cos \beta + L \sin \Delta K + P' \sigma_y + b_n, \quad (2.75)$$

čia: L – laivo ilgis tarp statmenų (paprastai priimtas maksimalus), m; B – laivo plotis, m; β – laivo dreifo kampas plaukiant kanalu, rad.; ΔK – laivo krypavimo kampas apie kursą plaukiant kanalu, laipsniais; b_n – navigacinė atsarga, kuri priklauso nuo kanalo šlaitų tikslumo ir pastovumo, m; P' – tikimybinis aprūpinimo koeficientas, laivavedyboje priimant ne mažesnę kaip 95 % aprūpinimą, P' turi būti ne mažesnis kaip 2,5; σ_y – laivo vietos nustatymo kanalo ašies atžvilgiu tikslumas, pavyzdžiui, vedlinės jautrumas.

Laivo dreifo kampas plaukiant kanalu, įvertinus galimą laivo dreifo greitį, skaičiuojamas pagal formulę:

$$\beta = \arctg \beta = \frac{v_d}{v}, \quad (2.76)$$

čia: v – laivo greitis kanale, m/s, pavyzdžiui, Klaipėdos uoste leidžiama plaukti 8 mazgų (4,12 m/s) greičiu; v_d – laivo dreifo greitis, įvertinus vėjo ir seklumos poveikį, gali būti apskaičiuotas pagal formulę:

$$v_d = v_a \sqrt{\frac{C_a \rho_1 S_x}{C_y \rho F_d} \frac{1}{k_{R22}}}, \quad (2.77)$$

čia: v_a – vėjo greitis, m/s; C_a – aerodinaminis koeficientas, galimas apie 1,07 (atsižvelgiant į laivo formą, nustatomas prapučiant laivo modelį aerodinaminiam vamz-

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

dyje, jis gali būti nuo 0,85 iki 1,3); ρ_1 – oro tankis, skaičiuojant imamas $1,25 \text{ kg/m}^3$; S_x – laivo viršvandeninės dalies buringumo projekcijos į DP plotas, m^2 ; C_y – hidrodinaminis koeficientas, skaičiuojant imamas 1,5 (atsižvelgiant į laivo povandeninės dalies ypatybes [vienas arba daugiau sraigčių, laivas turi bulbą ar ne ir pan.], šis koeficientas gali būti iki 1,5, pavyzdžiui, stačiakampės plokštės, kuri išsidėsčiusi skersai srauto, koeficientas bus 2); ρ – vandens tankis, skaičiuojant gėlam vandeniui imamas 1000 kg/m^3 , jūros vandeniui gali sudaryti iki 1027 kg/m^3 (Šiaurės Atlantas); F_d – laivo povandeninės dalies projekcijos į DP plotas, m^2 ; k_{R22} – papildomas laivo korpuso pasipriešinimo koeficientas laivui judant šonu dėl seklumos poveikio.

Uostuose didelių laivų krypavimo apie kursą kampas (ΔK), kai vėjo greitis siekia iki 16 m/s (esant stipresniam vėjui, laivai į uostus neplukdomi ir iš jų neišplukdomi, išskyrus avarinius atvejus), sudaro iki $1,0^0$ – $1,5^0$. Papildoma navigacinė atsarga, išreiškianti kanalo šlaitų parametrų tikslumą ir galimą jų pasikeitimą, uostuose nustatoma iki $0,25 \text{ B}$ į kiekvieną kanalo pusę, t. y. iš viso $0,5 \text{ B}$ (didžiausio skaičiuojamojo laivo pločio). Naudojant šiuolaikinę įrangą ir nuolat matuojant kanalų gylį, be to, gerai žinant kanalo šlaitų parametrų tikslumą, navigacinė atsarga gali būti sumažinta iki $0,1 \text{ B}$ iš kiekvieno kanalo krašto, t. y. bendra navigacinė atsarga gali būti $0,2 \text{ B}$. Laivo vietos nustatymo tikslumas kanalo ašies atžvilgiu, naudojant vedlinę, sudaro nuo 3 iki 5 m , naudojantis sektoriniu navigaciniu žiburiu ir kanalų plūdūrų sistema, šis tikslumas gali sudaryti iki 10 – 20 m .

Norint uoste užtikrinti laivybos saugumą ir optimizuoti investicijas į uosto kanalų bei akvatorijų plėtrą, svarbu nustatyti optimalų kanalo plotį. Įvertinus galimų maksimalių laivų, kurie plauks į uostą, parametrus, būtina numatyti pagrindines laivų apsisukimo baseinų sąlygas: turi užtikrinti navigacinį saugumą laivui apsisukant arba jį apsuksiant su vilkikais; turi būti minimaliai nutolę nuo krantinių, kad laivo plaukimo atbuline eiga kelias nuo apsisukimo baseino iki krantinės būtų minimalus, paskirais atvejais gali būti ribojamos hidrometeorologinės sąlygos ir didinamas naudojamų vilkikų galingumas; kuo mažiau trukdoma kitiems laivams, kurie nesinaudoja apsisukimo baseinu.

Laivų apsisukimo baseinų navigacinis saugumas priklauso nuo baseino geometrinų parametrų, t. y. nuo minimalaus jo skersmens. Pastarasis, sukant laivą vilkikais esant geroms oro sąlygoms, t. y. ne didesniai kaip 12 m/s vėjo greičiui, turi būti ne mažesnis kaip (PIANC 2010):

$$D_B = L + 0,1L + 2B_V = 1,1L + 2B_V, \quad (2.78)$$

čia: L – maksimalus laivo, kuris apsuksamas laivų apsisukimo baseine, ilgis, m ; B_V – maksimalus vilkiko plotis, m .

2. Uosto infrastruktūros plėtros ir ribines sąlygas atitinkančių laivų...

Laivų apsikimo baseino skersmuo, apskant laivą vilkikais, gali būti taip apskaičiuotas:

$$D_{ap} = L_M + P' \cdot \sigma_y + 2B_v + b_n + \Delta b', \quad (2.79)$$

čia: B_v – vilkiko plotis (jis turėtų praplaukti pro apsakamą laivą), m; $\Delta b'$ – papildoma vilkiko, praplaukiančio pro laivą, atsarga, m.

Laivų apsisukimo baseino skersmuo, plaukiant laivams, kurių ilgis, pavyzdžiui, 250 m, turi būti ne mažesnis kaip 290 m. Jei laivai naudoja stūmas, laivo apsisukimo baseino skersmuo turi būti ne mažesnis kaip $(1,1-1,3)L$ (mažesnis koeficientas taikytinas didesniems laivams, turintiems galingas stūmas [ang. *Trusters*], pavyzdžiui, minėtam laivui ($L = 250$ m) laivų apsisukimo baseino skersmuo turi būti ne mažesnis kaip 275 m).

Taigi laivų apsisukimo baseino parametrai, atsižvelgiant į didžiausio skaičiuojamojo laivo valdomumo charakteristikas, ypač svarbūs, siekiant uoste užtikrinti laivybos saugumą. Planuojant uostą turi būti įvertintos didžiausio skaičiuojamojo laivo valdomumo charakteristikos ir galimi laivo išoriniai poveikiai.

2.10. Antrojo skyriaus apibendrinimas

Atlikti laivo valdomumo įvairiomis plaukiojimo sąlygomis teoriniai tyrimai, kuriais remiantis sukurti laivo manevrinių savybių vertinimo būdai, esant mažam gyliui, tai atitinka uostų ir vandens kelių sąlygas. Šiuos būdus, esant mažam gyliui, galima taikyti skaičiuojant uosto kanalų ir akvatorijų parametrus bei planuojant uosto infrastruktūrą (kanalus ir akvatorijas).

Tikslus laivą veikiančių vidinių ir išorinių jėgų nustatymas bei momentų sąveikos įvertinimas leidžia nustatyti ribines laivų plaukimo uostų kanalais ir akvatorijomis sąlygas, tai ypač svarbu plukdant laivus į uostus ir iš jų, esant sudėtingoms hidrometeorologinėms sąlygoms, nes leidžia iš anksto apskaičiuoti būtinas išorines jėgas (vilkikus).

Taigi taikant šiame skyriuje pateiktą laivo manevrinių elementų skaičiavimo metodiką, esant mažam gyliui, sukurti analitiniai skaičiavimo metodai, kurie taikyti rengiant disertaciją ir optimizuojant Klaipėdos ir kitų uostų infrastruktūrą.

Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametrų tyrimai

3.1. Laivo kreivalinijinio judėjimo charakteristikų esant mažam gyliui tyrimai

Taikant antrame skyriuje pateiktą metodiką, atlikti įvairių laivų cirkuliacijos elementų (kinematinių parametrų ir trajektorijų) praktiniai skaičiavimai ir eksperimentiniai tyrimai realiuose laivuose bei treniruokliuose. Skaičiuojant taikytas eksperimentinis skaičiavimo metodas, kai atliekant eksperimentus realiuose laivuose buvo nustatomi laivo judesio kreivalinijine trajektorija kritiniai taškai (maksimalus laivo sukimosi kampinis greitis ir laivo stabdymo laikas), vėliau perskaičiuojant kitus kinematinis parametrus ir trajektorijas, kurios pasitelktos uosto kanalų posūkio spinduliams nustatyti, laivų apsisukimo baseinų parametrus apskaičiuoti ir kitiems praktiniams uosto infrastruktūros parametrus apskaičiuoti ir įvertinti.

Laivo manevriniams elementams skaičiuoti, taikant 2 skyriuje aprašytą metodiką, sukurta kompiuterio programa. Laivo ir eksperimentiniai duomenys laivo judėjimo trajektorijoms, stabdymo keliams ir kitiems laivo valdomumo parametrus skaičiuoti pateikti 3.1 lentelėje.

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametų tyrimai

3.1 lentelė. Laivo „Optima Seaways“ duomenys ir manevrinių parametų skaičiavimo pavyzdys

Table 3.1. Ship’s “Optima Seaways” data and calculation example of maneuverical parameters

Pavadinimas	Parametras (dydis) ir jo mato vienetas	Skaitinė reikšmė
Laivo ilgis	L , m	169,5
Laivo plotis	B , m	25,6
Grimzlė laivapriekyje	T_{lp} , m	5,9
Grimzlė laivagalyje	T_{lg} , m	6,1
Vidutinė grimzlė	T , m	6,0
Pradinis greitis	v_0 , m/s	10,3
Sraigų skaičius	vnt.	1
Nusistovėjęs kampinis laivo greitis, kai vairo plokštė pasukta 15°	$\omega_{15 \text{ max}}$, rad./s	0,012
Vairo plokštės pasukimo kampas	α , laips.	30
Vairo plokštės plotas	S , m ²	28
Vairo plokštės plotas, nepatenkantis į sraigto srautą	S_2 , m ²	4
Sraigto skersmuo	D_s , m	4,8
Laivo vandentalpa	D , kg	15346090
Stabdymo iki pusės laivo greičio laikas	t_1 , s	70
Sraigto sukimosi atbuline eiga dažnis	n_{ae} , aps./s	0,9
Sraigto įrašos koeficientas esant švartavimosi režimui	K'_{sv}	0,2
Vandens tankis	ρ , kg/m ³	1015
Sraigto srauto nuokrypos kampas	α_s , laips.	2
Gylis	H , m	8,30
Skaičiavimo periodas	Δt , s	10

3.1 lentelėje patektas ω_{15} dydis nustatytas atlikus bandymą realiame laive (ro-ro laive „Optima Seaways“). Analitinio laivo manevrinių parametų skaičiavimo pavyzdžiai pateikti lentelėse ir paveiksluose.

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametų tyrimai

3.2 lentelė. Laivo „Optima Seaways“ apsisukimo parametų skaičiavimo, esant mažam gyliui ($T/H = 0,8$), pavyzdys

Table 3.2. Ship’s “Optima Seaways” circulation trajectory on shallow waters ($T/H = 0,8$), example

Duotos sąlygos								
<u>Laivo vairo plokštės pasukimo kampas</u>								
α	15 laips							
<u>Perskaičiavimo koeficientas</u>								
I	0,004							
<u>Kampinis greitis, esant bet kuriam laivo vairo plokštės pasukimo kampui</u>								
ω_{max}	0,014 rad/s							
<u>Dreifo kampo evoliucinis periodas</u>								
$T\beta$	49,942 s							
<u>Kampinio greičio evoliucinis periodas</u>								
$T\omega$	31,431 s							
<u>Nusistovėjęs kampinis greitis</u>								
ω_v	0,013 rad/s							
<u>Greičio evoliucinis periodas</u>								
T_v	205,331 s							
<u>Laivo judesio kinematiniai parametrai</u>								
X_0	0,351							
$V'n$	0,848							
V_n	9,920 m/s							
β_n	0,077 rad							
Skaičiavimų rezultatai								
t_i , s	V_i , m/s	β_i , rad	ω_i , rad/s	X_{0i} , m	Y_{0i} , m	X_{0i} , kbt	Y_{0i} , kbt	ψ°
0	10,300	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	10,258	0,035	0,009	114,429	5,880	0,032	0,618	4,933
20	10,249	0,054	0,012	225,630	22,861	0,123	1,218	11,765
30	10,068	0,064	0,013	332,212	52,712	0,285	1,794	19,329
40	9,912	0,070	0,014	432,406	95,944	0,518	2,335	27,350
50	9,777	0,077	0,013	525,456	150,320	0,812	2,837	34,710
60	9,661	0,077	0,013	609,856	215,452	1,163	3,293	42,067
70	9,560	0,077	0,013	684,511	290,140	1,567	3,696	49,422
80	9,473	0,077	0,013	748,459	373,081	2,014	4,041	56,777
90	9,398	0,077	0,013	800,886	462,877	2,499	4,324	64,132
100	9,333	0,077	0,013	841,133	558,046	3,013	4,542	71,486
110	9,277	0,077	0,013	868,716	657,044	3,548	4,691	78,841
120	9,228	0,077	0,013	883,331	758,278	4,094	4,770	86,195
130	9,186	0,077	0,013	884,860	860,131	4,644	4,778	93,549
140	9,150	0,077	0,013	873,380	960,982	5,189	4,716	100,904

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametų tyrimai

3.2 lentelėje pateikti laivo judėjimo kinematiniai parametrai, trajektorijos koordinatės (metrais), jos perskaičiuotos kabeltais analitiniu metodu. Atlikti analitiniai nurodytų parametų skaičiavimai patikrinti realiame laive (ro-ro laive „Optima Seaways“). Analizuojant paskirus kinematinis laivo judesio parametrus (greitį, kampinį sukimosi greitį, trajektorijos koordinatės), kurie nustatyti analitiniu būdu ir eksperimentais realiame laive, nustatyta, kad paklaidos neviršijo $\pm 10\%$ ribos, kaip rekomenduojama SOLAS 74 konvencijoje (SOLAS 1974). 3.3 lentelėje pateikti skaičiavimai, atlikti pagal 2.46 ir 2.47 formules.

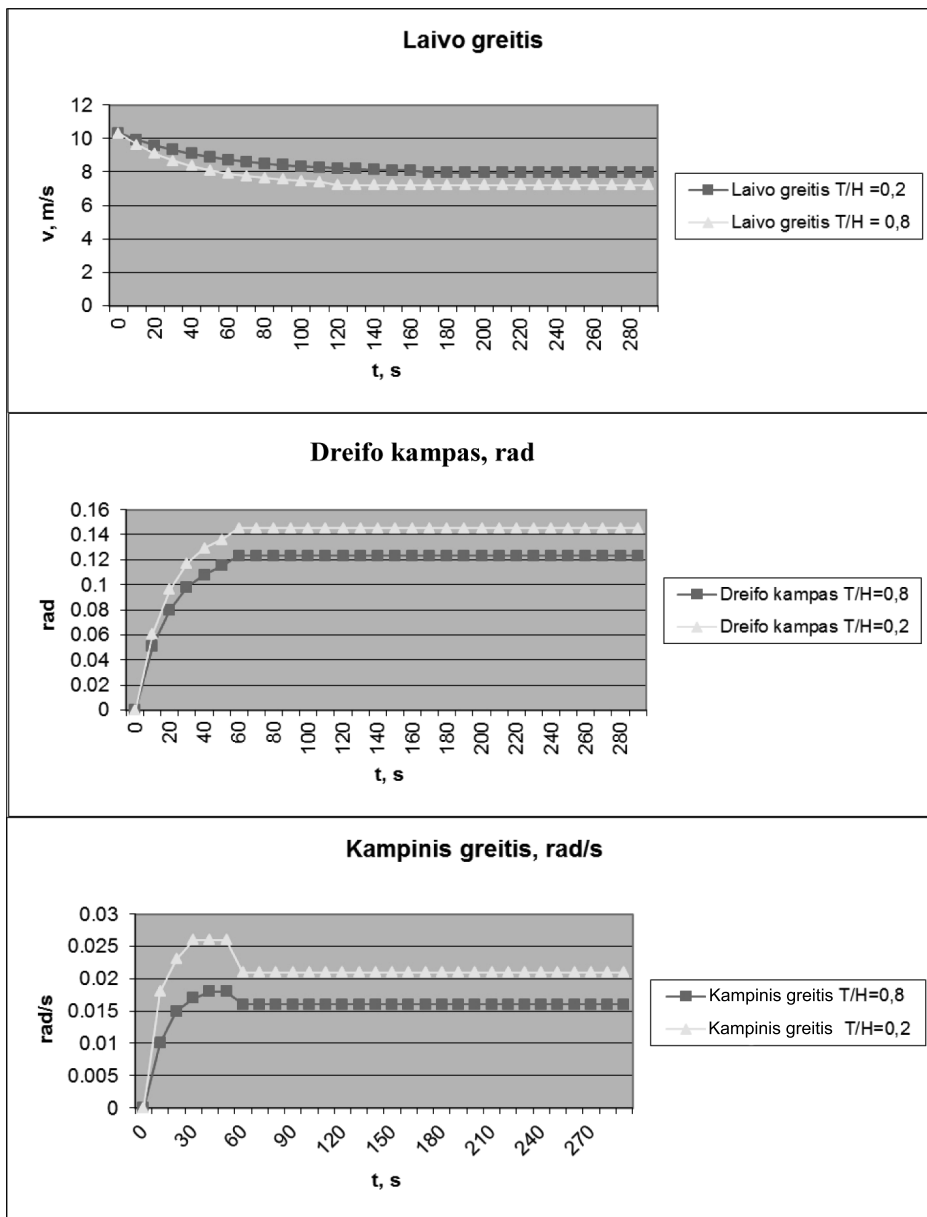
3.3 lentelė. Laivo „Optima Seaways“ aktyviojo stabdymo kelio parametų skaičiavimo, esant mažam gyliui ($T/H = 0,8$), pavyzdys

Table 3.3. Ship’s “Optima Seaways” active stopping calculation on shallow waters ($T/H = 0,8$), example

Inercijos koeficientas				
k_n	18737,59			
v_1 , m/s	5,85			
v_i , m/s	S_a , m	S_a , kbt	t_a , s	t_a , min
11.7	0	0	0	0
10.7	73,17364	0,395106	6,542056	0,109034
9.7	153,5322	0,829007	14,43299	0,24055
8.7	242,6417	1,31016	24,13793	0,402299
7.7	342,6438	1,850129	36,36364	0,606061
6.7	456,5772	2,46532	52,23881	0,870647
5.7	588,9615	3,180137	73,68421	1,22807
4.7	746,9496	4,033205	104,2553	1,737589
3.7	942,8787	5,091138	151,3514	2,522523
2.7	1200,93	6,484504	233,3333	3,888889
1.7	1579,819	8,530339	411,7647	6,862745

Taikant disertacijos autoriaus sukurtą laivo manevrinių savybių skaičiavimo metodiką, apskaičiuoti laivo judėjimo kreivalinijine trajektorija, esant mažam gyliui, kinematiniai parametrai: laivo linijinis greitis, laivo sukimosi kampinis greitis ir laivo dreifo kampas bei laivo judėjimo trajektorija (3.1–3.2 pav.). Patikrinus gautus skaičiavimo rezultatus realiame „Optima Seaways“ laive, esant analogiškomis sąlygoms, t. y. laivo grimzlei, gyliui, vėjo greičiui ir bangos aukščiui, naudojant ypač tikslią navigacinę įrangą „E-Sea Fix“, rezultatų sklaida sudarė ne daugiau kaip $\pm 10\%$ nuo skaičiuojamųjų nusistovėjusių parametų.

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametru tyrimai



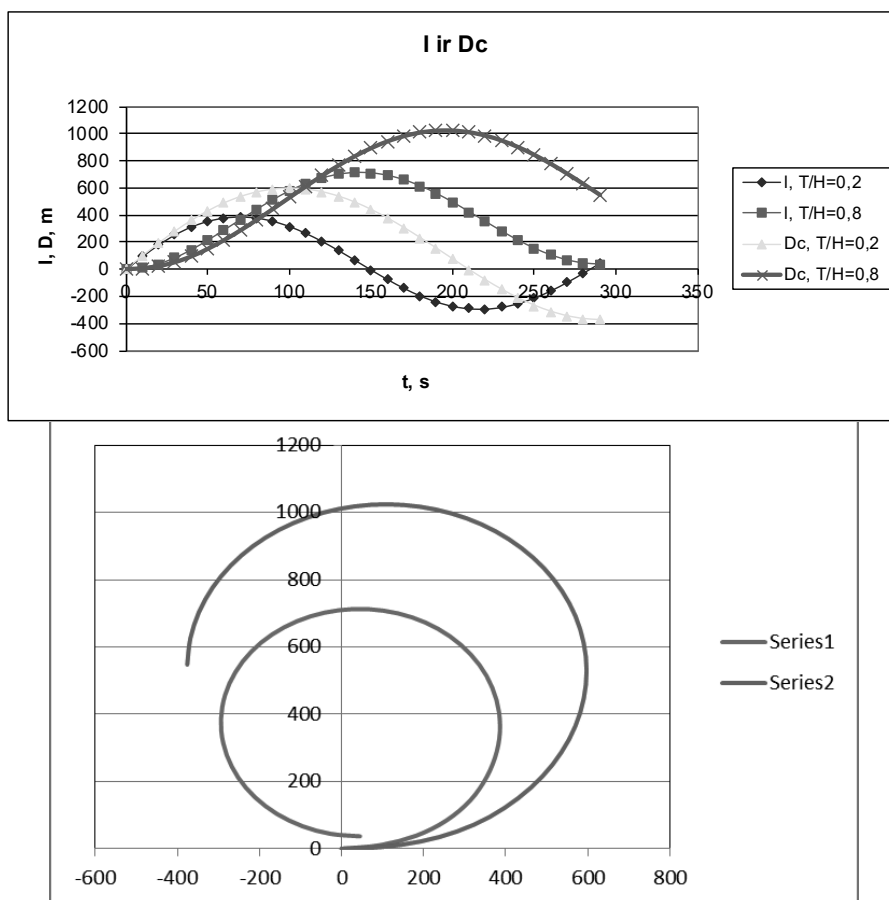
3.1 pav. Laivo „Optima Seaways“ kinematiniai parametrai, esant mažam ($T/H = 0,8$) ir dideliam ($T/H = 0,2$) gyliams, nustatyti analitinio skaičiavimo metodais (pavyzdys):
 v – greitis, m/s; t – laikas (nuo 0 iki 290 s), s; ω – kampinis sukimosi greitis, rad./s;

β – dreifo kampas, rad.

Fig. 3.1. Ships “Optima Seaways” kinematic parameters on shallow water ($T/H = 0,8$) and deep water ($T/H = 0,2$), received by calculation methods, example

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametru tyrimai

3.1 paveiksle pateikti ro-ro laivo „Optima Seaways“ judėjimo kinematiniai parametrai: v – laivo greitis, m/s; ω – laivo kampinis greitis, rad./s; β – laivo dreifo kampas, apskaičiuotas taikant analitinį metodą, esant mažam gyliui ($T/H = 0,8$) ir žinant eksperimentiškai nustatytą maksimalų laivo sukimosi kampinį greitį. Eksperimentiškai patikrinti kinematiniai laivo judėjimo parametrai atitiko skaičiuojamuosius, t. y. nusistovėjęs laivo linijinis greitis – 9,15 m/s, nusistovėjęs laivo kampinis greitis – 0,013 rad./s, nusistovėjęs laivo dreifo kampas – 0,077 rad. (duomenų išsibarstymas, lyginant duomenis, kurie gauti atlikus eksperimentą ir skaičiavimo būdu, neviršijo $\pm 10\%$).



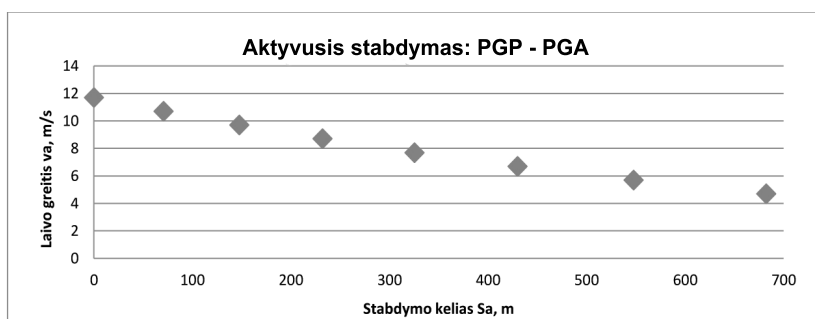
3.2 pav. Laivo „Optima Seaways“ apsisukimo trajektorija, esant mažam ($T/H = 0,8$) ir dideliam ($T/H = 0,2$) gyliui, nustatyta analitiniais skaičiavimo metodais: I – išbėga; D_c – cirkuliacijos skersmuo (Series 1 $T/H = 0,2$; Series 2 $T/H = 0,8$)

Fig. 3.2. Ship’s “Optima Seaways” circular trajectory on shallow water ($T/H = 0,8$) and deep water ($T/H = 0,2$), received by calculation method

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametru tyrimai

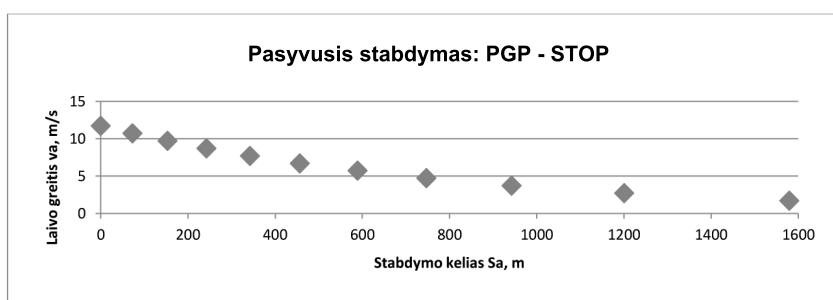
3.2 paveiksle pateikta ro-ro laivo „Optima Seaways“ trajektorija, apskaičiuota analitiniu metodu. Realiame laive atlikti tyrimai patvirtino analitiniu skaičiavimo metodu gautus rezultatus, t. y. laivo išbėga vykstant cirkuliacijai nustatyta 750 m, maksimalus laivo cirkuliacijos skersmuo – 1020 m, kitaip tariant, paklaidos trajektorijose, lyginant su cirkuliacijos išbėga ir maksimaliu skersmeniu, neviršijo $\pm 10\%$.

Taigi sukurta laivo manevrinių elementų skaičiavimo metodika, taikant eksperimentais nustatytą maksimalų laivo sukimosi kampinį greitį, yra tinkama praktiškai taikyti uosto kanalų bei laivų apsisukimo baseinų parametrus vertinti ir optimizuoti.



3.3 pav. Laivo „Optima Seaways“ aktyviojo stabdymo, esant mažam gyliui ($T/H = 0,8$), kai greitis – v_a (m/s) ir stabdymo kelias – S_a (m), parametrai nustatyti analitiniu skaičiavimo metodu (menamose X ašyje – atstumas, m; Y ašyje – greitis, m/s), pavyzdys

Fig. 3.3. Ship’s “Optima Seaways” active stopping on shallow water ($T/H = 0,8$) speed (v_a) in m/s and distance (S_a) in meters, received by calculation method (X – distance in meters, Y – speed in m/s), example



3.4 pav. Laivo „Optima Seaways“ pasyviojo stabdymo, esant mažam gyliui ($T/H = 0,8$), kai greitis – v_a (m/s) ir stabdymo kelias – S_a (m), parametrai nustatyti analitiniu skaičiavimo metodu (menamose X ašyje – nuotolis, m; Y ašyje – greitis, m/s), pavyzdys

Fig. 3.4. Ship’s “Optima Seaways” passive stopping on shallow water ($T/H = 0,8$) speed (v_a) in m/s and distance (S_a) in meters, received by calculation method (X – distance in meters, Y – speed in m/s), example

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametų tyrimai

Ro-ro laivo „Optima Seaways“ stabdymo charakteristikos, esant mažam gyliui ($T/H = 0,8$), pritaikius realiame laive atlikto eksperimento rezultatus (nustatytą laiką t_1), apskaičiuotos taikant 2 skyriuje pateiktą metodiką. Ro-ro laive „Optima Seaways“ atliktų paskirų laivo stabdymo charakteristikų eksperimentiniai tyrimai atitiko analitinio skaičiavimo rezultatus, t. y. pasyviojo stabdymo metu laivo greičio sumažėjimo nuo 12 m/s iki 2 m/s kelias sudarė apie 1150 m: paklaidos neviršijo $\pm 10\%$ stabdymo laiko arba stabdymo kelio (nuotolio) dydžio. Taigi disertacijoje pateikti laivo stabdymo parametų skaičiavimo metodai tinkami praktiškai naudoti ir gali būti pritaikyti uosto kanalams ir laivų apsisukimo baseinams vertinti ir optimizuoti.

Taigi analitiniai skaičiavimo metodai, sukurti ir pateikti 2 skyriuje, taikyti skaičiuojant laivų manevrines charakteristikas esant mažam gyliui ir parenkant optimalius uosto infrastruktūros elementus, rengiant Klaipėdos uosto kanalo ir akvatorijos gilinimo iki 17 m galimybių studiją, optimizuojant Klaipėdos šiaurinės uosto dalies infrastruktūrą navigacinio saugumo požiūriu bei atliekant analogiškus uosto infrastruktūros parametų vertinimus kituose Vakarų Europos uostuose (Vlissingeno, Ostendės ir kt.) ar jų dalyse.

Sureguliuavus (kalibravus) treniruoklį „SimFlex Navigator“, atsižvelgiant į numatytus realius laivus (panaudotas HANDYSIZE tipo tanklaivis [DWT – 30 000 t]), nes tokie tanklaiviai į Klaipėdos uostą įplaukia bent kartą per savaitę), nustatyti laivų cirkuliacijos elementai, jie panaudoti uosto infrastruktūros (uosto kanalai, akvatorijos, laivų apsisukimo baseinai) parametrų vertinti bei ribinėms sąlygoms tirti.

Laivo cirkuliacijos elementai, plaukimo ir manevravimo trajektorijos, esant mažam gyliui, nustatyti taikant 2 skyriuje pateiktą metodiką bei sureguliuotu treniruokliu ir eksperimentais patikrinti realiame HANDYSIZE tipo laive AIS (AIS 2015) ir AIS-LERS (AIS-LERS 2015).

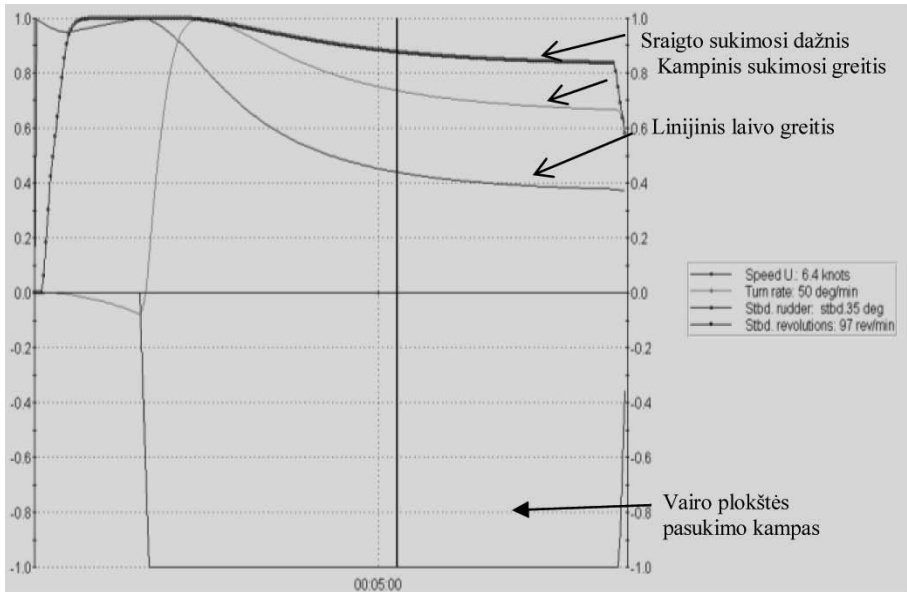
Atlikti eksperimentiniai tyrimai įvairių tipų laivuose (tanklaiviuose, biriujų ir generalinių krovinių laivuose) atskleidė, kad esant dideliame ir mažam gyliui (seklumoms) gauti eksperimentiniai realių laivų valdomumo charakteristikų rezultatai koreliuoja su rezultatais, kurie gauti taikant skaičiavimo metodus.

Kinematinių parametų paveiksluose pateikti žymėjimai reiškia: (angl.) *Speed U (v)* – greitis grunto atžvilgiu; *knots* – mazgai; *Turn rate (ω)* – kampinis sukimosi greitis; *deg./min* – laipsniai per minutę; *Stbd. rudder (α)* – vairas; *stbd.* – dešinė pusė; *deg.* – laipsniai; *Stbd. revolutions (n)* – sraigto sukimosi dažnis; *rev./min* – apsisukimai per minutę.

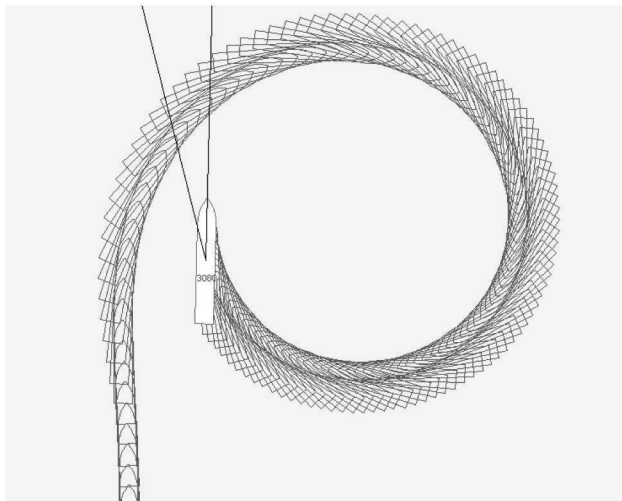
Veikiant išorinėms poveikio jėgoms, laivo cirkuliacijos elementai kinta dėl papildomų jėgų ir momentų. Teoriniai skaičiavimai ir eksperimentiniai tyrimai, atlikti realiame laivuose ir sureguliuotuose treniruokliuose (laivai, kurių ilgis – nuo 150 m iki 398 m), sutapo, t. y. nustatyti atitinkamų laivo valdomumo parametų skirtumai neviršijo 8–10 % (SGD 2010; Būtingė 2012). Gauti tyrimų rezultatai yra svarbūs planuojant uosto infrastruktūros elementus, ypač jei uostuose nepakanka galingų vilkikų ir laivui tenka manevruoti išnaudojant tik savo manevrines galimy-

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametrų tyrimai

a)



b)



3.5 pav. Kinematiniai laivo judesio parametrai (a) ir trajektorijos juosta (b) apsisukimo metu, kai neveikia išorinės poveikio jėgos:

Tanklaivis: $L_{max} = 185$ m; $L = 173$ m; $B = 27,5$ m; $T_{lp} = 5,0$ m; $T_{lg} = 7,0$ m;
 $V = 20780$ m³; DWT = 30 000 t; $\alpha = 35^\circ$ d/b; pradinis greitis $v_o = 14,0$ mazgų

Fig. 3.5. Ship's kinematic movement elements (a) and pass on circulation (b) in absence of external factors

bes. Pažymėsime, kad tinkamas laivo manevrinių galimybių išnaudojimas ir vilkikų naudojimas leidžia sumažinti kanalų ir laivų apsisukimo baseinų parametrus, kartu ir investicijas į uosto infrastruktūros plėtrą, užtikrinant pakankamą laivybos saugumą.

Siekiant supaprastinti praktinį sprendimą, esant pastovioms išorinio poveikio jėgoms, t. y. pastoviems vėjo greičiui ir srovei, tai būdinga uostams, kur nedideli judėjimo atstumai, o išorinių poveikio jėgų pokyčiai per trumpą laiką yra nežymūs (laivui manevruojant), galima pereiti nuo be galo mažų dydžių prie galutinių mažų dydžių vertinant laivo kinematinis parametrus, ir vertinti pastovius išorinio poveikio jėgų dydžius, skaičiuojant laivo galimybę atlikti konkretų manevrą, pavyzdžiui, praplaukiant kanalo posūkio tašką ir panašiai. Laikantis šio principo, veikiant išorinio poveikio jėgoms, atlikus skaičiavimus, patikrinus treniruokliais ir atlikus bandymus laivuose, nustatyti panašūs rezultatai (AIS-LERS 2015; AIS 2015), pateikti 3.6 paveiksle (atskiri taškai).

Analitiniais skaičiavimo metodais apskaičiuoti laivų kreivalinijinio judėjimo trajektorijos ir kinematiniai parametrai laivuose patikrinti sistemomis AIS ir LERS bei AIS, treniruokliu „SimFlex Navigator“ ir „SimFlex 4“, atskleidė, kad skaitmeniniais metodais nustatytų parametrų paklaidos sudaro ne daugiau kaip 8–10 %, tai atitinka SOLAS 74 („Tarptautinė konvencija dėl žmogaus gyvybės apsaugos jūroje“, SOLAS 1974) reikalavimus. Taigi sukurti skaitmeniniai metodai gali būti taikomi laivuose ir uostuose, parenkant optimalius uosto infrastruktūros parametrus ir juos vertinant.

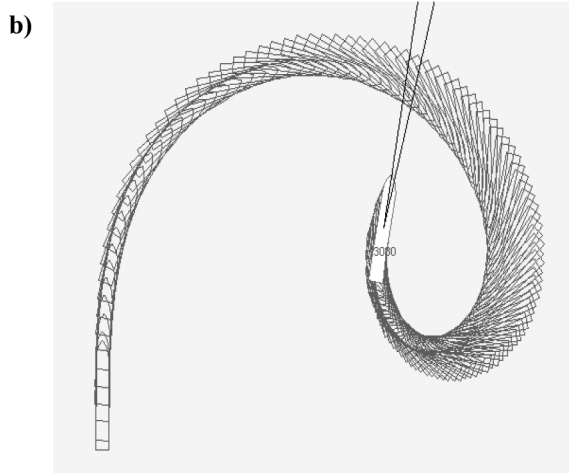
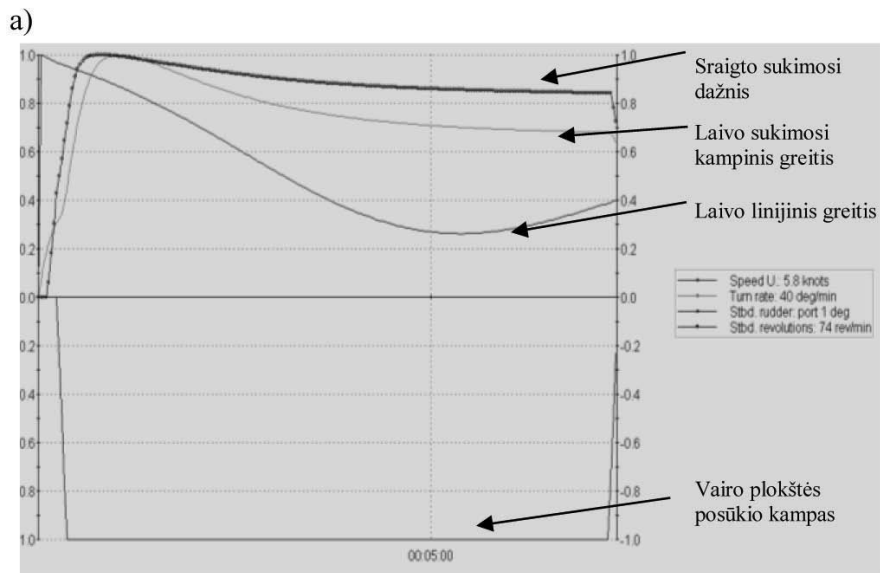
Laivą veikiant išorinėms poveikio jėgoms, t. y. vėjui ir srovei, atsiranda papildomų veiksnių: aerodinaminės ir hidrodinaminės jėgos bei jėgos, pagrįstos „sparno“ efektu.

Vidiniuose uostų kanaluose ir akvatorijose bangų poveikis paprastai minimalus arba jo iš viso nėra. Laivas bus valdomas, kol vairo plokštės ir (jeigu yra) pavairavimo įrenginiai sudarys didesnę momentą, palyginus su kitais momentais, jeigu jų ženklas yra priešingas vairo ir pavairavimo įrenginių sukuriamiems momentams.

Manevruoti laivu labai sudėtinga, esant dideliems kanalų posūkiams (90 laipsnių ir daugiau), ypač jei tame posūkyje keičiasi gylis. Atlikti teoriniai skaičiavimai ir tyrimai treniruokliu (SimFlex 2012), analizuotos laivų plaukimo įplaukos kanalu į Sautamptono uostą (Anglija), kuriame posūkio kampas sudaro apie 130 laipsnių, o gylis posūkyje kinta nuo 22 iki 15 m (OpenSM 2018), trajektorijos, naudojant AIS (AIS 2015), rezultatai pateikti 3.7 paveiksle.

Treniruokliu nustatyti laivo kinematiniai judėjimo parametrai perskaičiuoti taikant 2 skyriuje pateiktą metodiką. Papildomai AIS (AIS 2015) patikrintas analogiško realaus laivo plaukimas toje pačioje vietoje. Visais atvejais gauti panašūs rezultatai, tik plaukiant realiam laivui pasinaudota vilkiku laivagalyje, siekiant pagerinti laivo valdomumą, todėl laivas išliko kanale. Kaip matyti iš treniruokliu gautų rezultatų (SimFlex 2012), laivui sukantis į uosto įplaukos kanalą, sumažėjus gyliui, dėl seklumos poveikio sumažėjo laivo sukimosi kampinis greitis ir laivas, išplaukęs už kanalo ribų, užplaukė ant seklumos.

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametru tyrimai

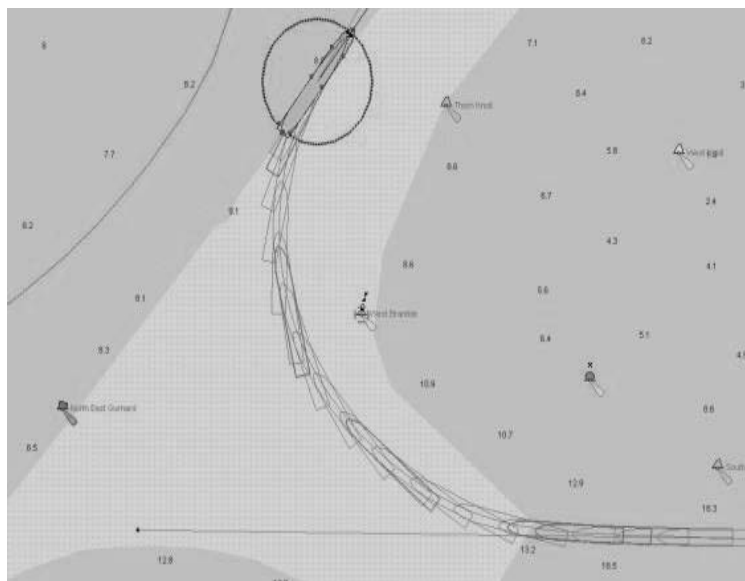


3.6 pav. Kinematiniai laivo judesio parametrai (a) ir trajektorija (b) cirkuliacijos metu, kai srovė nukreipta statmenai į kairįjį bortą cirkuliacijos pradžioje ($v_{sr} = 2,0$ mazgai)

Tanklaivis: $L_{max} = 185$ m; $L = 173$ m; $B = 27,5$ m; $T_{lp} = 5,0$ m; $T_{lg} = 7,0$ m;
 $V = 20780$ m³; $\alpha = 35^\circ$ d/b; pradinis greitis $v_o = 14,0$ mazgų

Fig. 3.6. Ship's kinematic elements (a) and pass (b) on circulation in case of current acting to port side in circulation start point

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametru tyrimai



3.7 pav. Konteinervežio ($L = 365$ m) plaukimo trajektorija įplaukos į Sautamptono uostą išorinio kanalo posūkyje: laivas neišsiteko posūkyje ir užplaukė ant seklumos (trajektorijos rezultatai gauti „SimFlex 4“ treniruokliu ir perskaičiuoti teoriškai)

Fig. 3.7. Container ship ($L = 365$ m) sailing to Southampton port on approach channel bend trajectory (received by *SimFlex 4* simulator and by theoretical method)

Taigi planuojant galimų didžiausių laivų įplaukimą į uostą ypač svarbu uosto infrastruktūrą suderinti su laivo manevrinėmis galimybėmis. Šiuo metu panašaus dydžio, kaip ir tirti treniruokliu, konteinervežiai ($L = 365$ m), reguliariai plaukiantys į Sautamptono uostą, savo manevringumą gerina naudodami vilkikus, nes jų pačių manevrinių galimybių saugiai plaukti įplaukos kanalu nepakanka (3.7 pav.). Todėl svarbu iš anksto nustatyti ribines laivų manevrines galimybes, suderinti jas su uosto infrastruktūros parametrais ir imtis papildomų priemonių, siekiant užtikrinti laivybos saugumą.

Laivo valdomumas esant mažam gyliui (tai būdinga uostams) gali būti apskaičiuotas taikant 2 skyriuje pateiktą metodiką. Tai svarbu manevruojant laivu uosto akvatorijose ir kanaluose bei planuojant optimalius uosto infrastruktūros elementus arba nustatant būtinas papildomas valdomumo priemones (vilkikus).

3.2. Laivo judėjimo charakteristikų ir laivo grimzlės padidėjimo esant mažam gyliui tyrimai

Laivo judėjimo charakteristikos (linijinis, sukimosi kampinis greičiai) esant mažam gyliui, palyginus su tomis pačiomis charakteristikomis ir naudojamu galingumu esant dideliame gyliui, kinta dėl padidėjusių pasipriešinimo ir pridėtosios skysčio (vandens) masės.

Atlikti eksperimentiniai laivų tyrimai Klaipėdos uoste, išanalizuotos laivų plaukimo sąlygos Korinto (*Korinthou*, Graikija) (DFDS 2014), Sioderteljė (*Södertälje*, Švedija), Ternezeno (*Terneuzen*, Belgija) (AIS 2015) kanaluose ir nustatyta, kad atsižvelgiant į laivo grimzlės ir gylio (T/H), laivo skerspjuvio ir kanalo skerspjuvio ploto santykį, laivo greitis dėl seklos poveikio gali sumažėti iki 1,5 ir daugiau kartų.

Nurodytuose kanaluose laivo grimzlės ir gylio santykis sudaro apie 0,93–0,96, tai sumažina laivo valdomumą apie 70 %, todėl jam pagerinti naudojami vilkikai. Kad būtinos papildomos valdomumo priemonės (vilkikai), reikėtų žinoti iš anksto.

Siekiant išvengti per didelio laivo korpuso „prasėdimo“, kuris tam tikrais atvejais, kai vidutinio dydžio laivas juda visu greičiu, gali būti iki metro ir daugiau, būtina iš anksto sumažinti greitį, tada sumažės ir laivo „prasėdimas“.

Kad laivo grimzlė (kai $T/H \approx 0,8$) būtų panaši kaip ir giliame vandenyje, ne mažiau kaip 2 kartus būtina sumažinti laivo pradinį greitį. Jeigu laivas plaukia, santykiui T/H esant apie 0,8, jo greitis neturėtų būti didesnis negu mažasis greitis (MG). Uostuose laivams tenka plaukti, kai T/H siekia iki 0,94–0,96, tada laivo greitis turi būti minimalus – tik toks, kad būtų galima valdyti laivą.

Dėl to laivui plaukiant uoste arba jo prieigose, kur gyliai kinta, būtina numatyti galimus greičio pokyčius ir grimzlės padidėjimą. Daugelyje uostų yra negilu, todėl turi būti įvertintos mažo gylio poveikio laivo judėjimui ir manevravimui charakteristikos. Taigi plaukiant uosto akvatorijomis ir kanalais būtina atsižvelgti į laivo greičio pokyčius dėl mažo gylio poveikio, ypač į laivo įsibėgėjimo ir stabdymo charakteristikas. Čia labai svarbus laivo grimzlės pokytis, nes padidėjus grimzlei (laivo „prasėdimas“) laivas gali paliesti akvatorijos ar kanalo dugną.

Plaukiant siauru kanalu laivas negali labai nukrypti nuo kanalo ašies, ypač kanalų posūkiuose. Plaukiant pilno profilio siaurais kanalais slėgio jėgos, susidarancios laivui plaukiant, pačios stengiasi „stumti“ laivą į gilesnę vietą, t. y. kanalo ašies kryptimi (Strem 2004).

Esant pusiau atvirojo profilio kanalui, kuris dažnas uostuose, hidrodinaminio poveikio jėgos „stumia“ laivą nuo pilno profilio į atvirojo profilio pusę, į tai būtina atsižvelgti. Hidrodinaminiam poveikiui kompensuoti paprastai pakanka nedidelio (3^0 – 5^0) vairo plokštės pasukimo kampo.

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametrų tyrimai

Posūkiai ypač svarbūs plaukiant siauru kanalu, nes laivas turi tiksliai laikytis kanalo ašies. Sekluma gerokai sumažina laivo valdomumą, todėl norint pasisukti būtina didesniu kampu (iki 15° – 25°) pasukti vairo plokštę. Pavėlavus pradėti posūkį, norimą rezultatą pasiekti sudėtinga, nes laivo kampinio greičio evoliucinis periodas sudaro apie $1/3 L$, staigiai sukant laivą, jis gali išplaukti už kanalo ribų. Jeigu sunku nustatyti posūkio pradžios tašką, tikslinga pradėti suktis šiek tiek anksčiau ir vėliau sumažinti laivo kampinį sukimosi greitį.

Laivo sukimas „spaudžiantis“ prie vidinio posūkio krašto (tai kartais vadinama laivo „prisispaudimu“ prie posūkio vidinio kanalo krašto) yra saugesnis nei vėlavimas suktis, nes laivagalys, kuris yra pažeidžiamesnis (vairo ir sraigto kompleksas), vėluojant suktis lieka kanalo viduryje. Jei laive, siekiant pagerinti jo valdomumą, įrengtas laivagalio pavairavimo įrenginys, jis gali būti panaudotas, tik šiuo atveju svarbu, kad laivagalys judėtų arčiau kanalo ašinės linijos.

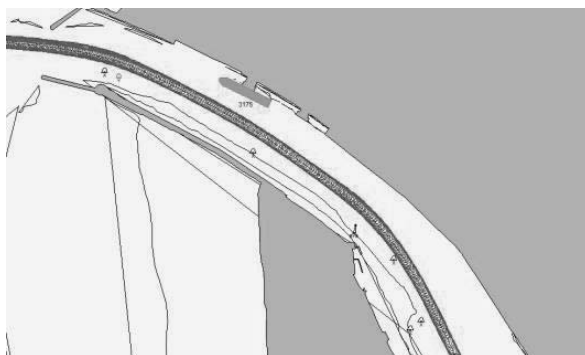
3.8 paveiksle pateiktas SGD laivo ($L = 315$ m) plaukimo Klaipėdos uoste vaizdas vizualiajame treniruoklyje (SimFlex 2014): pateikta minėto laivo plaukimo uosto navigaciniu kanalu trajektorija (juosta). Atlikti nurodyto laivo įplaukimo į uostą ir išplaukimo iš jo tyrimai, esant įvairių krypčių ir greičių vėjui bei srovei, leido nustatyti ribines plaukimo sąlygas: vėjo greitis – iki 14 m/s, esant nepalankiausiai pietvakarių krypčiai, srovė – iki 1,5 mazgo šiaurinėje uosto dalyje.

Rengiant kanalus dažnai numatomos vadinamosios „manevravimo kišenės“, kai posūkio vietoje arba už jo praplatinamas kanalas. „Manevravimo kišenės“ patogios plukdant labai didelius laivus, kai gylis po kiliu labai nedidelis (T/H – apie 0,93–0,96), todėl pablogėja laivo manevrinės savybės ir atliekant posūkį, siekiant padidinti laivo sukimosi kampinį greitį, būtina didinti sraigto sukimosi dažnį.

Optimizuojant uostų plėtros investicijas stengiamasi pasiekti minimalų leistiną klirensą (tarpas tarp laivo korpuso ir kanalo arba akvatorijos dugno). Mažinant klirensą svarbu tiksliai išmatuoti dugną, kad nebūtų palikta neišgilintų vietų ar kitų virš projektinio dugno iškilusių kliūčių. Gerai paruošus akvatorijų ir kanalų dugną, mažinamas klirensas. Paskirais atvejais dideliems laivams, kur nėra didelių sąnašų pernašos, klirensas nustatomas iki 0,5–0,7 m. Esant tokiam mažam klirensui būtina plaukti mažo greičio režimu, kad nebūtų per didelio laivo „prasėdimo“ dėl greičio, negalimi ir šoninis bei išilginis laivo posvyriai, atliekant posūkius būtina vengti staigaus laivo sukimosi, kad nebūtų didelių laivo pasvirimo kampų.

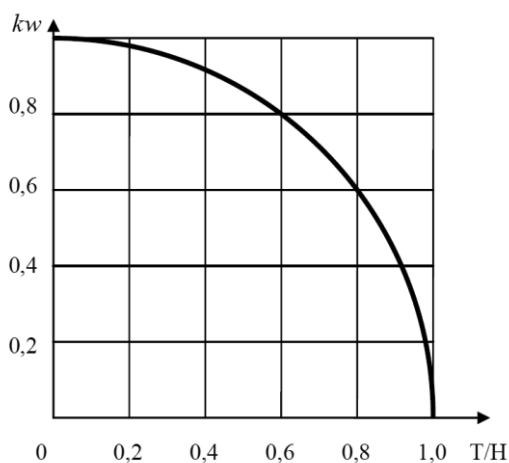
Laivo valdomumas, esant ypač mažiems klirensams, gerokai pablogėja, nes padidėja pridėtoji skysčio masė ir laivas juda kartu su jį supančiu vandeniu. Laivo valdomumo, naudojant įprastinius (konvencinius) sraigto ir vairo kompleksus, pokytį galima įvertinti pagal kampinio greičio koeficientą, atsižvelgiant į laivo grimzlės ir kanalo arba akvatorijos gylio santykį, kurio skaičiavimo metodika pateikta 2 skyriuje. Šiuo atveju valdyti laivą, kai klirensas sudaro 0,5–0,7 m, laivo grimzlė – 12–14 m, santykis T/H – apie 0,96–0,98, t. y. laivo valdomumas sudaro tik 15–20 %, palyginus

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametrų tyrimai



3.8 pav. SGD laivo ($L = 315$ m) trajektorija plaukiant Klaipėdos uosto šiaurine dalimi ir atliekant posūkius (vėjas E – 14 m/s) („SimFlex Navigator“ treniruoklio navigacinis jūrlapis)

Fig. 3.8. LNG tanker's ($L = 315$ m) trajectory in Klaipėda port



3.9 pav. Laivo kampinio greičio koeficientas, kai klirensas – 0,5–0,7 m, laivams, kurių grimzlė – 12–14 m (Paulauskas 2011)

Fig. 3.9. Ship's turning velocity coefficient in case of clearance 0,5–0,7 m and ship's draft – 12–14 m. (Paulauskas 2011)

su manevringumu esant dideliui gyliui, sudėtingiau, todėl būtini dideli vairo plokštės pasukimo kampai ir papildomos laivo valdomumo priemonės, tokios kaip laivo pavairavimo įrenginiai arba vilkikai.

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametru tyrimai

Nurodyta aplinkybė ypač svarbi plaukiant uostų kanalais ir juose sukantis, nes kai kurių uostų kanalai yra siauri, jų dideli posūkio kampai arba maži posūkio spinduliai.

Matome, kad laivo kampinis sukimosi greitis dėl seklos poveikio gali sumažėti iki 70–80 % (3.9 pav.), į tai būtina atsižvelgti planuojant manevrus uostuose, kur yra negilu (jei esant dideliame gyliui, kad laivas plauktų numatyta trajektorija, vairo plokštę reikia pasukti 5° , T/H santykiui esant apie 0,95, vairo plokštės pasukimo kampas turi būti apie 25° – 30°).

Kai klirensas ypač mažas, būtina iš anksto įvertinti laivo galimybę savarankiškai atlikti posūkius. Dėl to reikėtų perskaičiuoti laivo judėjimo trajektoriją, pakoregavus jo kampinį greitį.

Planuojant laivo manevrus svarbu žinoti trajektorijos linijinių parametru pokytį atsižvelgiant į vairo plokštės padėtį, arba vairo plokštės padėtį, atsižvelgiant į numatytus trajektorijų parametrus. Kai laivai plaukia kanalais ir akvatorijomis esant ypač mažam klirensui, svarbu turėti išankstinę informaciją ir ją analizuoti, siekiant užtikrinti laivybos saugumą.

Plaukiant uostų kanalais ir akvatorijomis svarbus laivo grimzlės padidėjimas dėl laivo greičio („prasėdimas“), kuris priklauso nuo laivo korpuso pilnumo koeficiento ir laivo greičio. Daugelio jūrinių laivų bendrasis laivo korpuso pilnumo koeficientas yra nuo 0,62 (santykinai maži laivai, kurių vandentalpa sudaro iki 10 000 tonų, ir didesni greitaeigiai laivai – keleiviniai, konteinervežiai ir panašiai) iki 0,8–0,88 (dideli tanklaivai, biriųjų krovinių ir kiti panašūs laivai, kurių vandentalpa didesnė nei 50 000 tonų). Plaukiant greičiu iki 6 mazgų (taip greitis ribojamas daugelyje uostų), didelių laivų grimzlė padidėja iki 0,20–0,30 m.

Atlikti laivų grimzlės padidėjimo tyrimai Senos upėje (PIANC 2010): tirti laivai, kurių vandentalpa – iki 30 000–35 000 tonų, T/H santykis – nuo 0,7 iki 0,8, laivų korpuso bendrasis pilnumo koeficientas – nuo 0,65 iki 0,75 (iš viso atlikta maždaug 850 eksperimentų, naudojant ypač tikslias RTK ir lazerines matavimo sistemas), atskleidė, kad laivams plaukiant greičiu iki 6 mazgų, jų „prasėdimo“ dydis buvo panašus, nepaisant bendrojo laivo korpuso pilnumo koeficiento ir laivo vandentalpos (esant didesniam laivo greičiui, jo „prasėdimas“ labai daug priklauso nuo korpuso bendrojo pilnumo koeficiento) (PIANC 2010). Laivų „prasėdimo“ tyrimų rezultatai Senos upėje (PIANC 2010), esant greičiui apie 6 mazgus, koreliuoja su skaičiavimo rezultatais, kurie gauti taikant 2 skyriuje pateiktą metodiką.

Planuojant uostų infrastruktūrą (uosto kanalus, laivų apsisukimo baseinus, uostų vidines akvatorijas), būtina nustatyti laivų greičio sumažėjimo ir laivų „prasėdimo“ dydžius, tai padeda parinkti optimalius uostų infrastruktūros elementus ir pritaikyti esamą uosto infrastruktūrą galimiems maksimalių dydžių laivams.

Šiuo metu tam tikruose uostuose taikomas klirensas dydis yra iki 1,5–2,0 m. Kai uostai yra uždari, tokio didelio klirensas pateisinti laivų „prasėdimo“ dydis negali. Dažnai perteklinis klirensas nustatomas dėl menko kanalų ir akvatorijų dugno ištir-

tumo ir tikslios informacijos trūkumo, nekokybiškai išmatavus gylius. Pavyzdžiui, Talino jungtinio uosto dalyje Mūgoje (*Muuga*) (Tallinn 2014) leistinas minimalus klirensas sudaro 0,6 m, Iličiovsko uoste (Ukraina) (Ilyciovsk 2014) minimalus klirensas sausakrūviams ir biriųjų krovinių laivams priimtas 0,4 m, tanklaiviams – 0,6 m, dujų tanklaiviams – 0,9 m. Dugno gylių matavimai minėtuose uostuose atliekami ne rečiau kaip kas dvi savaitės, naudojant šiuolaikinę gylio matavimo techniką. Išnaudojant visas šiuolaikinės gylio matavimo įrangos galimybes galima patikimai išmatuoti gylių +/-0,05 m tikslumu, gana tiksliai aptikti kliūtis (akmenys ir pan.), kurių skersmuo didesnis kaip 0,2 m. Turint tikslią uosto kanalų ir akvatorijų išklotinę, galima sumažinti klirensą, iki dydžių, kurie yra minėtuose uostuose, užtikrinant laivybos saugumą.

3.3. Laivo stabdymo, įsibėgėjimo ir valdomumo stabdant charakteristikų esant mažam gyliui tyrimai, jų svarba planuojant uosto infrastruktūrą

Laivų stabdymo charakteristikos pirmiausia susijusios su uosto akvatorijos geometriniais parametrais, nes į uosto akvatoriją įplaukęs laivas sustabdomas akvatorijos ribose. Tai ypač aktualu uostams, kurių akvatorijos ribotos, pavyzdžiui, Ostendės (*Oostende*) uostui (Belgija): į šį uostą įplaukiantys didelio tonażo laivai pro uosto vartus turi plaukti gana dideliu greičiu (ne mažesniu kaip 6–8 mazgų), o įplaukę į uostą – sustabdyti akvatorijos ribose.

Esant mažam gyliui laivo stabdymo charakteristikos keičiasi: dėl padidėjusio seklumos poveikio trumpėja stabdymo kelias ir stabdymo laikas.

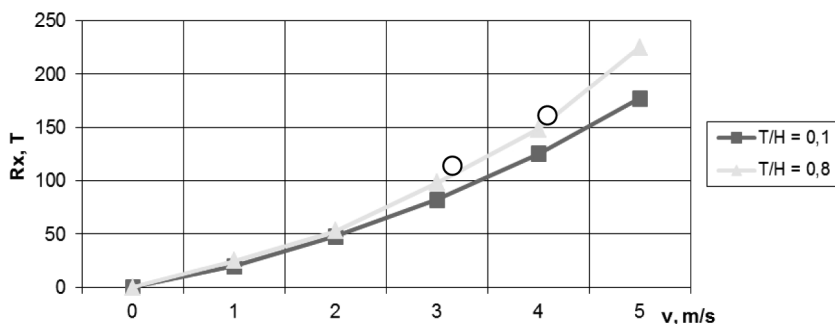
Turint inercijos koeficientą ir norint nustatyti seklumos poveikį, laivo stabdymo charakteristikas galima apskaičiuoti pagal formules (giliame vandenyje), kurios pateiktos 2 skyriuje, tik vietoj k_{in} įrašyti k'_m .

Pakrautam PANAMAX tipo tanklaiviui, kuris plaukia dideliame gylyje ir sekluomoje (kanalu), pasipriešinimo skaičiavimo ir eksperimentų rezultatai (AIS-LERS, 2015) pateikti 3.10–3.11 paveiksluose.

Tiesiai judančio laivo pasipriešinimo tyrimų rezultatai yra svarbūs, nustatant ribines laivo išplaukimo iš uosto sąlygas, kai būtina laivus išplukdyti iš uosto štormo laikotarpiui, nes dėl seklumos poveikio padidėjęs laivo pasipriešinimas gali trukdyti pasiekti būtiną saugų greitį uosto vartuose.

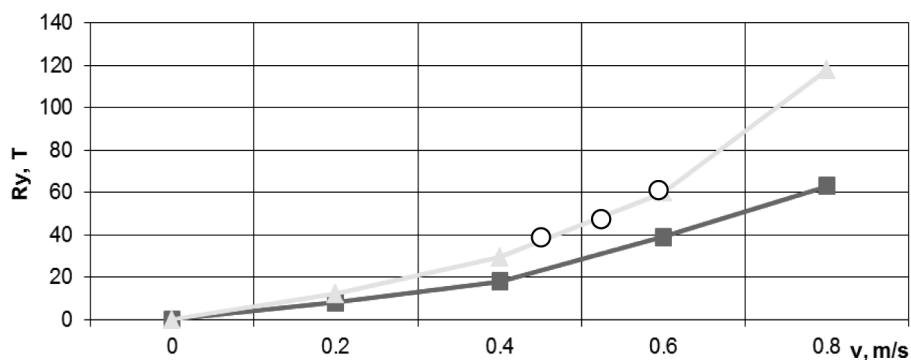
Skaičiavimo būdu, taikant disertacijos autoriaus sukurtus metodus, ir atliekant eksperimentus realiuose laivuose laivų judėjimo parametrų matavimo sistema AIS LERS, nustatytos išilginio ir šoninio laivo pasipriešinimo jėgos (rezultatų sklaida – ne didesnė kaip 5–7 %) leidžia taikyti sukurtus skaičiavimo metodus laivo valdomumo charakteristikoms vertinti bei uostų kanalams, laivų apsisukimo baseinams bei prieigoms prie krantinių planuoti.

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametru tyrimai



3.10 pav. Laivo, judančio tiesiai esant dideliui ir seklumoje (T/H – apie 0,8), apskaičiuotas ir \circ bandymais patikrintas pasipriešinimas, atsižvelgiant į jo greitį

Fig. 3.10. Ship's resistance on the strait on deep and shallow water (T/H about 0,8), received by calculation method and checked by \circ experimental method depends the ship speed



3.11 pav. Laivo, judančio šonu esant dideliui ir seklumoje (T/H – apie 0,8) (viršutinė linija), apskaičiuotas ir \circ bandymais patikrintas šoninis pasipriešinimas, atsižvelgiant į jo greitį

Fig. 3.11. Ship's resistance in case movement by Y direction on deep (lover line) and shallow water (T/H about 0,8) (top line), received by calculation method and checked by \circ experimental method depends the ship speed

Disertacijos autoriaus sukurti laivo judėjimo šonu pasipriešinimo padidėjimo dėl seklumos poveikio metodai leidžia tiksliai įvertinti papildomas jėgas laivui judant kanalu esant šoniniam vėjui bei švartuojant laivus prie krantinių, jiems judant dideliu kampu į srovę, nes esant srovei ir seklumos poveikiui vilkikų traukos jėgos laivui atitraukti nuo krantinės arba priplukdyti prie jos be tikslių apskaičiavimų gali nepakakti.

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametru tyrimai

Laivų judėjimas, susidarius dideliame dreifo kampui, dažnas kanaluose pučiant šoniniam vėjui. Dėl vėjo pulsavimo ir mažo gylio gali būti sunkiau laivą „išlaikyti“ kanalo ribose, todėl svarbu iš anksto nustatyti (apskaičiuoti), taikant disertacijos autoriaus sukurtą metodiką, galimas papildomas jėgas dėl seklumos poveikio ir užsakyti reikiamą skaičių galingų vilkikų, siekiant kompensuoti galimą papildomą laivo pasipriešinimą dėl seklumos poveikio ir užtikrinti laivybos saugumą.

Laivui plaukiant sekluma (esant mažam gyliui) jo stabdymo charakteristikos keičiasi – trumpėja stabdymo kelias, tai būtina iš anksto įvertinti (apskaičiuoti) plaukiant uosto akvatorija ar kitomis panašiomis vietomis. Uosto akvatorijoje sudėtinga stabdyti didelius laivus, tam dažnai pasitelkiami vilkikai. Kadangi uosto akvatorijos ir kanalai dažniausia yra riboti, stabdant laivą būtinos papildomos jėgos, norint išlaikyti laivą numatytoje trajektorijoje.

Daugelio uostų įplaukos kanalai santykinai sudėtingi, gali būti ir kitų sąlygų, kurios veikia laivo valdomumą: skersinės srovės, vėjas, todėl negalima į uostą įplaukti labai mažu greičiu, įplaukus sudėtinga laivą sustabdyti, nes uosto akvatorija yra ribota. Norint laivą sustabdyti laiku ir būtinu atstumu, laivagalyje naudojamas vilkikas, kitas vilkikas laivą stabdant neleidžia jam nukrypti nuo numatytos trajektorijos. Jei naudojamas tik vienas vilkikas laivagalyje, būtina pasirinkti jo judėjimo kryptį, siekiant kompensuoti laivo sraigto, dirbančio atbuline eiga, sukeliama laivo šoninį sukimo momentą.

Jei laivui stabdyti ir išlaikyti numatytoje trajektorijoje reikia dviejų vilkikų, tikslinga vieną jų naudoti siekiant sudaryti papildomą stabdymo jėgą, kitą (laivapriekyje) – laivo sukimosi momentui (dešiniojo žingsnio sraigta turintis laivas stabdydamas sukasi į dešinę) kompensuoti. Jei naudojamas vienas vilkikas, tikslinga jį išdėstyti taip, kad sudarytų stabdymo jėgą, kartu – atvirkštinį laivo sukimo dėl stabdymo momentą.

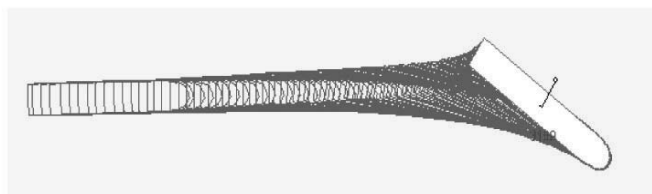
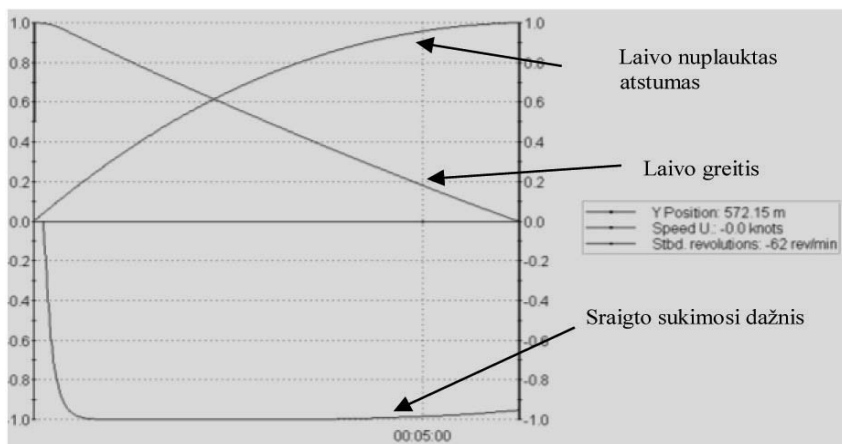
Laivo stabdymo trajektorija ir jo judesio parametrai, apskaičiuoti metodais, kurie pateikti 2 skyriuje ir patikrinti sureguliuotu treniruokliu, nenaudojant vilkiko, pateikti 3.12 paveiksluose, naudojant vilkiką – 3.13 paveiksluose.

Kai laivas stabdomas naudojant vilkikus, trumpėja jo stabdymo kelias ir jį lengviau išlaikyti numatytoje kryptyje, kartu galima minimizuoti uostų akvatorijų parametrus.

Atlikti laivų stabdymo eksperimentiniai tyrimai realiais laivais ir sureguliuotu treniruokliu, esant dideliame ir mažam gyliams, atskleidė, kad teorinėje dalyje pateikti skaičiavimo būdai duoda gana tikslius rezultatus (paklaidos – ne didesnės kaip 8–12 %) ir gali būti taikomi apskaičiuojant uostų infrastruktūros parametrus.

Laivą stabdant mažėja jo vairo plokštės efektyvumas dėl netolygaus jos aptekėjimo, paskirais atvejais jos poveikis laivo valdomumui yra nedidelis. Atliktų eksperimentinių tyrimų su realiais laivais ir treniruokliais, tiriant laivo stabdymo (pasyvaus ir aktyvaus) ir valdomumo charakteristikas esant įvairioms hidrometeorologinėms sąlygoms (vėjui, vėjui ir bangavimui, srovei, vėjui ir srovei), dideliame ir mažame

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametrų tyrimai



3.12 pav. PANAMAX tipo laivo ($T = 12,5$ m) stabdymo visu greičiu atgal be vilkiko (pradinis greitis – 6 mazgai) parametrai ir trajektorija: (angl.) *Y position* – laivo stabdymo kelias; *Speed U* – laivo greitis; *Stbd. Revolutions* – sraigto sukimosi dažnis, aps./min

Fig. 3.12. PANAMAX type ship's stopping parameters and trajectory on full ahead without tug, initial speed 6 knots

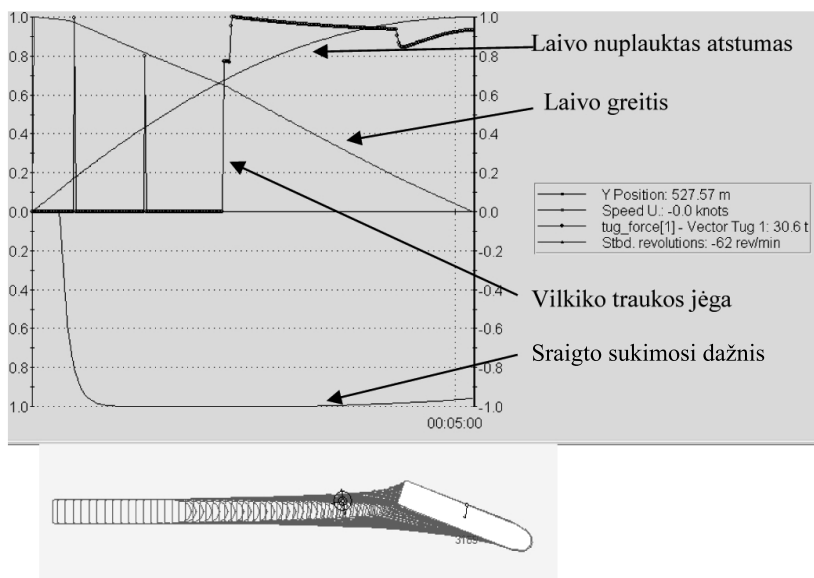
gyliui, rezultatai koreliuoja su skaičiavimo, taikant 2 skyriuje pateiktą metodiką, rezultatais.

Laivo stabdymo parametrai esant vėjui, srovei, bangavimui ir mažam gyliui, svarbūs planuojant uostų įplaukos kanalus. Jeigu uosto įplaukos kanalai išdėstyti jūroje (pavyzdžiui, Klaipėdos uosto įplaukos kanalas [Klaipėda, 2015]), pasitaiko atvejų, kai dėl staiga kilusio pavojaus tenka laivą stabdyti, todėl svarbu iš anksto žinoti galimus leistinus laivo nukrypimus už kanalo ribų (derinant laivo grimzlę ir gylį).

Turint tikslią informaciją apie galimus laivo nukrypimus nuo numatytos trajektorijos stabdant, galima įvertinti planuojamos infrastruktūros parametrus arba nustatyti ribines laivų plaukimo sąlygas bei numatyti papildomas priemones.

Žinoti minimalų laivo valdomumo greitį svarbu, kai laivai įplaukia į uostą didesniu greičiu dėl didelių išorinių jėgų poveikio. Pavyzdžiui, į Klaipėdos uostą plukdomi

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametrų tyrimai



3.13 pav. PANAMAX tipo laivo ($T = 12,5$ m) stabdymo visu greičiu atgal su vilkiku (pradinis greitis – 6 mazgai, vilkikas pradėjo dirbti greičiui esant 3,2 mazgo), parametrai ir trajektorija:

(angl.) *Y position* – laivo stabdymo kelias; *Speed U* – laivo greitis; *tug force [1]* – *Vector tug t*: vilkiko traukos jėga „ant kablo“; *Stbd. Revolutions* – sraigto sukimosi dažnis, aps./min

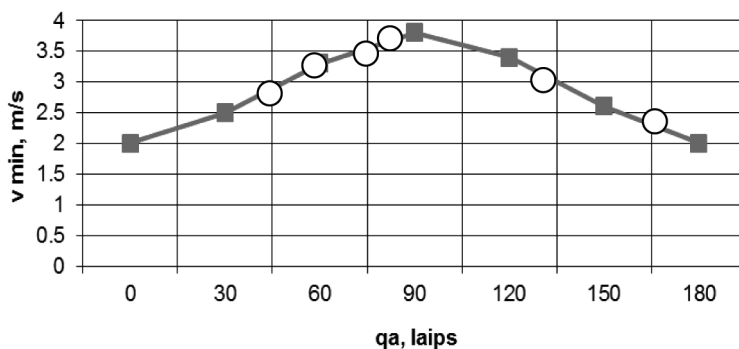
Fig. 3.13. PANAMAX type ship's stopping parameters and trajectory on full ahead with tug assistance (initial speed 6 knots, tug start work on speed 3,2 knots)

ro-ro laivai, kai vėjo greitis siekia 20 m/s ir daugiau, uosto vartus praplaukia 12–14 mazgų greičiu, o įplaukę į uostą laivo greitį turi sumažinti iki 7–8 mazgų (leistinas laivų greitis uoste – 8 mazgai [KVJUD, 2014]).

Taikant 2 skyriuje pateiktą metodiką, apskaičiuotas minimalus laivo valdomumo greitis, kai pučia 15 m/s vėjas, tanklaiviui, kurio dedveitas – 35 000 t. Skaičiavimo rezultatams patikrinti atlikti eksperimentai analogiškame laive, be to, remtasi AIS-LEERS (AIS-LEERS 2015) stebėjimų rezultatais. Gauti skaitmeniniai ir eksperimentų realiuose laivuose rezultatai pateikti 3.14 paveiksle.

Biriųjų krovinių vežimo laivo „Efi Theo“ (ilgis – 190 m, plotis – 31 m, grimzlė – 11,2 m, DWT – 45000 t) užplaukimo 2015-07-22 ant seklumos Klaipėdos uoste priežastis – prarastas laivo valdomumas, plaukiant uosto kanalu sugedus pagrindiniam laivo varikliui. Laivas plaukė 6,1 mazgo greičiu uosto vidiniu navigaciniu kanalu, sugedus pagrindiniam varikliui jis buvo pasyviai stabdomas, laivo greičiui sumažėjus iki 5,1 mazgo (2,6 m/s), kai vėjo greitis siekė 11 m/s, o vėjo kurso kampas buvo apie

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametru tyrimai



3.14 pav. Minimalus tanklaivio, kurio dedveitas – 35 000 t, valdomumo greitis jį pasyviai stabdant, kai įvairių krypčių vėjas siekia 15 m/s, apskaičiuotas taikant teorinėje dalyje pateiktą metodiką ir remiantis ○ eksperimentinių tyrimų realiame laive rezultatais

Fig. 3.14. Minimal tankers (DWT 35000 t) steering speed during pasive stoping, depends of the wind 15 m/s from differnd directions, received by methodics, presented in theoretical section and real ship ○ experimental results

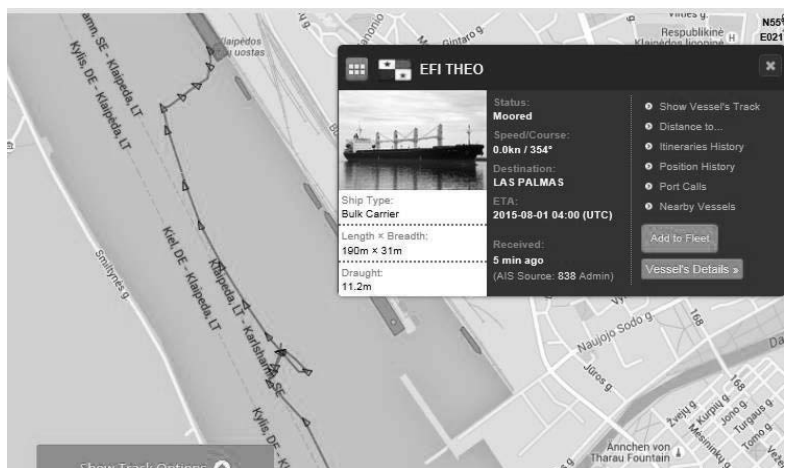
40°, laivas prarado valdomumą, pradėjo sukstis į vėjo pusę ir išplaukęs už kanalo ribų „sėdo“, t. y. užplaukė, ant seklumos (uosto vidinio navigacinio kanalo šlaito) (3.15–3.16 pav.) (AIS, 2015). Vidiniu uosto kanalu plaukiančio laivo „Efi Theo“ nelydėjo vilkikas laivagalyje. Susidarius avarinei situacijai, laivagalyje trumpu vilkimo lynu pritvirtintas vilkikas būtų galėjęs padėti suvaldyti laivą, sudarydamas sukimo momentą, priešingą išorinėms poveikio jėgoms, šiuo atveju aerodinaminiam sukimo momentui. Atlikti skaičiavimai leidžia teigti, kad 50 T traukos vilkikas turėjo išsidėstyti 135° kampu į kairįjį bortą (q_V – apie 45°) ir sudaryti vilkimo lyno įtempimą apie 12 T, t. y. dirbti pačiu mažiausiu greičiu, to būtų pakakę išlaikyti minėtą laivą navigaciniame kanale, kol jis būtų nuplaukęs iki Klaipėdos uosto šiaurinio laivų apsisukimo baseino, kur būtų priplaukę papildomi vilkikai.

Pirminė laivo užplaukimo ant seklumos analizė patvirtino 2 skyriuje pateiktos metodikos pritaikomumą. Uosto administracijai rekomenduotume uostu plukdant labai didelius laivus naudotis vilkikų palyda laivagalyje.

Taigi minimalus laivo valdomumo greitis, sustabdžius laivo mašiną arba pasukus kintamojo žingsnio sraigto mentes į nulinę padėtį, turi būti nustatytas plaukti uostuose jau planuojant uosto infrastruktūrą, siekiant numatyti būtinas papildomas valdomumo priemones (vilkikus) arba minimalius būtinus kanalų ir akvatorijų parametrus.

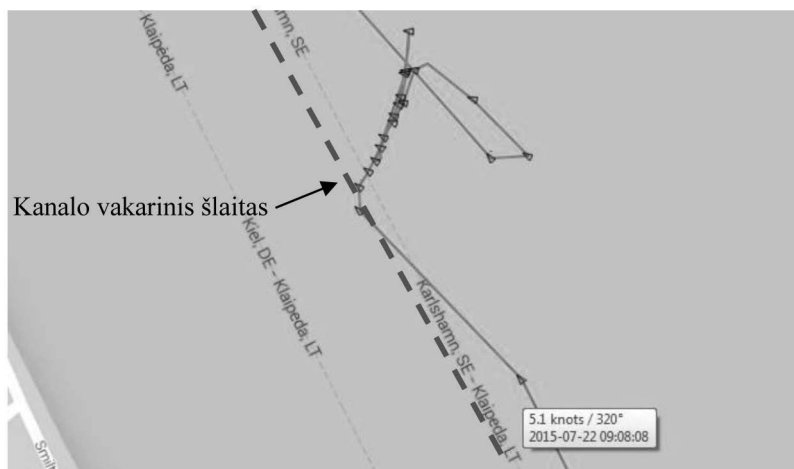
Laivo įsibėgėjimo charakteristikas leidžia pagerinti vilkikai, tai svarbu ribotose uostų akvatorijose, kai uosto vartai, pro kuriuos plaukiant būtina pasiekti bent minimalų leistiną greitį, yra arti laivo pradinio įsibėgėjimo taško. Svarbu įvertinti ir tai, kad vilki-

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametru tyrimai



3.15 pav. Laivo „Efi Theo“ plaukimo Klaipėdos uosto vidiniu navigaciniu kanalu trajektorija ir užplaukimas ant seklumos 2015-07-22 (AIS 2015)

Fig. 3.15. Ship’s “Efi Theo” sailing in Klaipėda port internal navigation channel and grouting 2015-07-22 (AIS 2015)



3.16 pav. Laivo „Efi Theo“ plaukimo trajektorija, valdomumo praradimo vieta ir užplaukimas ant seklumos 2015-07-22 (AIS 2015)

Fig. 3.16. Ship’s “Efi Theo” sailing trajectory, ship’s control loss place and grouting 2015-07-22 (AIS 2015)

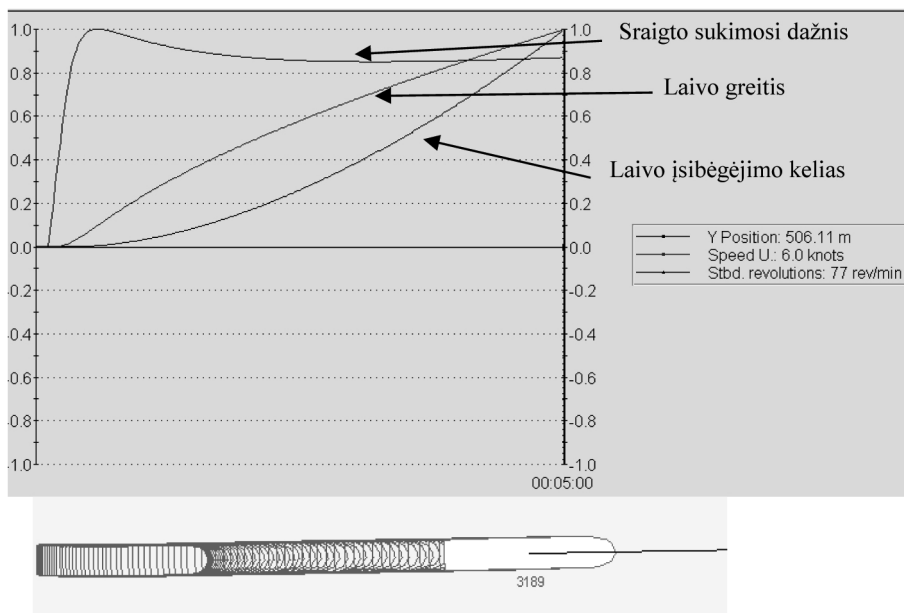
3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametru tyrimai

kas efektyvus pradiniam laivo įsibėgėjimo etape, o pasiekus 5–6 mazgų greitį toliau jį naudoti netikslinga, gali būti naudojamas tik kaip palydos vilkikas ypatingose situacijose: plukdant didelius laivus, siekiant juos suvaldyti, kol įveiks sudėtingas vietas.

Kai vilkikai naudojami laivo įsibėgėjimo charakteristikoms pagerinti, jie tiesiog velka laivą, naudodami trumpą vilkimo lyną. Siekiant sutrumpinti laivo įsibėgėjimo kelią esant mažam gyliui, ypač svarbus pradinis etapas, nes padidėja laivo pasipriešinimas dėl seklos poveikio, šiuo atveju būtinas laivo įsibėgėjimo kelio dydis, norint pasiekti būtiną greitį uosto vartuose arba kitose sudėtingose vietose, yra didesnis, palyginus su laivo įsibėgėjimo keliu, esant dideliame gyliui.

Laivo įsibėgėjimo tyrimams taikyta 2 skyriuje pateikta metodika, vizualieji treniruokliai (SimFlex 2012; SimFlex 2014) ir realių laivų įsibėgėjimo nuo Klaipėdos uosto krantinių Nr. 1–2 stebėjimas AIS (AIS 2015) ir AIS-LERS (AIS-LERS 2015).

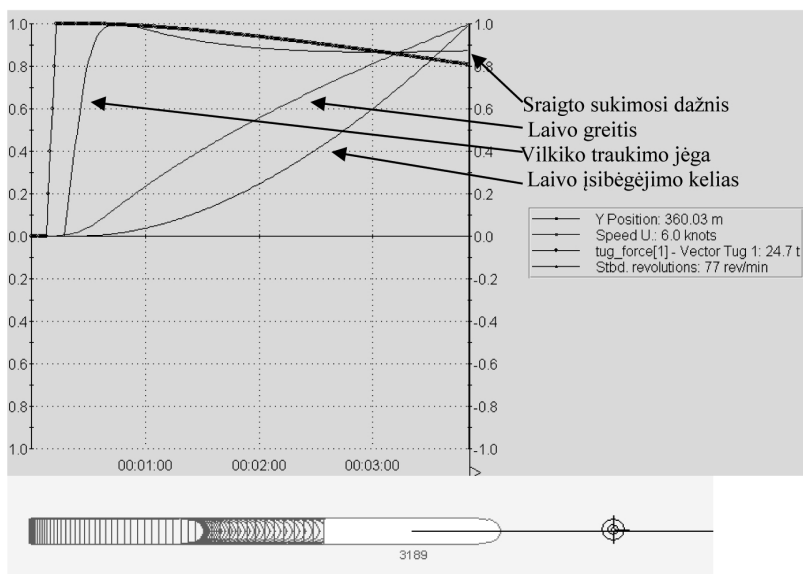
3.17–3.18 paveiksluose pateiktos laivo įsibėgėjimo trajektorijos ir jo judėjimo parametrai įsibėgėjimo metu nenaudojant vilkikų ir juos naudojant, siekiant pagerinti laivo įsibėgėjimo charakteristikas.



3.17 pav. PANAMAX tipo laivo įsibėgėjimo, plaukiant visu greičiu (visas variklio galingumas) nuo pradinio greičio (0 mazgų) iki 6 mazgų, parametrai ir trajektorija (skaičiavimo rezultatai)

Fig. 3.17. PANAMAX type ships sailing from speed 0 knots up to 6 knots on full speed (engine full ahead) sailing parameters and trajectory (calculation results)

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametrų tyrimai



3.18 pav. PANAMAX tipo laivo įsibėgėjimo, naudojant vilkiką (30 T) ir plaukiant visu greičiu (visas variklio galingumas) nuo pradinio greičio (0 mazgų) iki 6 mazgų, parametrai (skaičiavimo rezultatai)

Fig. 3.18. PANAMAX type ships sailing with tug (30 T) from speed 0 knots up to 6 knots on full speed (engine full ahead) sailing parameters (calculation results)

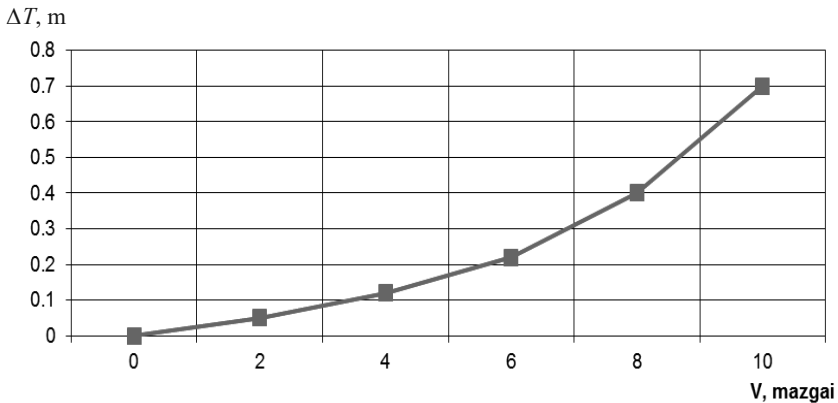
Kaip matyti iš gautų rezultatų, laivo įsibėgėjimo charakteristikos (įsibėgėjimo kelias) esant mažam gyliui, nenaudojant vilkikų ir juos naudojant, skiriasi apie 1,5 karto, o tai laivams, kurie plaukia iš uosto terminalų, esančių netoli uosto vartų, ypač svarbu, norint uosto vartuose pasiekti būtiną laivo greitį.

3.4. Laivo grimzlės pokyčio uosto kanaluose, uosto kanalų ir laivų apsisukimo baseinų palyginamieji ir ribinių sąlygų tyrimai

Laivo grimzlės padidėjimas dėl greičio („prasėdimas“) apskaičiuotas disertacijos autoriaus sukurtais teoriniais metodais (pateikti 2 skyriuje), kurie patikrinti realiuose laivuose ir naudojant sureguliuotus treniruoklius „SimFlex Navigator“ (SimFlex 2012) bei „SimFlex 4“ (SimFlex 2014). Tyrimų rezultatai palyginti su kitais Lietuvoje ir pasaulyje atliktais tyrimais (Paulauskas D., Paulauskas V. 2009; PIANC 2010). Konteinervežių tyrimų rezultatai pateikti 3.19 paveiksle.

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametru tyrimai

Plaukiant greičiu iki 6 mazgų tiriamų laivų grimzlės padidėjimas dėl greičio („prasėdimas“) sudaro iki 0,20–0,25 m, jis gali būti apskaičiuotas taikant įvairias metodikas (pavyzdžiui, Strem 2004). Gauti laivo grimzlės padidėjimo („prasėdimo“) dėl seklumos poveikio rezultatai yra svarbūs planuojant uostų kanalų ir akvatorijų gylius bei nustatant ribines laivų įplaukimo į uostus, esant konkrečioms gyliams, galimybes.



3.19 pav. Konteinervežio ($L = 250$ m) „prasėdimas“ (m) dėl greičio kanale, kai $T/H = 0,87$

Fig. 3.19. Container vessel ($L = 250$ m) squat (m) in case $T/H = 0,87$

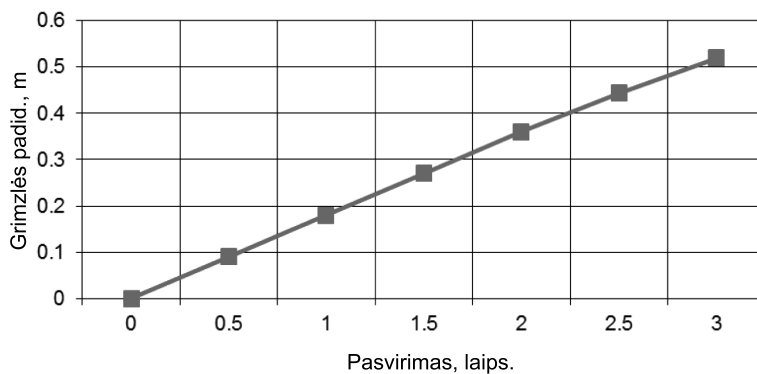
Laivams plaukiant nedideliu greičiu (iki 6 mazgų), „prasėdimas“ dėl laivo plaukimo greičio yra nedidelis ir mažai priklauso nuo bendrojo laivo korpuso pilnumo koeficiento. Išnaudojant šiuolaikines matavimo galimybes atlikti teoriniai skaičiavimai ir eksperimentiniai tyrimai (PIANC 2010) (1.3 pav.) uosto sąlygomis, kai iki 6–7 mazgų ribojamas laivų plaukimo greitis, ir laivo „prasėdimas“ gali būti gana tiksliai vertinamas, taikant 2 skyriuje pateiktą metodiką.

Didelio laivo pasvirimo kampai, kai šoninis vėjas siekia iki 15 m/s, kaip parodė teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai, sudaro ne daugiau kaip $1,0^{\circ}$ – $1,5^{\circ}$. Skaičiuojant laivo grimzlės padidėjimą dėl laivo pasvirimo, reikia įvertinti laivo korpuso užapvalinimo spindulį, kuris didelių konteinerių ir automobilių vežimo laivų, kurių ilgis – apie 250 m, plotis – apie 30–35 m, grimzlė – apie 11–15 m, yra (R') nuo 6,5 m iki 8,5 m.

Laivo grimzlės padidėjimas dėl laivo pasvirimo kampo svarbus esant mažam klirensui: laivas gali pasvirti nuo šoninio vėjo arba, esant mažam laivo šoninio pasvirimo metacentriniam aukščiui (0,2–0,5 m), pasvirimui sukant laivą įtakos gali turėti vilkikai.

Gauti tyrimo rezultatai atskleidė, kai laivo pasvirimo kampas – apie 2 laipsniai, jeigu laivo plotis – apie 30 m, grimzlė padidėja apie 0,4 m, į tai būtina atsižvelgti esant mažam gyliui.

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametru tyrimai



3.20 pav. Laivo, kurio plotis – apie 33 m, grimzlės padidėjimas, atsižvelgiant į laivo pasvirimo kampą

Fig. 3.20. Ships (width about 33 m) draft increasing, depends of the heel angle

Daugelio uostų naudojama šiuolaikinė laivo vietos nustatymo ir gilimo bei gylio matavimo technika ir taikomos technologijos leido gerokai sumažinti kanalų, akvatorijų, laivų apsikimo baseinų parametrus ir sėkmingai konkuruoti su kitais – to nepadariusiais uostais. Laivų avarių, kurios įvyko per pastaruosius 10 metų, uostuose analizė atskleidė, kad pagrindinės jų priežastys – nesinaudojimas turimomis naujausiomis navigacinėmis priemonėmis ir elementarios žmonių klaidos, o ne per maži kanalų, akvatorijų bei laivų apsikimo baseinų parametrai. Pagrindinė avarių, įvykusių Klaipėdos uoste (tanklaivio „Princesė Pi“ užplaukimas ant seklumos prie pietinio molo, ro-ro laivo „Tor Corona“ susidūrimas su tanklaiviais, stovinčiais prie krantinių [KVJUD 2014]), priežastis – žmonių klaidos, nesinaudojimas turima navigacine įranga, neišnaudotos laivų manevrinės galimybės, taigi abiem minėtais atvejais uosto infrastruktūra avarių nenulėmė.

Atliekant uosto infrastruktūros parametru tyrimus, svarbi palyginamoji analizė. Parenkant lyginamus uostus, svarbu tiksliai įvertinti: analizuojamų uostų panašumą, į uostus plukdomų laivų dydį, ypač didžiausių laivų, avaringumo uostuose lygį.

Atsižvelgiant į tai, kad iki LKAB „Klaipėdos Smeltė“ nuolat plaukioja laivai, kurių ilgis siekia daugiau nei 250 m, palyginamajai analizei su kitais uostais atlikti vertinta atkarpa nuo LKAB „Klaipėdos Smeltė“ iki UAB Klaipėdos konteinerių terminalo naudojamos krantinės Nr. 143. Parinkti palyginamieji uostai arba jų dalys navigaciniu požiūriu yra panašūs į įplaukos kanalo į Malkų įlanką bei apsikimo baseino Malkų

įlankoje sąlygas, kur atlikti teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai, naudojant vizualiuosius treniruoklius bei stebint realių laivų plaukimą.

Įplaukos į Malkų įlanką (dugne) kanalo (85 m, šiuo metu kanalas išplatintas iki 120 m) ir tiriamo laivo (33 m) pločių santykis (B_k/B) sudaro 2,58, t. y. didesnis negu lyginamų uostų, į kuriuos plukdomi didžiausi laivai, kur kanalo (dugne) ir plukdomų laivų pločių santykis (B_k/B) sudaro: Gdanskas – 2,0; Gdynė – 2,06; Ventspilis – 1,90; Gentas – 1,89.

Gdanskos uostas turi labai siaurą įplaukos kanalą ir vidinį kanalą, kurių minimalus plotis – apie 80 m. Vidiniame kanale yra daugiau nei 90 laipsnių posūkis. Yra du laivų apsikimo baseinai, vieno skersmuo – 200 m (ties Vesterplacu), antro – didžiojo laivų apsikimo baseino skersmuo ties laivų statykla ir laivų remonto įmone – 300 m, uosto akvatorijoje ir kanaluose yra santykinai nestipri srovė (Vyslos upės deltos atšaka – Mortva Vysla [*Mortva Wisla*]).

Gdynės uostas turi vidinius vartus, kurių plotis – 95 m, ir du laivų apsisukimo baseinus, vienas kurių yra prie vidinių vartų (skersmuo – apie 320 m), antras – prie konteinerių terminalo (skersmuo – apie 290 m, gyliui esant 13,5 m). Už vidinių uosto vartų nėra srovės, t. y. situacija panaši kaip ir Malkų įlankoje.

Ventspilio vidinis uostas išsidėstęs Ventos upėje. Vidinio kanalo Ventos upėje plotis – 80–100 m, laivų apsikimo baseinas ties krantine Nr. 14 sudaro apie 265 m (gylis – 14,2 m). Į „Kalio parks“ biriųjų krovinių terminalą plaukia POSTPANAMAX biriųjų krovinių laivai, kurių ilgis sudaro iki 250 m, plotis – iki 42 m, grimzlė – iki 14,2 m (gylis vidiniame kanale, t. y. Ventos upėje, – iki 15,0–15,5 m).

Gento uostas yra išsidėstęs apie 40 km nuo Ternezeno šliužų, į jį veda kanalas, kurio ilgis – apie 40 km, plotis paviršiuje – 150 m Olandijos teritorijoje ir apie 200 m – Belgijos teritorijoje, kanalo dugno plotis – 70 m tiesioje atkarpoje ir 80 m – posūkiuose. Gylis kanale ir šliuze (didžiajame) – 13,5 m. Į Gento uostą nuolat plukdomi laivai, kurių grimzlė yra iki 12,5 m (eksperimentai atlikti su laivais, kurių grimzlė sudarė 13,0 m), leistinas laivų ilgis – iki 269 m (šliuzo vidinis kameros ilgis – 290 m), laivų plotis – iki 37 m (šliuzo vidinės kameros plotis iki atmušų – 38 m).

Į Gento uostą plukdant didžiausius leistinus laivus (didžiausias laivų plotis – 37 m), kanalo (dugne) pločio ir laivo pločio santykis (B_k/B) plaukiant tiesiąja atkarpa sudaro 1,89, posūkiuose – 2,16. Klirensas visame kanale ir šliuze apskaičiuojamas kaip ir plaukiant įprastomis sąlygomis, t. y. 1,0 m, atliekant specialius eksperimentus – 0,5 m.

Kaip matyti iš pateiktų lyginamųjų rezultatų įplaukos į Malkų įlanką kanalo pločio (B_k/B) ir laivų apsikimo baseino skersmens (DB/L), Malkų įlankoje parametrai navigaciniu požiūriu yra geresni, palyginus su lyginamais uostais (Gdanku, Gdyne, Ventspiliu ir Gentu).

3.4 lentelė. Lyginamoji uostų infrastruktūros laivybos saugumo požiūriu analizė

Table 3.4. Ports infrastructure compare regarding navigational safety analysis

Parametrai	Jūrų uostai				
	Klaipėda (Malkų įlanka)	Gdanskas	Gdynė	Ventspilis	Gentas
Max. laivai L x B, m	250 x 33	295 x 40	295 x 46	250 x 42	269 x 37
Min. kanalų plotis, m	85	80	95	80	70
Bk/B	2,57	2,00	2,06	1,90	1,89
Laivų apsisukimo baseino skersmuo, m	285	300	320	265	320
Laivų apsisukimo baseino ir laivo ilgio santykis DB/L	1,14	1,02	1,08	1,06	1,18

Taigi atlikti teoriniai ir eksperimentiniai kanalų pločio bei gylio tyrimai su realiais laivais ir navigaciniu treniruokliu, pasirinktų palyginamųjų uostų teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai atskleidė, kad įplaukos į Malkų įlanką kanalas bei laivų manevravimo Malkų įlankoje sąlygos ir gauti palyginamieji rezultatai gali būti sėkmingai panaudoti Klaipėdos ir kituose uostuose.

Didelis laivas dažniausia apsakamas, jam plaukiant su balastu: laivui su balastu įplaukus į uostą, jis iš karto, prieš švartuojant prie krantinės, apsakamas išplaukimo iš uosto kryptimi. Į uostą įplaukęs pakrautas laivas, jeigu leidžia jo konstrukcija (atsižvelgiant į laivo krovos įrangos išdėstymą) ir uosto taisyklės, švartuojamas prie krantinės, iškraunamas, tada atšvartuojamas, apsakamas, priešvartuojamas išplaukimo iš uosto kryptimi, pakraunamas ir išplukdomas iš uosto. Laivas uoste dažniausia apsakamas naudojant vilkikus (naudojama nuo dviejų iki keturių vilkikų).

Pro laivą praplaukiančiam vilkikui būtina papildoma kanalo pločio atsarga, prireikus stabdyti laivo sukimąsi, kad vilkikai pakeistų savo vilkimo kryptį. Vilkikų, praplaukiančių pro laivą, papildoma laivo apsakimo baseino pločio (skersmens) atsarga turi sudaryti ne mažiau kaip $2 B_v$ (du vilkiko pločius). Laivų apsakimo baseino skersmuo, pavyzdžiui, Klaipėdos uosto Malkų įlankoje, šiuo metu yra 285 m, t. y. laivų apsakimo baseino ir laivo ilgio santykis (DB/L) numatytiems laivams, kurių ilgis – 250 m, sudaro 1,14.

Minimalūs laivų ap(si)sukimo baseinų skersmenys gali būti taikomi naudojant ypač tikslią navigacinę įrangą, t. y. locmanines arba panašias navigacines sistemas (E-Sea Fix 2012), kurios leidžia kontroliuoti laivo padėtį 1–2 m tikslumu ir nustatyti planuojamą laivo vietą po vienos arba kelių minučių (angl. *Predict system*).

Laivo ap(si)sukimo baseino skersmuo laivams, kurie naudoja stūmas, turi būti ne mažesnis kaip $(1,1–1,3)L$ (mažesnis koeficientas taikytinas didesniems laivams), pa-

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametrų tyrimai

vyzdžiui, tirtam konteinervežiui ($L = 250$ m) apsisukimo baseino skersmuo turi būti ne mažesnis kaip 275 m.

Atsižvelgiant į laivo dydį ir naudojamą jo apsikimo būdą, remiantis tyrimų rezultatais, sudaryta minimalaus būtino laivų ap(si)sukimo baseino skersmens lentelė (laivams su stūmomis laivų ap(si)sukimo baseino skersmuo imtas priimant mažesnio tikslumo variantą, t. y. $1,2 L$) laivams, kurių ilgis – iki 100 m, ilgesniems laivams koeficientas proporcingai mažinamas, be to, įvertinama tai, kad laivai turi taikyti tikslias šiuolaikines navigacines sistemas, tokias kaip „E-Sea Fix“ (E-Sea Fix 2012) arba panašias, ypač ribinių dydžių laivai.

3.5 lentelė. Laivų apsikimo baseino skersmens priklausomumas nuo laivo ilgio ir jo apsikimo būdo

Table 3.5. Ships turning basins diametre depends of the ship's length and turning method

Laivo ilgis L , m	100	120	140	160	180	200	220	250
D_B apsukant laivą vilkikais, m	136	150	170	192	214	236	258	291
D_B naudojant laivo stūmas, m	120	140	160	180	205	225	245	275

Gauti laivo ap(si)sukimo baseino skaičiavimo rezultatai gali būti taikomi esant tinkamoms hidrometeorologinėms sąlygoms, kai bet kurios krypties vėjas yra ne stipresnis kaip 10–12 m/s. Pučiant stipresniam vėjui būtina taikyti papildomas priemones, t. y. naudoti papildomus vilkikus arba didesnio skersmens laivų ap(si)sukimo baseinus, pavyzdžiui, laivus, kurie plaukia į pietinę Malkų įlankos dalį, būtina apsukti šiaurinėje Malkų įlankos dalyje ir toliau plukdyti su vilkikais.

Treniruoklio bandymai (SimFlex 2014), atlikti su konteinervežiu, kurio ilgis – 250 m, turi du pavairavimo įrenginius, kurių traukimo jėga yra: laivapriekio pavairavimo įrenginio (stūmos) – 11 T, tai atitinka 800 kwt galingumo vilkiką; laivagalio pavairavimo įrenginio (stūmos) – 7 T, tai atitinka 500 kwt galingumo vilkiką. Nurodytos stūmų traukimo jėgos, dirbant kartu su laivo sraigto ir vairo, pakanka apsukti laivą savarankiškai, kai vėjo greitis siekia iki 18–20 m/s, bet stūmų traukimo jėgos nepakanka patikimai valdyti laivą judant atgal, kai vėjo greitis yra didesnis kaip 12 m/s. Jeigu vėjas yra stipresnis kaip 12 m/s, būtina naudoti vieną arba du vilkikus, esant šoninių krypties vėjui, arba laivas turi būti aprūpintas galingesnėmis stūmomis.

Teoriniams ir treniruoklio tyrimams, plaukiant į Malkų įlanką kanalu, bei manevravimo Malkų įlankos laivų ap(si)sukimo baseine maksimalioms galimybėms įvertinti, taikant teorinius metodus (žr. 2 skyrių) ir naudojant „SimFlex Navigator“ treniruoklį (SimFlex 2014), naudotas konteinervežis, kurio parametrai: $L = 294$ m; $B = 32,8$ m; $T = 10,5$ m, šoninio buringumo plotas – 7800 m²; laivas turi priekinę ir laivagalio stūmas (po 20 T), tai atitinka vilkikus, kurių galingumas – apie 1300 kW (vieno).

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametrų tyrimai

Įplauka į Malkų įlanką pagilinta +2,5 m, atliekant bandymus vėjas nustatytas 230°, 12 m/s.

Esant ribinei situacijai pirmiausia būtina labai tiksli laivo padėties ir jo atliekamų manevrų kontrolė, siekiant laiku imtis veiksmų, kurie užtikrintų pakankamą navigacinį saugumą. Tam būtina tiksli laivo vieta ir tikslūs laivo judesio parametrai, t. y. laivo korpuso bendras judėjimo vektorius, laivapriekio ir laivagalio judėjimo vektoriai, pavyzdžiui, RTK sistemoje (E-Sea Fix 2012).

Esant ypač sudėtingai situacijai, matavimo rezultatai neturėtų vėluoti, pavyzdžiui, DGPS signalai atnaujinami kas 10–15 s, jei laivas judėjimo parametrų nekeičia, gauti rezultatai yra gana tikslūs, nes tarp signalų atnaujinimo pati sistema atlieka analitinį laivo vietos ir judėjimo vektoriaus vertinimą.

Esant laivo judesio parametrų pokyčiui (laivas sukasi, keičia judėjimo greitį ir panašiai), paklaidos gali siekti iki kelių metrų. Pavyzdžiui, gauti įplaukos į Malkų įlanką kanalo ir apsisukimo baseino Malkų įlankoje parametrai, plaukiant kanalu didžiausiam šiuo metu galimam laivui (konteinervežiui, kurio ilgis – iki 250 m) prie krantinės Nr. 143, atitinka tokių laivų plukdymo galimybes.

Ištirtas lyginamų uostų (3.4 lentelė), kuriuose plukdomi ir apsukami didžiausi laivai, laivų apsisukimo baseino ir laivo ilgio santykis (DB/L), kuris sudaro: Gdanskas – 1,02; Gdynė – 1,05; Ventspilis – 1,06; Gentas – 1,18. Papildomai tirti ir kiti uostai bei kitos Klaipėdos uosto vietos, atlikti tyrimai su „SimFlex Navigator“ treniruokliu (SimFlex 2014), patikrintas realių laivų įplukdymas į uostus ir manevravimas juose, naudojant AIS (AIS 2015), vertinant galimus didžiausius laivus, kuriuos galima apsukti laivų ap(si)sukimo baseinuose. Taip į Havro uostą pradėjo plaukti MEGA konteineriniai laivai (laivo ilgis – apie 400 m), apsukami laivų ap(si)sukimo baseine, kuriame baseino ir laivo ilgio santykis (DB/L) sudaro apie 1,15. Klaipėdos uoste treniruokliu „SimFlex Navigator“ (SimFlex, 2014) išbandytas tanklaivio, kurio ilgis – 320 m, t. y. laivų ap(si)sukimo baseino ir laivo ilgio santykis (DB/L) sudaro apie 1,18, apsikimas.

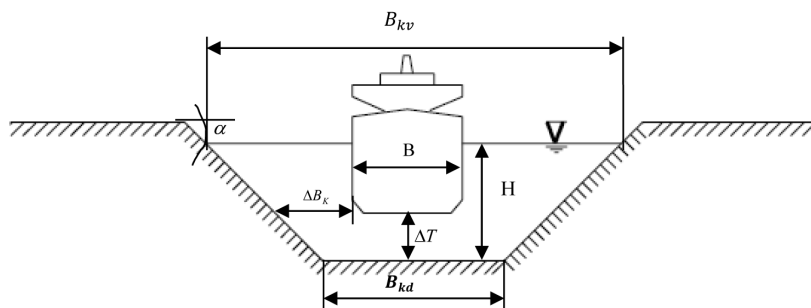
Laivų ap(si)sukimo baseinai optimizuojami tiksliai ištyrus laivo savybes, naudojant modernią navigacinę įrangą. Teorinėje dalyje pateikta laivų manevrinių savybių tyrimo, laivų ap(si)sukimo baseinų vertinimo ir optimizavimo metodika, patikrinta eksperimentiniais tyrimais realiuose laivuose bei treniruoklyje, taikant 2D ir 3D sistemas, atskleidė, kad teoriniai skaičiavimai ir eksperimentiniai tyrimai sutampa, o paklaidos neviršija 7–10 %, kaip numatyta TJO SOLAS 74 konvencijoje (SOLAS 1974).

3.5. Kanalų parametru nustatymas, atsižvelgiant į laivų manevrines savybes

Rengiant uostų infrastruktūrą vienas svarbiausių elementu yra uosto įplaukos ir vidiniai kanalai. Pagrindinės kanalų charakteristikos (ABS 2004; Strem 2004; Paulauskas 1999B): kanalo gylis (H); kanalo plotis (B_k); kanalo posūkio spindulys (R_k); kanalo profilis (pilno, atvirojo arba pusiau atvirojo).

Planuojant navigacinius kanalus visada įvertinama: σ_y – galimas laivo nukrypimas nuo kanalo ašies; ΔB_K – minimalus atstumas iki kanalo krašto; ΔT – atstumas nuo laivo korpuso iki dugno (klirensas); α – kanalo šlaito nuolydis.

Papildomai prie nurodytų parametru vertinant kanalus taikoma: kanalo plotis paviršiuje; kanalo plotis dugne (navigacinis); kanalo gylis (navigacinio kanalo plotyje); kanalo posūkio spindulys.



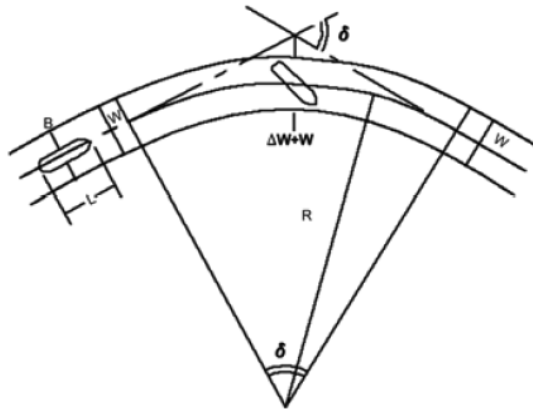
3.21 pav. Pagrindiniai kanalo parametrai

Fig. 3.21. The main parameters of the channel

Projektuojant kanalus priimamas skaičiuojamasis (galimas maksimalus) laivas ir jo atžvilgiu numatomi anksčiau nurodyti kanalo parametrai.

Planuojant uostų navigacinius kanalus svarbu tiksliai įvertinti, atsižvelgiant į didžiausio skaičiuojamojo laivo manevrines savybes, kanalo posūkio spindulį ir galimus laivo nukrypimus nuo numatytos trajektorijos dėl vidinių ir išorinių poveikiu: vairo plokštės posūkio laiką; laivo mašinos reverso laiką; vėjo ir srovės poveikį bei galimus pokyčius kanalo posūkio vietoje; bangos poveikį ir kt.

Nurodytos papildomos atsargos yra svarbios: skirtingose šalyse ir esant konkrečioms sąlygoms jos numatomos skirtingos. Priimant nurodytas papildomas atsargas (ΔW) dažniausia remiamasi PIANC (PIANC 2005), EAU (EAU 2012) rekomendacijomis, kartais – normomis, kurios pateiktos Eurokoduose ir nacionaliniuose dokumentuose, bet paprastai rekomendacijose neatsižvelgiama į laivo valdomumo plaukiant konkrečiomis sąlygomis ypatumus, todėl nustatomos arba per didelės atsargos, lemiančios ir nepagrįstas investicijas, arba didėja navigacinė rizika.



3.22 pav. Kanalo posūkio pagrindiniai planavimo parametrai:

δ – kanalo posūkio kampas; R (R_k – kanalo spindulys; L – laivo ilgis; B – laivo plotis; W (B_k) kanalo plotis; ΔW – papildomas kanalo plotis

Fig. 3.22. Channel bend main planning parameters

Tikslinga pastebėti, kad dažniausia taikomos rekomendacijos, kurios leidžia palyginti ir lengvai interpretuoti reikalavimus įvairiose šalyse, kartais – ir tos pačios šalies uostuose. Papildomų atsargų dydžiai labiausiai priklauso nuo administracinių sprendimų, t. y. uosto kapitonas arba uosto administracija nustato minimalias papildomas atsargas (Ventšpils 2014; Klaipėda 2014), kurios kartais būna rizikingos. Tai paprastai daroma dėl laivo vietos nustatymo tikslumo ir patikimumo, gylio matavimo tikslumo ir patikimumo apribojimo, taikomos įvairių nestandartinių įvykių praktikos.

Įvairiose šalyse atlikti moksliniai tyrimai (Brian et al. 2005; Chun-Ki et al. 2008; Gung-Rong et al. 2001) nepateikia aiškaus atsakymo, koks turi būti atstumas tarp laivo ir kanalo krašto, tarp prasilenkiančių laivų esant dvipusiam laivų judėjimui kanalu, kaip tai suderinti su laivų manevrinėmis savybėmis.

Papildomų atsargų numatymo priežastys susijusios su nepakankamu ištyrimu, t. y. trūksta mokslinių tyrimų ir jų praktinio taikymo patirties.

Aiškių kriterijų arba normų nebuvimas dažnai nepagrįstai didina uostų kanalų ir akvatorijų bei krantinių plėtros investicijas arba riziką.

Planuojant Klaipėdos SGD terminalą, užsienio projektuotojai, remdamiesi PIANC rekomendacijomis (PIANC 2005), pateikė tokius rezultatus: uosto įplaukos kanalo plotis turėjo būti ne mažesnis kaip 300 m, vidinių navigacinių kanalų plotis – ne mažesnis kaip 200 m. Esamas įplaukos ir vidinio navigacinio kanalo plotis yra 150 m ir jo didinti per artimiausius metus nebuvo ketinta.

Sprendžiant disertacijoje iškeltus uždavinius buvo būtina tiksliai nustatyti galimus saugių Klaipėdos uosto įplaukos ir vidinių navigacinių kanalų pločius, tiksliau įvertinus SGD tanklaivių manevrines savybes esant mažam gyliui, bei įrodyti, kad esamų uosto kanalų pločių pakanka standartiniams SGD tanklaiviams (jų talpa – apie 150 000 m³). Tyrimų rezultatai buvo pateikti SGD terminalo projekto užsakovui ir investuotojams, kurie juos patvirtino ir Klaipėdos uoste buvo pastatytas bei pradėtas eksploatuoti SGD terminalas.

3.6. Ribinės uosto infrastruktūros sąlygos laivo valdomumo ir grimzlės atžvilgiu

Laivo ap(si)sukimas ir švartavimas prie krantinės, naudojantis vilkikais, yra sudėtingas manevras, nes esant labai dideliems laivams ir sudėtingoms hidrometeorologinėms sąlygoms naudojami ne mažiau kaip trys ar keturi vilkikai.

Dideliems laivams ypač svarbi hidrodinaminė jėga (pakrautam laivui), nes yra dideli laivo korpuso povandeninės dalies plotai ir, esant srovei, susidaro didelės jėgos, veikiančios nuo krantinės arba į krantinę. Pavyzdžiui, PANAMAX tipo laivo (ilgis tarp statmenų – 210 m, grimzlė –12,5), kai srovė – 1,0 m/s (2 mazgai) statmenai laivo švartavimo krypties, hidrodinaminė jėga, kurią sudaro srovė, lygi apie 2 000 000 N, t. y. 2000 kN, arba 200 T. Taigi reikia mažiausiai dviejų 100 T vilkimo jėgą ant kablo turinčių vilkikų (3–4 vilkikai, kurių traukimo jėga – ne mažesnė kaip po 500 kN). Tokio laivo aerodinaminė jėga, esant palankioms švartavimo sąlygoms, kai šoninio buringumo projekcijos į vidurinę plokštumą plotas yra apie 1800 m², vėjo greitis – 10 m/s, sudaro apie 95 000 N, t. y. 95 kN, arba 9,5 T; kai vėjo greitis – 20 m/s – apie 380 000 N, t. y. 380 kN, arba 38 T. Dėl to svarbu iš anksto įvertinti galimas jėgas ir atitinkamai numatyti būtiną vilkikų skaičių. Laivui atšvartuoti paprastai naudojami du arba daugiau vilkikų, kurie turi nutempti laivą nuo krantinės. Būtina vilkikų traukimo jėga apskaičiuojama taip pat, kaip ir švartuojant laivą. Jeigu nepakanka dviejų vilkikų, gali būti panaudoti trys ir daugiau, tenkinant nurodytą sąlygą.

Atitraukus laivą nuo krantinės, ypač jei jis prišvartuotas netoli uosto vartų, laivui būtina įsibėgėti iki saugaus greičio uosto vartuose. Paskirais atvejais laivas atitraukiamas atgal, t. y. gilyn į uostą, taip užtikrinant didesnę įsibėgėjimo atstumą. Toks manevras turi privalumų ir trūkumų. Privalumas tas, kad laivą traukiant atgal dirba jo pagrindinis variklis, kuris tuo metu papildomai išildomas, kad įsibėgėjant galėtų dirbti norimu galingumu. Trūkumas, ypač laivą traukiant prieš srovę, tas, kad jis gali patirti „sparno“ efektą (susidaro kampas tarp laivo judėjimo ir srovės krypties, tada jį valdyti sudėtinga). Siekiant pagreitinoti laivo įsibėgėjimą dažnai naudojamas vilkikas: laivo priekyje plaukiantis galingiausias turimas vilkikas, naudodamas maksimalų galingumą, padeda laivui greičiau pasiekti norimą greitį, o laivagalyje paliktas antrasis vilkikas gerina laivo valdomumą (jeigu būtina). Laivui pasiekus 5–6 mazgų greitį, vilkiko efektyvumas mažėja, tada jį galima palikti kaip lydintįjį vilkiką, jei netikėtai iškiltų nestandartinė situa-

cija, arba laivapriekio vilkiko atsisakyti, t. y. pasiekus 5–6 mazgų greitį jį paleisti. Laivagalio vilkikas gali būti paliktas kaip lydintysis, kad prirėkus padėtų valdyti laivą, bet pasiekus maždaug 6 mazgų greitį jo galimybės gerokai sumažėja, dažnai jis net trukdo.

Didelių laivų švartavimas uoste yra sudėtinga operacija, kuriai būtina kruopščiai pasiruošti: apskaičiuoti būtiną vilkikų galingumą ir numatyti ribines uosto infrastruktūros sąlygas. Pastarosios turi būti vertinamos atsižvelgiant į maksimalų konkrečiam uostui skaičiuojamą laivą.

Įvertinus, pavyzdžiui, planuojamą Klaipėdos uosto krantinių ir pirsų išdėstymą, skaičiuojant (žr. 2 skyriuje pateiktą metodiką) ir naudojant „SimFlex Navigator“ treniruoklį, atsižvelgiant į pasirinktus ro-ro laivus, kurių santykiniai parametrai: šoninės jėgos (T) ir laivo vandentalpos santykis sudaro nuo 0,2 % iki 0,5 %; bendras stūmų galingumas (kwt) ir laivo vandentalpos santykis – nuo 7,5 % iki 15 %, nustatyti būtinai vilkikų galingumai.

Teoriškai apskaičiuotos laivų savarankiško švartavimosi galimybės, atlikta daugiau kaip keturiasdešimt bandymų treniruokliais, rezultatai palyginti su realių laivų švartavimo sąlygomis (remiantis AIS informacija). Skaičiuojant ir atliekant bandymus nustatytos ribinės sąlygos, kai laivai savarankiškai gali prisišvartuoti ir atsišvartuoti nuo išorinės pirsų pusės, kaip sudėtingesnės, atsižvelgiant į: srovės kryptį; srovės greitį; vėjo greitį, esant nepalankiausiai vėjo kryptiai – statmenai į laivo bortą; laivo sudaromos šoninės jėgos ir laivo vandentalpos santykį; laivo stūmų galingumo ir laivo vandentalpos santykį.

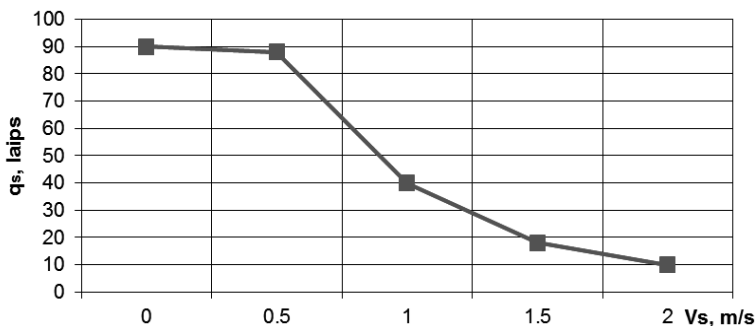
Gauti skaičiavimų ir treniruoklių bandymų rezultatai pateikti 3.23 paveiksle.

Gauti tyrimų rezultatai rodo, kada būtina riboti savarankišką laivų, turinčių stūmas, švartavimą, siekiant laiku įvertinti laivo galimybes ir panaudoti papildomas laivo valdomumą didinančias priemones (vilkikus).

Taigi atliktas pirminis laivų manevrinių galimybių įvertinimas, remiantis skaičiavimo rezultatais ir „Simplex Navigator“ treniruoklio bandymais, leidžia nustatyti ribines laivų galimybes atsižvelgiant į parinktą pirsų kryptį, tai gali būti panaudota tikslinant ir optimizuojant krantinių bei pirsų išdėstymą.

Daugelyje uostų kaip papildomos laivo valdomumo gerinimo priemonės naudojami vilkikai. Skaičiuojant būtiną vilkikų galingumą, kaip analizuotame Klaipėdos uosto pavyzdyje, būtina įvertinti šias pagrindines sąlygas: atsižvelgti į tai, kad laivo sraigto ir vairo komplekso sudaroma jėga, esant vieno sraigto laivui, paliekama kaip papildoma atsarga; dviejų sraigčių laivams kaip šoninė jėga priimama vieno sraigto sukuriamą jėgą; visa pavairavimo įrenginių sukuriamą šoninę jėgą įskaičiuojama į bendrą šoninę jėgą; vilkikų sukuriamą šoninę jėgą, atsižvelgiant į laivo plaukimo greitį, priimama maksimali, t. y. lygi vilkiko traukimo jėgai ant kablo, kai laivas plaukia mažesniu kaip 1 mazgo (0,5 m/s) greičiu, bei priimama lygi nuliui, kai laivo judėjimo vandens atžvilgiu greitis siekia 6 arba daugiau mazgų (3,1 m/s) (vilkikas gali tik būti prie laivo); srovės poveikio kampas imamas nuo 0° iki $\pm 10^{\circ}$, srovės greitis – nuo 0,1 iki 2 mazgų, taikant žingsnį kas 0,1 mazgo; vėjo greitis – nuo 10 m/s iki 20 m/s, vėjo

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametru tyrimai



3.23 pav. Laivų, kurių šoninės jėgos (T) ir laivo vandentalpos santykis sudaro 0,5 %, savarankiško atsišvartavimo galimybė, atsižvelgiant į srovės kampą ir jos greitį, kai šoninio vėjo greitis siekia 15 m/s

Fig. 3.23. Ship's unmmoring possibilities without external assistance depends current velocity and curce angle (wind 15 m/s in perpendicular direction)

poveikio kampas – nuo 0 iki $\pm 90^\circ$, žingsnis kampo atžvilgiu – kas 60° , vėjo greičio atžvilgiu – kas 5 m/s; bangavimas: tik išorinė banga, prasiveržianti pro uosto vartus, skaičiuojama laivams, kurie švartuojasi nuo 1-os iki 6-os krantinių, bangos poveikio kampas sudaro nuo 10° iki 50° , žingsnis – kas 10° , bangos aukštis, atsižvelgiant į krantinės išsidėstymą, imamas nuo 1 iki 2 m, žingsnis – kas 0,2 m.

Taigi, įvertinus nurodytas sąlygas, apskaičiuotos šoninės jėgos, susidaranti švartuojant laivus (tipiniai atvejai), jos gali būti pritaikytos konkrečioms krantinėms. Laivų turimos pavairavimo įrangos traukos jėga gauta kaip bendros vilkikų traukimo jėgos dalis.

Laivų, kuriems apskaičiuotas būtinas vilkikų galingumas, parametrai: POSTPANAMAX laivas: ilgis – 270 m, plotis – 42 m, grimzlė – 13 m, dedveitas esamomis sąlygomis – 90 000 tonų; PANAMAX laivai: tanklaivių / balkerių ilgis – 220/240 m, plotis – 33 m, grimzlė – 12,5 m; HANDYSIZE laivai: tanklaivių / balkerių / generalinių krovinių laivų ilgis – 170/180/185 m, plotis – 26/24/22 m; grimzlė – 10,5 m; kiti vidutiniai laivai: ilgis – 150 m, plotis – 20 m, grimzlė – iki 9,6 m; kiti maži laivai: ilgis – 100 m, plotis – 16 m, grimzlė – 7 m; keltai: ilgis – 200/150 m, plotis – 26/18 m, grimzlė – 8/6,5 m.

Apskaičiuotas būtinas vilkikų galingumas kiekvienu atveju patikrintas treniruokliu „Sim Flex Navigator“ ir palygintas su esamų laivų faktiniais atvejais, švartuojant laivus. Galutiniai rezultatai, suderinus su treniruoklio duomenimis ir faktiniais atvejais, kaip pavyzdys pateikti 3.6 lentelėje.

Išanalizavus, pavyzdžiui, Klaipėdos uosto krantines ir galimus prie jų švartuoti laivus, galima nustatyti būtiną bendrą vilkikų galingumą švartuojant ir atšvartuojant laivus, taip optimizuoti krantinių naudojimą.

3. Laivo manevrinių savybių ir uosto infrastruktūros parametru tyrimai

Skaičiuojant ir vertinant imami šie laivų parametrai: $L = 270$ m, $S_x = 3500$ m², $T = 13,0$ m; $L = 220$ m, $S_x = 2800$ m², $T = 12,5$ m; $L = 180$ m, $S_x = 2000$ m², $T = 10,5$ m; $L = 150$ m, $S_x = 1800$ m², $T = 9,6$ m; $L = 100$ m, $S_x = 1200$ m², $T = 7,0$ m.

Seklumos poveikis vertinamas laivams, kurių grimzlės ir gylis santykis sudaro daugiau nei 0,8, t. y. laivams, kurių ilgis – 270 / 220 / 180 m, taikant koeficientą 2.

Būtina vilkikų traukimo jėga pateikta tonomis, įvertinus sąlygą, kad laivas, laikomas prieš srovę, juda ne didesniu kaip 0,5 m/s greičiu (grunto atžvilgiu) ir kampas su srove, laivui judant atgal, sudaro ne daugiau kaip 10°.

Gautus rezultatus reikėtų vertinti kritiškai: jeigu reikia laivą ne tik prišvartuoti prie krantinės arba atšvartuoti nuo jos, bet ir jį apsukti, būtina turėti ne mažiau kaip 75 % maksimalios vilkikų traukimo jėgos, esant konkrečiam vėjo greičiui. Skaičiavimo rezultatai, kaip pavyzdys, pateikti 3.6 lentelėje.

3.6 lentelė. Būtinasis bendras vilkikų galingumas prie krantinių Nr. 1–2

Table 3.6. Request total tugs bollard pull for the quay walls No. 1–2

v_a	N_a	v_{sr}	N_{sr}	h_b	q_b	270	220	180	150	100
10	0	1,0	305	–	–	–10	–8	–6	–4	–3
	60	1,0	305	–	–	–20	–15	–10	–6	–5
	120	1,0	305	–	–	12	9	8	3	2
	180	1,2	305	–	–	60	48	35	14	10
	240	0,8	305	1,0	260	55	42	29	12	9
	300	0,6	305	1,2	280	20	15	12	5	3
15	0	0,8	305	–	–	–50	–40	–28	–14	–10
	60	1,0	305	–	–	–64	–50	–36	–17	–13
	120	1,2	305	–	–	–24	10	8	18	2
	180	1,4	305	–	–	114	90	66	28	17
	240	–0,5	110	1,2	260	136	106	80	33	21
	300	–0,8	110	1,5	280	86	69	54	20	11
20	0	0,6	305	–	–	–102	–82	–58	–27	–18
	60	1,0	305	–	–	–130	–102	–72	–34	–24
	120	1,4	305	–	–	126	96	82	20	17
	180	1,8	305	–	–	208	163	120	49	31
	240	–0,6	110	1,4	260	225	179	138	56	35
	300	–1,0	110	1,8	280	136	108	86	32	19

Pastaba: vėjo greitis – m/s; vėjo kryptis – laipsniai; srovės greitis – m/s; srovės kryptis – laipsniai; bangos aukštis – m; bangos kampas – laipsniai; laivo ilgis (270, 220,...) – m; apskaičiuotos jėgos ženklas, pavyzdžiui „–10“, reiškia nuo krantinės, tonos.

Taigi tikslus laivų manevrinių savybių apskaičiavimas ir vertinimas planuojant uostų ir vandens kelių plėtrą bei vertinant esamą infrastruktūrą, leidžia priimti optimalius jos parametrus ir užtikrinti navigacinį laivybos saugumą.

Tyrimo rezultatų taikymas plėtojant uostų infrastruktūrą

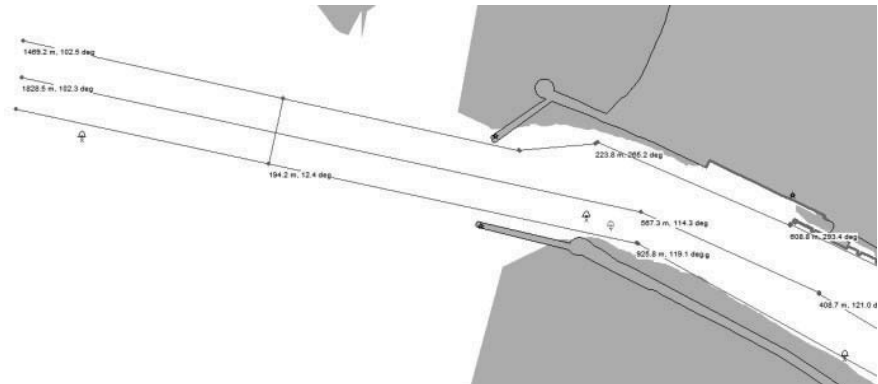
Taikant disertacijoje parengtas metodikas, remiantis teoriniais ir eksperimentiniais tyrimais, vykdyti 5 projektai, kuriuose panaudoti disertacijoje pateikti rezultatai.

Rengiant Klaipėdos uosto navigacinių kanalų gilinimo iki -17 m galimybių studiją (KLTC 2014), ištirtas uosto įplaukos kanalas, siekiant įvertinti laivų valdomumo savybes. Tyrimais nustatyta, kad kanalo ašis turėtų būti pasukta į šiaurę apie 10–12 laipsnių, siekiant minimizuoti navigacinę riziką įplaukiant į uostą ir praplaukiant Naftos terminalo krantines. Atlikta galimų didžiausių į Baltijos jūrą ir Klaipėdos uostą įplaukti laivų manevrinių savybių studija: taikant disertacijoje parengtas metodikas, įvertinti galimi poveikiai plaukiantiems laivams, apskaičiuoti ir minėtoje studijoje pasiūlyti optimalūs uosto įplaukos ir vidinių navigacinių kanalų parametrai. Studija patvirtinta užsakovo ir Klaipėdos uosto plėtros tarybos posėdyje.

Pasiūlytas Klaipėdos uosto šiaurinės dalies infrastruktūros optimizavimo variantas (KLTC 2014), keičiant įplaukos kanalo kryptį iš $92,5^\circ$ į 102° , taip siekiant sumažinti posūkio kampą, praplaukus uosto vartus, nes esamas uosto įplaukos kanalas ir posūkis 23° , praplaukus uosto vartus, neužtikrina pakankamo laivybos saugumo plukdant į uostą planuojamus POSTPANAMAX PLUS (ilgis – iki 365 m) ir MEGA (ilgis – iki 400 m) konteinerių vežimo laivus (4.1 pav.).

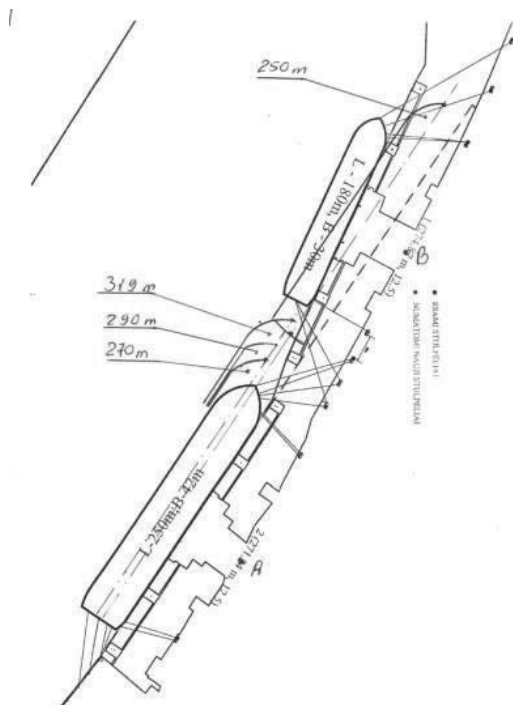
Optimizuojant krantinių Nr. 1–2 išdėstymą (KLTC 2015), siekiant priimti SUECMAX tipo naftos ir SGD Q-Flex tanklaivius, kartu saugiai praplukdyti didžiau-

4. Tyrimo rezultatų taikymas plėtojant uostų infrastruktūrą



4.1 pav. Klaipėdos uosto įplaukos kanalo optimizavimas
(vidurinė linija pažymėta esamo kanalo ašinė linija)

Fig. 4.1. Klaipėda port approach channels optimization



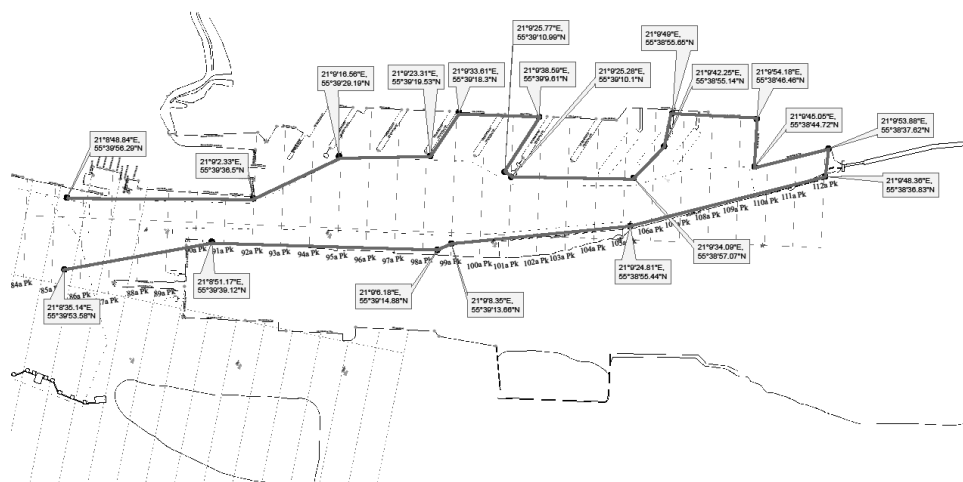
4.2 pav. Pasiūlytas krantinių Nr. 1–2 variantas (punktyrinė linija)

Fig. 4.2. Quay walls No. 1 and No. 2 suggested option

4. Tyrimo rezultatų taikymas plėtojant uostų infrastruktūrą

sius galimus laivus (MEGA konteinervežius) į uostą ir iš jo, įvertinant jų manevrines galimybes, kartu su nustatyta uosto įplaukos kanalo nauja kryptimi pasiūlytas kitas krantinių Nr. 1–2 išdėstymas (4.2 pav.).

Siekiant didinti Klaipėdos uosto pietinės dalies (Malkų įlanka) (KLTC 2013) technines ir technologines galimybes, ištyrus esamą situaciją (3 skyrius) ir įvertinus laivo jam judant šonu pasipriešinimo padidėjimą, esant mažam gyliui (2.4 poskyris), pateikti pasiūlymai praplėsti įplaukos į Malkų įlanką kanalą bei laivų apsisukimo baseiną, kad būtų galima į Malkų įlanką plukdyti laivus, kurių ilgis – iki 320 m (4.3 pav.).



4.3 pav. Nauja Malkų įlankos įplaukos kanalo ir vidinės akvatorijos schema (brūkšninės linijos – esamo įplaukos kanalo ribos)

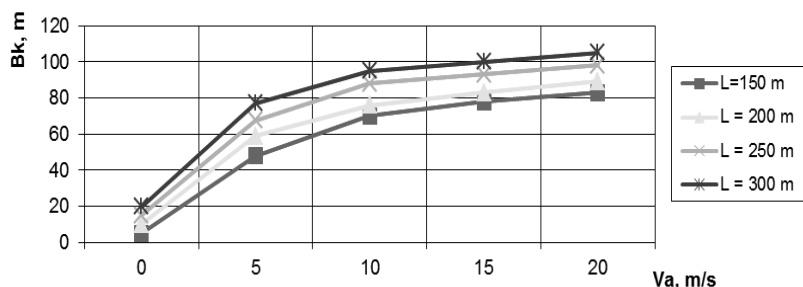
Fig. 4.3. Malku buy entrance channel and inside water area

Rengiant Klaipėdos SGD terminalo navigacinę studiją, vertinant laivų manevrines savybes, taikyta disertacijos autoriaus sukurta laivybos kanalų parametrų skaičiavimo metodika. Taikant minėtą metodiką įrodyta, kad Klaipėdos uosto sąlygomis standartiniams (talpa – apie 150 000 m³, laivo ilgis – apie 290 m) ir Q-Flex (talpa – apie 220 000 m³, ilgis – apie 315 m) SGD tanklaiviams pakankamas uosto įplaukos ir vidinių navigacinių kanalų plotis yra 150 m (KLTC 2012). Užsienio ekspertų siūlytas įplaukos kanalo plotis neįvertino seklumos poveikio šoniniam laivo pasipriešinimui, todėl jų pasiūlytas uosto įplaukos kanalo plotis – 300 m (šiuo metu esamas kanalų plotis – 150 m) nebuvo optimalus. Iki šio laikotarpio į uostą įplukdyta ir iš jo išplukdyta daugiau kaip 60 tipinių SGD tanklaivių (ilgis – apie 290 m), dalis jų įplukdyta į uostą

4. Tyrimo rezultatų taikymas plėtojant uostų infrastruktūrą

esant ribinėms sąlygoms. Nurodytų laivų plukdymas į uostą patvirtino disertacijos autoriaus tyrimo rezultatų teisingumą. SGD terminalo navigacinė studija patvirtinta užsakovo, Europos Komisijos ir Europos investicijų banko. Standartiniai SGD tanklaiviai jau daugiau kaip treji metai periodiškai plaukia į Klaipėdos uostą.

Be to, į Klaipėdos uostą įplukdyti didžiausi iki šiol laivai – POSTPANAMAX ir POSTPANAMAX PLUS konteinerių vežimo laivai, kurių ilgis – 337 m, plotis – 48 m, ilgis – 365 m, plotis – 50 m.



4.4 pav. Būtinai minimalus navigacinio kanalo plotis skirtingo ilgio laivams, atsižvelgiant į šoninio vėjo greitį, kai T/H – apie 0,8

Fig. 4.4. Request minimal navigational channel width for different ships length, depends of the transveal wind on shallow waters (T/H about 0,8)



4.5 pav. Vienas didžiausių iki šiol į Klaipėdos uostą įplukdytų laivų – POSTPANAMAX PLUS laivas „MSC ASTA“, kurio ilgis – 337 m (2017)

Fig. 4.5. One of the biggest ship entry until now in Klaipeda port: POSTPANAMAX PLUS container vessel “MSC ASTA”, length 337 m (2017)

4. Tyrimo rezultatų taikymas plėtojant uostų infrastruktūrą



4.6 pav. Didžiausias iki šiol į Klaipėdos uostą įplukdytas laivas – MEGA konteinernevežis „MSC INGY“, kurio ilgis – 400 m, plotis – 59 m (2018-12-19)

Fig. 4.6. The biggest ship entry until now in Klaipėda port: MEGA container vessel “MSC INGY”, length 400 m, width 59 m (2018-12-19)

Nurodytų laivų plukdymas į Klaipėdos uostą patvirtino, kad disertacijos autoriaus atlikto tyrimo rezultatai ir jų pritaikymas realiuose Klaipėdos ir kitų uostų infrastruktūros plėtros bei esamos infrastruktūros panaudojimo projektuose, tiksliai įvertinus laivų manevrines savybes, leidžia optimizuoti investicijas į uosto infrastruktūrą. Disertacijos autoriaus atliktų mokslinių tyrimų rezultatų pagrindu iširtos esamos Klaipėdos uosto infrastruktūros galimybės galimų didžiausių laivų parametrų atžvilgiu leido padidinti į uostą įplaukiančių laivų parametrus maksimaliai išnaudojus esamą uosto infrastruktūrą ir kryptingai suplanavus jos plėtrą.

Pastaruoju metu disertacijos autoriaus atliktų mokslinių tyrimų pagrindu parengta studija laivų, kurių ilgis – iki 400 m, plotis – iki 59 m (MEGA konteinerių vežimo laivai – G klasė), įplaukimo į Klaipėdos uostą galimybės (KLTC 2018). Studija patvirtinta užsakovo (LKAB „Klaipėdos Smeltė“), Klaipėdos valstybinio jūrų uosto kapitono bei MSC (angl. *Midtranean Shipping Company*) bendrovės ir 2018-12-19 į Klaipėdos uostą įplukdytas nurodytų parametrų laivas.

Bendrosios išvados

1. Laivo manevravimo uosto prieigose ir akvatorijoje vertinimo metodika papildyta seklumos ir laivo, kaip „sparno“, įtakos jėgomis bei momentais. Vertinimo metodika apima pagrindines jėgas ir momentus, kurie veikia laivą jam manevruojant uosto sąlygomis. Šių elementų įvertinimas užtikrina didesnę laivybos saugumą.
2. Atlikus uosto infrastruktūros elementų palyginamąją analizę, nustatyti svarbiausi parametrai, į kuriuos būtina atsižvelgti, planuojant uostų plėtrą:
 - laivybos kanalai (atsižvelgiant į laivo ilgį, plotį, grimzlę);
 - laivų apsisukimo baseinai (atsižvelgiant į laivo ilgį);
 - prieigos prie krantinių (atsižvelgiant į laivo grimzlę, propulsinių kompleksų savybes).
3. Taikant pakoreguotą matematinį modelį, apskaičiuoti laivo manevriniai parametrai. Konkrečioms sąlygoms apskaičiuotas laivo „Optima Seaways“ apsisukimo trajektorijos skersmuo – 1020 m (eksperimentinis – 1050 m), stabdymo kelias – 1200 m (eksperimentinis – 1250 m). Atliktų skaičiavimų ir faktinių matavimo rezultatų paklaida – 1,3–4 %, tai atitinka SOLAS 74 konvencijos leidžiamų paklaidų (+/-10 %) ribas.
4. Remiantis analitinių, skaitinio modeliavimo ir realių eksperimentinių tyrimų rezultatais, paliekant esamus Klaipėdos uosto infrastruktūros parametrus, į Klaipėdos uostą plukdomų laivų parametrai padidinti iki 25 %, t. y. laivo ilgis – iki 400 m, plotis – iki 59 m.

5. Palyginamosios analizės metodais ištirti Klaipėdos, Gdansko, Gdynės, Ventspilio ir Gento uostų kanalų, laivų apsisukimo baseinų parametrai leidžia tiksliau įvertinti Klaipėdos uosto infrastruktūros galimybes priimti didžiausius į Baltijos jūrą galinčius įplaukti laivus (ilgis – iki 400 m, plotis – iki 60 m).
6. Disertacijos autoriaus atliktų mokslinių tyrimų rezultatai pritaikyti atliekant Klaipėdos uosto plėtros iki galimo maksimalaus gylio (iki 17 m), krantinių Nr. 1 ir Nr. 2 optimalaus išdėstymo, pritaikant jas galimiems didžiausiems laivams (SUECMAX tipo), galimybių studiją, rengiant SGD terminalo navigacinę studiją (standartiniams ir Q-Flex tipo SGD tanklaiviams), pietinės Klaipėdos uosto dalies optimalaus naudojimo ir kitas studijas.

Literatūra

- [ABS] American Bureau of Shipping. 2006. *Guide for vessel maneuverability*. Houston, TX 77060 USA, 124 p.
- [PM] Paris Memorandum. (2014). Port State Control Annual report. Paris, 64 p.
- „Dockmaster 3“. 2012. *Lazerinė navigacinė sistema (LNS)*. Marimatech, Denmark, 130 p.
- Adamko, N.; Kavička, A.; Klima, V. 2005. Towards versatile simulation models of transport nodes. *Komunikacie / communications: scientific letters of the University of Ziklina*, p. 49–53.
- AIS. 2018. *Automatinė laivų identifikavimo sistema*. Prieiga internete: www.marinetraffic.com/ais
- AIS-LERS. 2018. *Automatinė laivų identifikavimo sistema integruota su laivų eismo reguliavimo sistema*. KVJUD.
- Alapetite, A.; Kozine, I. 2017. Safe manning of merchant ships: an approach and computer tool. *Maritime policy and management*, Vol. 44 (3), p. 323–335.
- Alexandridis, G.; Sahoo, S.; Dong-Wook, S.; Visvikis, I. 2018. Shipping risk management practice revisited: A new portfolio approach. *Transportation Research*. Part A, Vol. 110, p. 274–290.
- Barsan, E. 2006. Bridge and engine room teams cooperation, in loss of remote control scenarios. *Proceedings of International Navigation Simulator Lecturers Conference*, p. 102–121.
- Baublys, A. 2001. Kelių transporto sąveikos su uostu efektyvumo analizės modelis. *Transportas*, Nr. 1, T. 16, p. 8–10. Vilnius: Technika.

- Baublys, A. 2007. Probability models for assessing transport terminal operation. *Transport*, Vol. 22(1), p. 3–8.
- Bogdan, S.; Lewis, F. L. 1997. Matrix approach to deadlock avoidance of dispatching in multi-class finite buffer reentrant flow lines. *P IEEE Proceedings of the International Symposium of Intelligent control*, p. 397–402.
- Breivik, M.; Fossen, T. I. 2004. Path following of straight lines and circles for marine surface vessels. *Proceedings FAC Conference of Control Applend Marine Systems*. IFAC, Ancona, Italy, p. 84–95.
- Brotcorne, L.; Lalbe, M.; Savard, G. A. 2000. Bilevel Model and Solution Algorithm for a Freight Tariff – Setting Problem. *Transportation Science*, Vol. 34, p. 289–302.
- Browne, M. 2014. Moving Freight. *Transport Reviews*, Vol. 34, Issue 3, p. 273–275.
- BS 6349: 2000. 2003. *British Standard Maritime Structures. Part 1: Code of Practice for General Criteria*. British Standard Institution.
- BS 6349: 2000. 2004. *British Standard Maritime Structures. Part 4: Code of practice for design of fendering and mooring systems*. British Standard Institution.
- Būtingės giliavandenio uosto navigacinė studija. 2012. KLTC. Būtingė, 150 p.
- Cakmak, T.; Ersoz F. 2007. Methodology recommendation for one-criterion transportation problems: Cakmak method. *Transport*, Vol. 22, No. 3, p. 221–224. Vilnius: Technika.
- Cascetta, E.; Postorino, M. N. 2001. Fixed Point Approaches to the Estimation of O/D Matrices Using Traffic Counts on Congested Networks. *Transportation Science*, Vol. 35, No. 2, p. 134–147.
- Casey, R., et. al. 2000. *Advanced Public Transportation Systems: The State of the Art: Update 2000*. Washington, DC: U.S. Department of Transportation, Federal Transit Administration.
- Chaug-Ing, H.; Yu-Ping, H. 2007. Routing, ship size and sailing frequency decision-making for a maritime hub-and-spoke container network. *Mathematical and Computer Modeling*, Vol. 45(4), p. 899–916.
- Chowdhury, M.; Sadek, A. 2003. *Fundamentals of Intelligent Transportation Systems Planning*. Boston, MA: Artech House.
- Chun-Ki, Leel; Sam-Goo, Lee. 2008. Investigation of ship maneuvering with hydrodynamic effects between ship and bank. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 22, p. 1230–1236.
- Courtney, S.; Smith, C. 2013. Or vast fiery cross, on the banner of morn’: reading the Royal Mail Steam Packet Company’s shipwrecks. *Journal of maritime research*, Vol. 15(2), p. 183–203.
- Demirci, E. 2003. Simulation Modelling and Analysis of a Port Investment. *Simulation*, Vol. 79 (2), p. 94–105.
- Depellegrina, D. 2016. Assessing cumulative visual impacts in coastal areas of the Baltic Sea. *Ocean and Costal management*, Vol. 119, p. 184–198.

- Desaulniers, G.; Villeneuve, D. 2000. The Shortest Path Problem with Time Windows and Linear Waiting Costs. *Transportation Science*, Vol. 34, No. 3, p. 312–319.
- DFDS. 2014. *DFDS kompanijos laivų žurnalai ir kapitonų ataskaitos. 2000–2014*.
- EAU 2012. 2012. *Recommendations of the Committee for Waterfront Structures – Harbours and Waterways*. Ernst & Sohn, 620 p.
- Eyre, J. L. 2006. *The containerships of 1999*. Maritime Policy & Management, p. 133–145.
- Erol, S.; Başar, E. 2015. The analysis of ship accident occurred in Turkish search and rescue area by using decision tree. *Maritime policy and management*, Vol. 42 (4), p. 377–388.
- E-Sea Fix navigation system*. 2012. Marimatech, Denmark, 120 p.
- Fagerholt, K. 1999. Optimal fleet design in a ship routing problem. *International Transactions in Operational Research*, Vol. 6(5), p. 453–464.
- Fang, M. C.; Luo, J. H.; Lee, M. L. 2005. A Nonlinear Mathematical Model for Ship Turning Circle Simulation in Waves. *Journal of Ship Research*, Vol. 49(2), p. 69–79.
- Fossen, T. I.; Smogeli, Ø. N. 2004. Nonlinear time-domain strip theory formulation for low-speed maneuvering and station-keeping. *Modeling, Identification and Control*, Vol. 25(4), p. 201–221.
- Gailiušis B. 2001. *Lietuvos upės*. Kaunas, LEI, 792 p.
- García-Menéndez, L.; Feo-Valero, M. 2009. European Common Transport Policy and Short-Sea Shipping: Empirical Evidence Based on Modal Choice Models. *Transport Reviews*, Vol. 29, Issue 2, p. 239–295.
- Gong Dong et al. 2018. The effects of regional port interaction: The case of Ningbo-Zhoushar port. *Transport Research, Part E*, Vol. 120, p. 1–15.
- Grech, M. R.; Horberry, T. J.; Koester, T. 2008. *Human factors in the Maritime Domain*. London: CRC Press Taylor & Francis Group, 198 p.
- Gross, U. 2000. A hub and spoke system for the Baltic ports. *Third international conference*, p. 61–70.
- Gucma, L.; Gućma, M.; Perkovic, M.; Vidmar, P. 2012. Simulation methods for risk assessment in LNG terminal design. In: Rizzuto, Soares, Guedes (eds.). *Sustainable Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources*. London: Taylor & Francis Group, UK, p. 755–761.
- Gucma, L.; Montewka, J. 2005. Landborne laser rangefinder measurements for navigation safety assessment. *European Journal of Navigation*, Vol. 3(4), p. 1–6.
- Gucma, S.; Slaczko, W. 2018. Comprehensive method of formal safety assessment of ship manoeuvring in waterways. *Scientific Journals of MUS*, Vol. 54 (126), p. 110–119.
- Gung-Rong, Ch.; Ming-Chung, F. 2001. Hydrodynamic interactions between two ships advancing in waves. *Ocean Engineering*, Vol. 28, p. 1053–1078.
- Hackman, F. 2000. General developments in the Baltic Sea region. *The Third international conference*, p. 19–24.
- Hassel, M.; Asbjørnslett, B. E.; Hole, L. P. 2011. Underreporting of maritime accidents

- to vessel accidents databases. *Accidents Analysis Prevue*, Vol. 43, p. 2053–2063.
- Hee, D. D.; Pickrell, B. D.; Bea, R. G.; Roberts, K. H.; Williamson, R. B. 1999. Safety Management Assessment System (SMAS): a process for identifying and evaluating human and organization factors in marine system operations with field test results. *Reliability Engineering and Safety System*, Vol. 65, p. 125–140.
- Hensen, H. 1999. *Ship bridge simulators: A project handbook*. Nautical Institute, 305 p.
- Hickman, D.; Bernstein, D. 1997. Transit Service and Path Choice Models in Stochastic and Time – Dependent Networks. *Transportation Science*, Vol. 31, p. 129–146.
- Hickman, M. D. 2001. An analytic stochastic model for the transit vehicle. *Transportation Science*, Vol. 35(3), p. 215–237.
- Hoorn, S. V.; Knapp, S. 2016. A multi-layered risk exposure assessment approach for the shipping industry. *Transportation Research*, Part A, Vol. 78, p. 21–33.
- Yang, H.; Wong, S. C. 2000. A Continuous Equilibrium Model for Estimating Market Areas of Competitive Facilities with Elastic Demand and Market Externality. *Transportation Science*, Vol. 34, p. 216–227.
- Yang, Z.; Adolf, K. Y.; Wang, N. J. 2014. A new risk quantification approach in port facility security assessment. *Transportation Research*, Part A. Vol. 59, p. 72–90.
- Imai, Akio; Koichi, Shintani; Stratos, Papadimitriou. 2009. Multi-port vs. hub-and-spoke port calls by containerships. *Transportation Research*, Part E. Doi:10.1016/j.tre.2009.01.002.
- IMO. 1972; 2002. *International Maritime Organization. COLREG: Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea 1972, as amended, 2002*. London, 120 p.
- IMO. 2002. *Standards for Ship Maneuverability*. London, 85 p.
- Irannezhad, E., Prato, C. G., Hickman, M. 2018. The effect of cooperation among shipping lines on transport costs and pollutant emissions. *Transportation Research*, Part D, Vol. 65, p. 312–323.
- Jarašiūnienė, A. 2008. *Intelektualiosios transporto sistemas*. Vilnius: Technika, 140 p.
- Judith, A.; Williamsa, A.; Thomasa, T. 2017. Reactions of harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) to vessel traffic in the coastal waters of South West Wales, UK. *Ocean and Coastal management*, Vol. 138, p. 158–169.
- Junevičius, R.; Bogdevičius, M. 2009. Mathematical modelling of network traffic flow. *Transport*, Vol. 24, No. 4, p. 333–338. Vilnius: Technika.
- Kisialiou, Y., Gribkovskaia, I., Laporte, G. 2018. Robust supply vessel routing and scheduling. *Transportation Research*, Part C, p. 366–378.
- Klaipėdos uosto jūrlapiai*. (2015). Klaipėda.
- Klaipėdos valstybinio jūrų uosto ataskaitos už 1995–2017 metus*. 2017. KVJUD.
- Klaipėdos valstybinio jūrų uosto laivybos taisyklės*. (2014), KVJUD, 24 p.
- Kriauciūnienė, J., Žilinskas, G., Pupienis, D., Jarmalavičius, D., Gailiusis, B. 2013. Impact of Šventoji port jetties on coastal dynamics of the Baltic sea. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, Vol. 21, No. 2, p. 114–122.

- Köse, E., Başar, E., Demirci, E., Güneroğlu, A., Erkebay, Ş. 2003. Simulation of Marine Traffic in Istanbul Strait. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol. 11(7–8), p. 597–608.
- Kuancheng, H.; Suprayogi, A. 2016. A continuous berth template design model with multiple wharfs. *Maritime policy and management*, Vol. 43(6), p. 763–775.
- Kutz, M. 2004. *Handbook of Transportation Engineering*. New York: McGraw-Hill, 560 p.
- KVJUD krantinių Nr: 1, 2 rekonstrukcijos projekto navigacinė studija. 2015. KLTC, 125 p.
- Laivų, kurių ilgis iki 400 m, plaukimo į LKAB „Klaipėdos Smeltė“ tyrimai. (2018). Studija. KLTC.
- Lataire, E.; Vantorre, M. 2017. Hydrodynamic Interaction Between Ships and Restricted Waterways. *International journal of maritime engineering*, Vol. 151. DOI No: 10.3940/rina.ijme.2017.a1.391.
- Laulajainen, R.; Johansson, J. 2006. Worldscale: what does it actually measure? *Maritime Policy & Management*, Vol. 33, Issue 5, p. 477–495.
- Lazerinė navigacinė sistema. (2012). KVJUD. LNS.
- Lisowski, J. 2015. Sensitivity of the game control of ship in collision situations. *Polish maritime research*, Vol. 22, No. 4(88), p. 27–34.
- Lo, H. K. 2001. A Cell-Based Traffic Control Formulation: Strategies and Benefits of Dynamic Timing Plans. *Transportation Science*, Vol. 35, No. 2, p. 148–164.
- Luščič, Z. et. al. 2014. Standartization of floating courses and selecting turning points in maritime navigation. *Promet*, Vol. 28(4), p. 313–322.
- Maksimavičius, R.; Jonkus, M. 2001. Krovinių ir laivų apdorojimo efektyvumo didinimas ro-ro terminaluose. Mokslinių pranešimų rinkinys. *Konferencija „Transporto priemonės – 2001“*. Kaunas: Technologija, p. 146–152.
- ManWo Ng. 2018. Fleet development in liner shipping with incomplete demand information. *Transport Research, Part E*, Vol. 116, p. 184–189.
- Miller-Hooks, E. D., Mahmassani, H. S. 2000. Least Expected Time Paths in Stochastic, Mime-Varying Transportation Networks. *Transportation Science*, Vol. 34, p. 198–215.
- Open sea map. 2018. OpenSM.
- OPTIMOOR. 2010. Ship’s mooring simulator OPTIMOOR. London, 130 p.
- Ortuzar, J.; Willumsen, G. 2004. *Modelling Transport*. Third edition. John Wiley and Sons inc., Hoboken, USA, 540 p.
- Paryžiaus memorandumų taisyklės. 2014. 45 p.
- Paulauskas V. et al. 2018. Ships mooring to jetties under crosscurrent. *Transport 2018*, Vol. 33, No. 2, p. 454–460.
- Paulauskas, D. 2006. Ships Draught Variation in Port channels, Basins and Clearance Calculation Possibilities. *Transport means – 2006*. Kaunas: Technologija, p. 260–262.
- Paulauskas, D. 2013. Port Entrance Channel Optimisation in Klaipėda port. *Transport Means – 2013*. Kaunas: Technologija, p. 114–117.

- Paulauskas, V. 1989. Keltų Klaipėda–Mukranas praplaukimo galimybė Klaipėdos uosto kanalu. *Santehnika ir hidraulika*, Nr. 16, p. 30–34. Vilnius: Mokslas.
- Paulauskas, V. 1994. *Laivo valdymas*. Monografija. Klaipėda: KU leidykla, 164 p.
- Paulauskas, V. 1999. *Laivo valdymas ypatingomis sąlygomis*. Monografija. Klaipėda: KU leidykla, 170 p.
- Paulauskas, V. 2000A. *Laivyba naujomis sąlygomis*. Monografija. Klaipėda: KU leidykla, 239 p.
- Paulauskas, V. 2000B. *Uostų plėtra*. Monografija. Klaipėda: KU leidykla, 286 p.
- Paulauskas, V. 2011. *Optimalus uostas*. Monografija. Klaipėda: KU leidykla, 320 p.
- Paulauskas, V., Paulauskas, D. 2010. Ships entry in to floating docks. *Transport Means – 2010*. Kaunas: Technologija, p. 29–32.
- Paulauskas, V.; Maksimavičius, R.; Miltakytė, M. (2000). Ship’s navigational safety in new conditions. Mokslinių pranešimų rinkinys. *Konferencija „Transporto priemonės – 2000“*. Kaunas: Technologija, p. 201–205.
- Paulauskas, V.; Paulauskas, D. 2009. *Laivo valdymas uoste*. Monografija. Klaipėda: KU leidykla, 256 p.
- Paulauskas, V.; Paulauskas, D.; Wijffels, J. 2008. Ships mooring in Complicated Conditions and possible solutions. *Transport Means – 2008*. Kaunas: Technologija, p. 67–70.
- Paulauskas, V. 2006. Navigational risk assessment of ships. *Transport 2006*, Vol. 21, No. 1, p. 12–18.
- Peckham, R. 2001. Dry Bulk Terminals Drive for Ship/Shore Safety Enhancements. *Port Technology International*. Fourteenth Edition, DBTG Secretariat, Burgess Hill, UK, p. 65–67.
- Petraška, A.; Čižiūnienė, K.; Jarašūnienė, A.; Maruschak, P.; Prentkovskis O. 2017. Algorithm for the assessment of HeavyWeight and Oversize cargo transportation routes. *Journal of business economics and management*, Vol. 18, Issue 6, p. 1098–1114. Vilnius, London: Technika; Taylor & Francis.
- PIANC. 1995. *Criteria for Movements of Moored Vessels in Harbours*, 68 p.
- PIANC. 2002. *Guidelines for the Design of Fender Systems*, 84 p.
- PIANC. 2005. *Approach channels. A Guide for design*, 58 p.
- PIANC. 2010. *2010 metų konferencijos Liverpulyje medžiaga* (328 pranešimai).
- PIANC. 2011. *Recommendations on Maritime-Port and Terminal Development*, 112 p.
- Plačienė, B. et. al. 2007. Mathematical modeling of EU short sea shipping. *Transport Means – 2007*. Kaunas: Technologia, p. 58–62.
- Podvezko, V.; Sivilevičius, H. 2013. The use of AHP and rank correlation methods for determining the significance of the interaction between the elements of a transport system having a strong influence on traffic safety. *Transport*, Vol. 28, No. 4, p. 389–403. Vilnius: Technika.
- Port of Antwerp Handbook*. 2014. Belgium: Antwerp publish house, 120 p.
- Port of Hamburg Handbook*. 2014. Hamburg, 110 p.

- Port of Ilyciiovsk handbook*. 2014. Ilyciiovsk, 60 p.
- Port of Tallinn handbook*. 2014. Tallinn, 86 p.
- Port of Ventspils*. 2014. Latvija, 45 p.
- Przywarty, M.; Gucma, L.; Marcjan, K.; Bąk, A. 2015. Risk analysis of collision between passenger ferry and chemical tanker in the western zone of the Baltic Sea. *Polish maritime research*, Vol. 22, No. 2(86), p. 3–8.
- Rahja, K. 2000. The seaports of the Baltic region. Development opportunities and perspectives. *Third international conference*, p. 59–60.
- SGD. 2010. *Klaipėdos suskystintų gamtinių dujų terminalo navigacinio saugumo studija*. KLTC, 180 p.
- Shiau, J. S.; Merifield, R. S.; Lyamin, A. V.; Sloan, S. W. 2011. Undrained stability of footings on slopes, ASCE, *International Journal of Geomechanics* Vol. 11(5), p. 381–390.
- Prieiga internete: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000092](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000092).
- SimFlex 4*. 2016. Denmark: Force Technology, 88 p.
- SimFlex Navigator Simulator*. 2012. Denmark: Force Technology, 120 p.
- Skjetne, R. 2003. Ship maneuvering: The past, the present and the future. *Sea Technology*, Vol. 44(3), p. 33–37.
- Skjetne, R. 2005. *The Maneuvering Problem*. Norwegian University of Science and Technology publish house, 259 p.
- Skjetne, R.; Fossen, T. I.; Kokotovic, P. V. 2005. Adaptive output maneuvering, with experiments, for a model ship in a marine control laboratory. *Automatica*, Vol. 41(2), p. 289–298.
- Skjetne, R.; Smogeli, Ø. N.; Fossen, T. I. 2004. A nonlinear ship maneuvering model: Identification and adaptive control with experiments for a model ship. *Modeling, Identification and Control*, Vol. 25(1), p. 3–27.
- SOLAS 74 Convention*. 1974. London: IMO, 350 p.
- Somanathan, S.; Flynn, P.; Szymanski, J. 2009. The Northwest Passage: A simulation, *Transportation Research, Part A*, Vol. 43(2), p. 127–135.
- Starikov M. et al. 2018. The influence of a quay crane transportation on its future exploitation. *Transport*, Vol. 33, No. 2, p. 536–542.
- Strem, K. 2004. *Ship's handling. Denmark*. FORCE Technology, 130 p.
- Suárez-Alemán, A.; Hernández, A. 2014. Incentives to reduce port inefficiency: a theoretical approach. *Maritime Policy & Management*, Vol. 41, Issue 5, p. 462–479.
- Suárez-Alemán, A.; Trujillo, L.; Medda, F. 2015. Short sea shipping as intermodal competitor: a theoretical analysis of European transport policies. *Maritime Policy & Management*, Vol. 42, Issue 4, p. 317–334.
- Tabaczek, T.; Kulczyk, J. 2016. Heeling moment acting on a river cruiser in manoeuvring motion. *Polish maritime research*, Vol. 23, No. 1(89), p. 45–51.

- Tan, Z.; Meng, Q.; Wang, F.; Kuang, H. 2018. Strategic integration of the inland port and shipping service for the ocean carrier. *Transportation Research*, Part E, Vol. 110, p. 90–109.
- Theirs, G. F.; Jansses, G. K. 1998. A Port Simulation Model as a Performance Decision Instrument. *Simulation*, Vol. 71(1), p. 117–125.
- Thomas, B. S.; Sclavounos, P. D. 2005. *Optimal Control Theory Applied to Ship Maneuvering in Restricted Waters*. Massachusetts Institute of Technology, 16 p.
- Tomczak, A. 2008. Safety evaluation of ship's maneuvers carried out on the basis of integrated navigation systems (INS) indications. *Journal of Konbin*, Vol. 4(1), p. 247–266.
- Tuljak-Suban, D. 2018. Competition or cooperation in a hub and Spoke-Shipping Network, the case of the North Adriatic container terminal. *Transport*, Vol. 33, No. 2, p. 429–436.
- Van Hassel, E.; Meersman, H.; Van de Voorde, E.; Vanelslander, T. 2016. Impact of scale increase of container ships on the generalised chain cost. *Maritime policy and management*, Vol. 43(2), p. 192–208.
- Vitič-Četkovič, A. et. al. 2014. E- services and positioning of passenger ports in the context of cruise tourism promotion. *Promet*, Vol. 28(1), p. 83–93.
- Wang, K.; Yan, X.; Yuan, Y.; Feng, Li. 2016. Real-time optimization of ship energy efficiency based on the prediction technology of working condition. *Transportation Research*, Part D, Vol. 46, p. 81–93.
- Wei Yim Yap; Jasmine, S. L. Lam. 2004. An interpretation of inter-container port relationships from the demand perspective. *Maritime Policy & Management*, p. 337–355.
- Wei Zhang; Jasmine, S. L. Lam. 2017. An empirical analysis of maritime cluster evolution from the port development perspective – Cases of London and Hong Kong. *Transportation Research*, Part A, Vol. 105, p. 219–232.
- World Sea maps*. 2016. London. Open Sea maps.
- Zalewski, P.; Montewka, J. 2007. Navigation safety assessment in an entrance channel, based on real experiments. *Proceedings of the 12th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean (IMAM 2007)*. Varna, Bulgaria, p. 1113–1120.
- Zhijia, Tan; Qiang, Meng; Fan, Wang; Hai-bo, Kuang. 2018. Strategic integration of the inland port and shipping services for the ocean carrier. *Transport Research*, Part E, Vol. 110, p. 90–109.
- Zhongzhen, Yang; Haiping, Shi; Kang, Chen; Hongli, Bao. 2014. Optimization of container liner network on the Yangtze River. *Maritime Policy & Management*, Vol. 41, Issue 1, p. 26–38.
- Басин, А. 1963. Теория расчета гребных винтов. М. Судостроение, 360 с.
- Войткунский, Я. И. и др. (1985). *Справочник по теории кораблю*, Том 3. Ленинград: Судостроение, 540 с.

Disertacinio darbo aprobavimas mokslo leidiniuose

Monografijos

1. Paulauskas D., Paulauskas V. 2009. Laivo valdymas uoste: monografija / Klaipėdos universitetas. Klaipėda, Klaipėdos universiteto leidykla, 256 p. ISBN: 978-995518-390-7.

Straipsniai, išspausdinti periodiniuose leidiniuose, kurie įtraukti į Mokslinės informacijos instituto pagrindinių žurnalų sąrašą (ISI)

1. Paulauskas V., Paulauskas D. 2011. Research on work methods for tugs in ports // *Transport/*, Vol. 26(3), p. 310–314 [ISI Master Journal list] (IF = 0).
2. Paulauskas V., Paulauskas D. 2013. Evaluating the width of navigational channels // *Transport/*, Vol. 28(2), p. 166–174 [ISI Master Journal list]. (IF = 0,529).
3. Paulauskas V., Paulauskas D., Maksimavicius R., Jonkus M. 2014. Hydrodynamic interactions between ships in narrow channels // *Transport/*, Vol. 29(2), p. 212–216 [ISI Master Journal list]. (IF = 0,553).
4. Paulauskas V., Paulauskas D., Placiene B., Lukauskas V. 2016. Optimize width of navigational channels and ships turning basins in ports // *Transport/*, Vol. 31(1), p. 70–75. [ISI Master Journal list]. (IF = 0,553).

5. Paulauskas V., Paulauskas D., Placiene B., Barzdziukas R. 2017. Quay wall stability and strength evaluation. // *Mechanika*, Vol. 23 (2), p. 298–304. Kaunas Technological University. ISSN: 1392-1207. (IF = 0,25).
6. Paulauskas V., Paulauskas D., Placiene B., Barzdziukas R. 2017. Safety of ships mooring to quay walls. // *Safety of sea transportation*, p. 55–60. Taylor and Francis. ISBN: 978-8-138-29768-5 (IF = 0).
7. Paulauskas D., Paulauskas V., Placiene B., Barzdziukas R. 2017. Quay wall stability and strength evaluation. // *Mechanika*, Vol. 23(2), p. 298–304. [ISI Master Journal list]. (IF = 0,232).
8. Paulauskas V., Paulauskas D., Placiene B., Barzdziukas R. 2018. Ships mooring to jetties under crosscurrent. // *Transport*, Vol. 33(2), p. 454–460. ISSN 1648-414. DOI:10.3846/16484142.2017.1354069. (IF = 1,25).

Straipsniai, išspausdinti periodiniuose leidiniuose, kurie įtraukti į Mokslinės informacijos instituto (ISI) duomenų bazėse referuojamus leidinius [ISI Proceedings]

1. Paulauskas V., Paulauskas D. 2004. New navigational systems in ports, analysis. // *Transport means – 2004*, p. 61–64. Kaunas: Technologija, ISBN: 9955-09-753-3 [ISI Proceedings].
2. Paulauskas D. 2006. Ships Draught Variation in Port channels, Basins and Clearance Calculation Possibilities. // *Transport means – 2006*, p. 260–262. Kaunas: Technologija. ISSN: 1822-296X [ISI Proceedings].
3. Paulauskas V., Paulauskas D. 2010. Ship's entry in to floating docks. *Transport Means – 2010*, p. 29–32. Kaunas: Technologija. ISSN: 1822-296X [ISI Proceedings].
4. Paulauskas V., Placiene B., Barzdziukas R., Maniachin A., Kaulitzky A., Lukauskas V., Paulauskas D. 2011. Crossing of Water Barriers in Oversize Cargo transportation. // *Transport Means – 2011*, p. 266–269. Kaunas: Technologija. ISSN: 1822-296X [ISI Proceedings].
5. Paulauskas V., Paulauskas D. 2012. Heavy cargo transportation by Ro-Ro ships. // *Transport Means – 2012*, p. 207–210. Kaunas: Technologija. ISSN: 1822-296X [ISI Proceedings].
6. Paulauskas V., Lukauskas V., Placiene B., Barzdziukas R., Paulauskas D., Kaulitzky A., Maksimavicius R., Jonkus M. 2012. Oversize cargo transportation. // *Transport Means – 2012*, p. 232–236. Kaunas: Technologija. ISSN: 1822-296X [ISI Proceedings].

7. Paulauskas V., Paulauskas D. 2013. Navigational safety clause to the quay walls. // *Transport Means* – 2013, p. 288–292. Kaunas: Technologija. ISSN: 1822-296X [ISI Proceedings].
8. Paulauskas D. 2013. Port Entrance Channel Optimisation in Klaipeda port. // *Transport Means* – 2013, p. 114–117. Kaunas: Technologija. ISSN: 1822-296X [ISI Proceedings].
9. Paulauskas V., Narmontas D., Paulauskas D. 2014. Quay wall evaluation. // *Transport Means* – 2014, p. 181–185. Kaunas: Technologija. ISSN: 2351-4604 [ISI Proceedings].
10. Paulauskas D., Paulauskas V., Pridotkas G. 2015. Ships size limitations at the port entrance. // *Transport Means* – 2015, p. 372–376. Kaunas: Technologija. ISSN: 2351-4604 [ISI Proceedings].
11. Paulauskas D., Paulauskas V. 2016. Deep sea port development evaluation. // *Transport Means* – 2016, p. 908–912. Kaunas: Technologija. ISSN: 2351-4604 [ISI Proceedings].
12. Paulauskas V., Paulauskas D., Placiene B., Barzdziukas R., Maksimavicius R., etc. 2017. Optimization modeling of LNG supply chains for development: case study of Lithuania and Latvia. // *Transport Means* – 2017, p. 762–765. Kaunas: Technologija. ISSN: 1822-296X [ISI Proceedings].
13. Paulauskas V., Paulauskas D., Placiene B., Jonkus M., Kaulitsky A. 2017. Inland waterway shipping of oversize cargo. // *Transport Means* – 2017, p. 819–823. Kaunas: Technologija. ISSN: 1822-296X [ISI Proceedings].

Straipsniai, išspausdinti kituose recenzuojamuose periodiniuose leidiniuose

1. Paulauskas V., Plačienė B., Paulauskas D. 2002. The analysis of possibilities to enter the ports of Baltic sea for the big container ships. // *Transportas*, T. 17, Nr. 2, p. 66–70. Vilnius: Technika. ISSN: 1392-1533.
2. Paulauskas V., Paulauskas D. 2003. The possibilities of port infrastructure investigations and development. // *Transport/ Vilniaus Gedimino technikos universitetas*, T. 17, Nr. 5, p. 209–215. Vilnius: Technika. ISSN: 1392-1533 [COMPENDEX].
3. Paulauskas V., Paulauskas D. 2003. Transporto infrastruktūros plėtojimo tendencijos ir galimybių tyrimai. // *Transportas: technologijos, ekonomika, aplinka, sveikata (Straipsnis kolektyvinėje monografijoje)*, p. 254–304. Vilnius: Technika, ISBN: 9986-05-640-3.
4. Paulauskas V., Paulauskas D., Plačienė B. 2004. Laivo užimamos juostos ploto tyrimai // *Jūra ir aplinka*, Nr. 1(10), p. 22–26. KU. ISSN: 1392-785X.

Straipsniai, išspausdinti recenzuojamuose tarptautiniuose ir užsienio leidiniuose

1. Paulauskas V., Paulauskas D. 2006. Renewed Waves Action on port Structures // New approach to Harbour, Coastal Risk Management and Education, p. 67–73. Gdansk. ISBN: 83-88617-08-7.
2. Paulauskas V., Paulauskas D. 2005. Possibilities of the Baltic ports cooperation with transcontinental shipping lines // 7 Zinatniski Praktiska Konfernce, p. 61–67. Riga.
3. Paulauskas V., Paulauskas D. 2013. Ships Entry into Floating Docks with Tugs assistance. // Marine Enginnering Frontiers (MEF) (USA), Vol. 1, Issue 1, p. 13–18. ISSN: 2327-7653.
4. Paulauskas V., Paulauskas D. 2013. Navigational safety of LNG tankers in emergency situations // Scentific Journals maritime university of Szczecin, Vol. 36 (108), p. 121–124. ISSN: 1733-8670.
5. Paulauskas V., Paulauskas D. 2013. Passing ship's influence on quay wall via moored to quay wall ships // International Journal of Engineering and Innovative Technology (USA), Vol. 3, Issue 2, p. 233–236. ISSN: 2277-3754.

Summary in English

Introduction

Formulation of problem

Port activities include shipping, ship service and the provision of suitable infrastructure for navigation. Planning of port infrastructure development must consider evaluating the existing port territories, cargo flows, technical parameters of ships arriving from other ports and data necessary for their maneuvering. In port infrastructure analysis and accessibility to these ports the following aspects are assessed:

- size of inbound vessels (width, length, draft);
- technical characteristics of port infrastructure and superstructure;
- type of cargo (liquid, bulk, containerized, general), since specialized vessels are used for specific types of cargo.

The port development planning has to take into account the size of the ships to be attracted, the existing port boundary parameters and the maximum conditions for the development of the infrastructure.

Depending on the port infrastructure parameters, an upper limit of vessel size can be set, ie. vessels of maximum size that can enter, for example, the ports of the Baltic

Sea. Taking into account the current maximum depths in the Baltic Sea Straits (Zund, Little Belts, Greater Belts), the maximum draft of a vessel to pass the above strait is up to 15.0 m in vessels with a displacement of 120 000 to 150 000 tonnes.

Knowing the potentially maximum vessel sizes makes it possible to calculate the technical parameters of the infrastructure that can serve as base for further design of port channels, quays, turning basins and other infrastructure elements.

Therefore, prior to the upgrade of the port, the capacity of existing facilities has to be analysed, along with necessary assessment of the port infrastructure elements to comply with the new conditions while taking into account the planned investments. All these calculations need to be aligned in order to find the most effective solution.

Scientific problem

The port infrastructure and superstructure must be designed so as to accommodate incoming vessels of the required size, ensuring the mandatory navigational safety. Regrettably, in many cases the port infrastructure development fails sufficient precision in establishing of proper inbound ships size and the prerequisite conditions for their movement which often leads to either over-investment in port development or lack of necessary navigational safety at ports and port access.

The depth and width of port approach channels and water areas, and the technical parameters of quays determine the feasibility for safe maneuvering of incoming ships. The size, draft and other characteristics of ships entering the port vary depending on type of goods carried and the distance of transportation. Therefore, when it comes to the port infrastructure development, ship maneuverability studies are essential for adjustment of prospective port approach channels, ship turning basins, access to quays and the quays themselves.

Until now, the port infrastructure development has been carried out in accordance with local standards and international guidelines (EAU, PIANC) which assess typical port conditions, but there are specific issues on a case-by-case basis with no standard regulation.

Existing infrastructure assessment and design standards do not take into account the port component parameters that are mandatory for ship maneuvering (channel depth, width, area required for turning). This means that navigational accidents involving ships in ports and ports' access for many years have been a problem to resolve.

Recent trends in global shipping, design and construction of larger tonnages are leading to greater investment in port infrastructure. The issue of compromise between port depth and vessel maneuverability is particularly relevant.

The dissertation deals with the scientific problem – the development of a methodology to facilitate evaluation of maneuvering parameters of incoming ships and set

up of the technical boundary values of the port infrastructure elements accordingly, which would enable rational investment planning into the development of port infrastructure.

Aim of the dissertation

A research into developing a mathematical model and experimental calculation methodology for evaluation of port channel and turning basins dimensions, port infrastructure technical parameters, shipping safety conditions and investments for port development.

Tasks of the dissertation

1. Modeling a methodology for the assessment of ship maneuvering in port access and in the water area respectively, taking into account the requirements of navigation safety.

2. Carry out a comparative analysis of port infrastructure elements and identify the critical aspects to be considered in regard to port upgrade planning.

3. Calculate vessel maneuvering parameters using a mathematical model defining the ship's dynamics in the port. Based on the results obtained, and from the simulatory navigation modeling and realistic vessel maneuvering experiments, establish the boundary conditions for vessel traffic in ports, canals and access to ports;

4. Based on the results of analytical, numerical modeling and experimental research, prepare conclusions for the rational use of port infrastructure, combining its technical parameters with the data of ship maneuvering in ports and port access.

Scientific novelty

1. The equations of vessel movement are supplemented by the components of shallow impact and "wing effect" forces and moments, which allow to evaluate the maneuvering characteristics of the ship in the port access and port waters.

2. A methodology has been developed for assessment of ship maneuvers in the port access and port waters, which allows to determine the limit values of the port infrastructure elements and guarantee safe maneuvering of ships.

Theses defended by the dissertation

1. Based on theoretical and experimental research, a complex methodology has been developed to calculate the maneuverability of the ship and the minimum parameters of port infrastructure elements (navigational channels and ship turning basins).

2. More specifically, in assessing the maneuverability of the ship, the possibility of increasing the parameters of inbound ships to the existing port infrastructure, while ensuring safe navigation of the ships.

Practical value

The methodology of the ship maneuvering properties, the port access and water area, the assessment of the boundary conditions of the port (limitation in vessel sizes) has been developed, allowing to adjust the technical potentiality of the port infrastructure.

Research model designed from the prospective of ship maneuverability, port access and waterways, and port infrastructure elements will allow:

- To clarify the maneuverability of the ship at port access and in the port water area;
- Improve maritime safety at port access and in the port water area;
- Rational use of investment in the upgrade of port infrastructure components on the basis of the research results.

Rational use of investments to improve port infrastructure allows faster recovery of investment without increasing port dues while boosting port competitiveness.

Methodology of work

The dissertation consists of analytical, experimental and mathematical modeling methods.

Experimental investigations of ship maneuvering parameters were performed on DFDS Optima Seaways. E-SeaFix, a highly accurate navigation device, the SIM-FLEX NAVIGATOR, a visual navigation bridge simulator, AIS (Automatic Identification System), AIS integrated into the Vessel Traffic System (VTS).

Approval of scientific work

The dissertation research results are published as the monograph “Ship Management in the Port” (2009), in which the thesis is co-authored; the collection of 30 scientific articles including: 8 – in scientific journals included in the list of Thomson ISI Master list journals; 13 – conference material publications which are quoted in ISI, Inspec and other databases, 9 – in Lithuanian and foreign peer-reviewed journals (the list of publications is presented at the end of the dissertation).

The results of research carried out under present dissertation were made presented through 20 international scientific conferences in Lithuania and abroad.

The results of the dissertation were applied to port development projects in Lithuania (4 projects) and abroad (1 project).

Work Scope and Structure

The dissertation consists of an introduction, 4 chapters, conclusions, reference list of literature, author's list of scientific publications on the dissertation topic. The dissertation comprises 146 pages. The work features 47 illustrations and 11 tables. The bibliography consists of 145 sources.

1. Analysis of Ship Maneuverability and Port Infrastructure Research

The development of the port infrastructure (port channels, ship turning basins, internal port water areas) is one of the most difficult and expensive works, it is thus of utmost importance to design them rationally, and perform dredging works taking into account the draft and maneuverability of the incoming ships. Ports' technical parameters (channel width and depth, port water areas, dimensions of ship turning basins) are important for ensuring the required navigational safety. On the other hand, investment in port development must be rational. The port countries have to be dedicated to attend the issues of port development, thus a lot of research in the field is done by Lithuanian and foreign scientists.

Vessel maneuverability is defined as the intended trajectory of the vessel's movement and ability to endure in the aimed trajectory, to stop at a predetermined distance or at a intentional point, and is currently investigated by many scientists in Lithuania and abroad.

The IMO SOLAS 74 Convention on the Safety of Life at Sea sets out requirements for the provision of information on vessel maneuverability. This information must be on board, and it is based on standards and rules.

The SOLAS 74 Convention and other maritime safety documents (IMO requirements or rules of classification societies) stipulate that information on the ship's maneuverability parameters (stopping distance, ship turning diameter, etc.) shall be kept on board. Ship inspection is carried out in accordance with the Paris Memorandum of Understanding, which has revealed that about 30% of ships do not have the necessary information (ship's turning trajectories, stopping parameters).

Based on World Performed research results formulated an urgent task to develop a practically applicable methodology for assessing ship maneuverability at low depths

(port conditions), while increasing the navigational safety of ships at ports and their access.

When entering a port and maneuvering the port, the vessel's control is influenced by wind, current, and shallow impact. In this way, it is very important to accurately assess the ship's rotation trajectory, stopping parameters, the minimum speed of the vessel's control, changes in the draft of the vessel at low depths, the influence of the ship as a "wing" on the maneuvering characteristics of the ship, additional control measures (pushers, tugs) are required.

New navigation equipment is being introduced in ports and ships, the requirements for crews are tightened, however, the number of ships accidents in ports and their access has remained similar for many years. Thus, research and appropriate solutions are needed in terms of compatibility between vessel maneuverability and port infrastructure parameters, which would help to reduce the number of accidents at ports and their access.

There is a lack of research on vessel maneuverability, port access and waterways, and their potential link with port channel and waterway parameters, so the aim of this chapter is to summarize the research carried out on this topic, to evaluate the obtained results and to determine the ship maneuvering parameters to be assessed when designing the port infrastructure. The objectives and tasks of the dissertation should be specified by the parameters, the level of the examination, and the results obtained.

1.1. Research on vessel maneuvering and port infrastructure parameters

In Lithuania, as in other countries, scientific work draws attention to the maneuvering characteristics of ships, analyses the port infrastructure to ensure safe access of ships, addressing the problems of port depth and waterway optimization. Engineer S. Šimoliūnas, one of the first in Lithuania to design the port of Šventoji in 1930–1937, analysed the problems of optimal port depth.

Extensive research was carried out in planning the Klaipėda-Mukran ro-ro ship complex, at that time the works of Lithuania researchers were announced, but they were mostly related to the influence of channel width on the navigation safety of Ro-Ro ships.

Summarizing the research carried out by foreign scientists on port development, waterway and other port infrastructure, it is to be noted that the ship maneuvering properties with extremely low clearance have not been sufficiently investigated and hydrodynamic "wing" effect on the ship has not been evaluated enough, the properties are surveyed under very limited conditions.

Thus, it can be said that the works published by foreign scientists are very important, they can be developed and carried out in the research envisaged in the dissertation, yet due to insufficient examination of the maneuvering characteristics of the

ship, their coordination with the optimal parameters of the port channels, waters and the turning basins, therefore it is necessary to carry out the researches that are intentional objectives and tasks of the dissertation.

1.2. Ship maneuvering characteristics in relation to port infrastructure

The transport system includes vehicles (ship, car, train, plane), infrastructure and superstructure. Infrastructure is a complex of hydrotechnical and engineering structures, navigation equipment, engineering networks, roads and access railways. Most of the infrastructure elements require large investment, and their payback is over a dozen or several decades.

The port infrastructure shall be compatible with the parameters and characteristics of the maximum planned (counting) ships, and shall ensure the necessary conditions for maneuvering of the ships. It should be noted that formal requirements such as SOLAS 74 Convention, national legislation, various recommendations and standards have so far taken into account the maneuverability of ships when the water depth is low. Usually, the basic characteristics of calculating ships (length, width, draft) are used when planning the port infrastructure. In this way, inaccuracies in unduly high clearance (distance between the hull and the bottom of the vessel), the width of the channel, the diameter of the ship turning basins in certain ports are necessary, so additional investment in port renewal and access to the ports or unreasonable increase in navigational risk for ships is needed in the subsequent operating period.

For very large vessels, accurate information on the maneuverability of vessels at low depths is required for the ship, and the maneuvering characteristics of the vessels must be “linked” with the channel configuration. For the sake of safe access, very large vessels are trying to “follow” the axial line of the navigation channel.

All errors and inaccuracies, when large vessels sail through complex channels, if the ship’s maneuverability is underestimated, can lead to a high probability of ship accidents (grouting, collision). As example, Antwerp port entrance (Shelda River) has partially broken down after the ship’s grouting and the capacity of the port approach channel has been reduced by 3 days (large ships of 300 m in length bound to and from the port were stopped at the port entrance).

Based on the results of the analysis carried out, it is obvious that in order to rationally plan the development of the port infrastructure, it is necessary to know the maneuvering properties of the incoming ships at high and small depths. For this purpose, more accurate methods of assessing the maneuverability of ships are needed. The received ship maneuvering data shall be used for the design and construction of the port channels and the turning basins. It is also very important to develop methods that help to determine more precisely the minimum power required for tugs, the ship’s ma-

maneuverability. It is necessary to evaluate the influence of additional external forces. In the planning of port channels and ship turning basins parameters have to be assessed according to the vessel's maneuvering characteristics. On the other hand, taking into account the existing port infrastructure parameters, to identify the maximum size of vessels that could enter the port, ensuring the necessary navigational safety.

1.3. Summary of the first chapter

As discussed in this chapter, Lithuanian and foreign scientists have carried out a number of research studies on the optimal parameters of port parts – channels, port waters, ship turning basins and other port facilities. However, many published works by Lithuanian and foreign scientists have not been presented as a rational planning of the infrastructure, taking into account the depth of the channels, the areas of the ships turning basins necessary for safe maneuvering of ships. Existing ship simulators does not have enough information on the various ship models and their maneuverability, so the results do not allow enough confidence in the results of the exercise equipment.

Summarizing the research carried out by Lithuanian and foreign scientists about the possibilities of port development, research of waterways and other port infrastructure elements, it can be noted that the maneuvering characteristics and maneuvering possibilities of the ship in the case of especially small clearance have not been sufficiently investigated, and the maneuvering possibilities of the ship under limited conditions have not been sufficiently investigated and evaluated.

Thus, following the publication of works by Lithuanian and foreign scientists analysing the depth of ports, the parameters of the port navigation channels and the ship turning basins, taking into account the maneuverability of ships, their constructional features, the completeness, accuracy and reliability of navigation information, it can be stated that there are not enough methodologies, which would make it possible to accurately determine the port parameters necessary for the maneuverability of the vessel (depth of channel, turning basins, etc.). This issue is particularly relevant in the case of small port depths.

These issues should be investigated in the thesis to identify accurate, practically acceptable and usable methodology to ensure maritime safety in ports and their access.

2. Investigation of Port Infrastructure Development and Ship Maneuvering Parameters that Meet the Boundary Conditions

The main object of research in the planning and development of ports is the vessels that can enter the port under investigation. Accurate vessel entry and maneuverability

to maneuver are directly related to the technical characteristics of the port infrastructure, port waters, channels and the ship turning basins.

Therefore, it is important to analyse the parameters of vessel sailing and maneuvering in port conditions, where there is a small water depth, limited water area and channel parameters, and based on the obtained results, to provide port infrastructure parameters: depth in port channels and port waters, geometric parameters of channels.

2.1. Experimental research on ship maneuvering in port

In order to determine the real parameters of the ship's maneuvering in the port at low depths, it was chosen to perform the vessel's motion measurements under simulation and real conditions. Experimental investigations of the ship's maneuvering parameters in real conditions were carried out while the ship was sailing to the port and maneuvering in it.

2.1.1. Methodology for conducting experiments on ship maneuvering in the port

The experimental methodology is based on the three-step principle:

1. Collection and analysis of initial data on vessels under investigation. Calibration of measuring equipment.
2. Simulation of ship maneuvering studies in the port. Evaluation of errors.
3. Experimental measurements in real conditions, analysis of the measurement results, comparison with the simulation results tests and calculation results.

In the first stage, analytical calculations and evaluations are performed based on the actual data of the real objects (ships, other objects) calibrated by the research equipment.

In the second stage, by calibrating the visual vessel bridge simulator for a particular experiment, tests are performed on a visual vessel bridge simulator or other simulators, thereby generating the required amount of data and calculating errors, for example by the maximum distribution method. The results obtained at this stage are again tested by analytical methods.

In the third stage, experiments with real objects (ships) are performed, which exactly correspond to the calculations or are similar, after the corresponding corrections are introduced, the obtained results are analysed and possible resulted errors are evaluated. At this stage, highly accurate navigation equipment, such as E-Sea Fix, AIS-LEERS, AIS, is typically used to validate analytically and using simulators, such as OPTIMOOR, for accuracy and reliability.

Comprehensive analytical and experimental studies are used to analyse the results obtained, calculate errors in final results and draw conclusions.

2.1.2. Measuring equipment

For the performance of experiments, highly accurate navigational equipment, vessel simulators and vessel positioning and vessel movement parameters recording equipment were used.



Fig. 1. Very high accuracy navigation system, „E-Sea Fix“, which has accuracy of ship’s position in RTK mode – +/- 2–5 cm



Fig. 2. Ship’s bridge simulator „SimFlex Navigator“

2.1.3. Experimental tests of ship maneuvering parameters

Experimental research was carried out on real ships and data generated in the dissertation were measured to test the methodology:

- resistance coefficient of the ship moving sideways;
- resistance coefficient of a vessel running through a narrow channel;
- resistance of the ship moving straight;

- resistance force of the ship moving sideways;
- minimum vessel speed and other parameters.

2.2. Ship performance characteristics

Vessel control is defined as its intended trajectory and ability to endure and stop at a predetermined distance or point. Thus, the following characteristics determine the vessel's control:

- ship rotation;
- the stopping distance of the ship, etc.

Vessel maneuvering can be described by the general differential forces and moments of the ship's motion using the second Newtonian law and the d'Alembert principle in a two-dimensional coordinate system. Differential Equations of the Ship's movement recorded the equation of the forces acting on the ship in the directions of X (longitudinal force) and Y (transverse force) and the moments acting on the vertical passing through the coordinates.

Mathematical model are expressed as follows:

$$\begin{aligned} \Sigma F_x &= 0 \\ V(1+k_{11})\rho \frac{dv_x}{dt} &= X_k + X_\beta + X_p + X_a + X_b + X_{sr} + X_{sek} + T_x + X_N + X_V \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Sigma F_y &= 0 \\ V(1+k_{22})\rho \frac{dv_y}{dt} &= Y_k + Y_\beta + Y_p + Y_a + Y_b + Y_{sr} + Y_{sek} + T_y + Y_N + Y_V \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Sigma M_A &= 0 \\ (I_z + \lambda_{66}) \frac{d\omega}{dt} \sin \beta \cos \beta &= M_k + M_\beta + M_p + M_a + M_b + M_{sr} + M_{sek} + M_T + M_N + M_V \end{aligned} \quad (3)$$

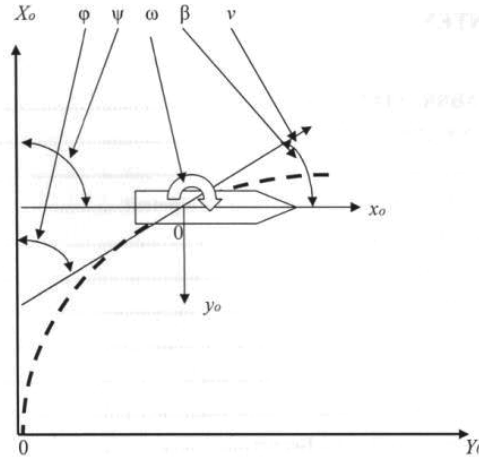


Fig. 3. Coordinates systems and ship's kinematic parameters

Coordinates of the vessel's trajectory when navigating through port channels or waters can be calculated as follows

$$X_{0(s)} = \int_0^t v_s \cos\left(\int_0^t \omega_s dt - \beta\right) dt; \quad (4)$$

$$Y_{0(s)} = \int_0^t v_s \sin\left(\int_0^t \omega_s dt - \beta\right) dt. \quad (5)$$

The methodology used to calculate the ship's trajectory elements in this paragraph is based on the dissertation's research on vessel maneuvering characteristics at low depths and the identification of port infrastructure boundaries for ships (vessel maneuvering when moving through port channels and waters) and other ship maneuvering tasks.

2.3. Vessel movement characteristics and vessel draft at low depths

In many ports the depth is limited, so ships are controlled in ports at low clearance (distance between the hull and the bottom of the channal). With the development of modern navigation and depth measurement equipment, where the position and depth of a vessel can be more accurately determined at any point in the port water area, ports are trying to maximize the draft of the ships and minimize clearance.

Vessel maneuvering parameters, at low depths, vary compared to the parameters of vessel movement at big depths, resulting in changes in vessel angular and linear velocities compared to analogous parameters at big depths. The change in vessel speed at low depth is based on a higher resistance at the same power given to the screw (the same rotational speed of the propeller). Increased flow velocity between the hull and bottom of the vessel results in reduced pressure, resulting in an increased draft of the vessel.

2.4. Characteristics of the rotating movement of the vessel at low depth

The maneuvering of the vessel at low depth is more complicated due to additional changes in the added fluid mass and hull resistance. At low depths, the speed of the ship decreases, although the power (propeller rotation speed) remains the same, the added fluid mass causes the ship to become “aggravated” and with the same steering torque generated by the lateral force, its angular velocity decreases. The change in the angular velocity of the vessel at low depth can be characterized by an angular rate coefficient.

Vessel control options in ports with small depths are important for planning and conducting vessel maneuvers in port waters and channels, as well as for planning port infrastructure parameters.

2.5. Ship stopping and acceleration characteristics at low depths

At low depths, the stopping performance of the vessel changes due to increased shallow impact, ie. y. increased ship draft, including resistance, ie. the added fluid (water) mass “touches” the bottom of the channel, while increasing the friction resistance. The change in the stopping performance of a vessel can be expressed as a resistance factor, which depends on the ratio of the depth and draft of the vessel (H/T). The experiments were carried out on real ships, comparing the speed of the ship’s movement at the same power used by the same engine, sailing at high ($H/T \geq 6$) and low ($H/T \leq 6$) depths. Vessel Speed Measurements were performed with high-precision navigation equipment E-Sea Fix. The error rate was no more than 0.1 knots or up to 1% of the ship’s initial speed.

As the ship moves sideways, its coefficient of resistance increase, based on the ratio T/H . During the experiments, the ship’s drift angle was measured at high and low depths. Vessel angle measurements were carried out with high precision navigation equipment E-Sea Fix.

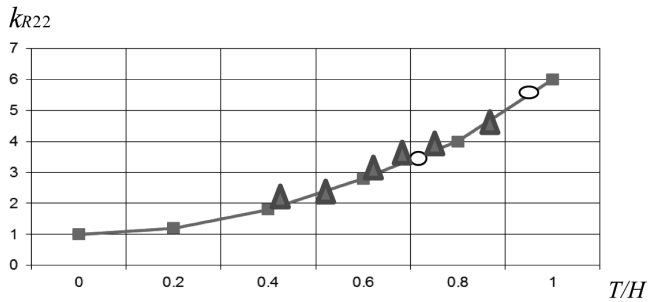


Fig. 4. Ship’s additional resistance coefficient k_{R22} , depends of ship’s draft and depth T/H (calculation and experimental results shown as \square \blacktriangle)

The resulting coefficient of resistance of the ship when moving sideways allows to calculate the actual resistance of the ship when mooring at the berth or when leaving it. This situation is particularly important when mooring at low depths near the piers at a high angle (50° to 90°) in the direction of the current.

2.6. Minimum speed of vessel control during stopping

The minimum speed of the ship’s stopping during stopping is the one at which the ship reacts to the moment created by the steering board, in other words, until the ship is “listening” to the rudder. It is important when planning port channels, especially in the internal waters, when it is necessary to keep the ship in the intended sailing lane for ships turning basin, quays and other port locations.

The minimum speed of the ship’s stopping during braking is particularly important when maneuvering in ports and other restricted areas, as a loss-making vessel can move out of the channel or waterway at a relatively high speed, so the minimum speed of the vessel’s control when deciding to ship must be assessed while planning the port infrastructure.

2.7. The forces acting on the ship moored in the port

When mooring a ship to and from the quay, the necessary additional forces and capacities must be accurately determined to compensate for the external forces of impact. In general, the moored vessel is subject to the following forces: the ship’s inertia (when stopping or giving the required speed); direct effect of the current; hydrodynamic “wing” effect (when the vessel is moving upstream or when it is standing); aerodynamic; impact of shallow water; other previously analysed forces.

The moored vessel is subject to dynamic forces, some of which are overcome by the propeller and steering complex and the multiplier, if any, to be overcome with the help of tugs. In order to determine the required number of tugboats and their minimum power, the possible forces of the ship must first be determined.

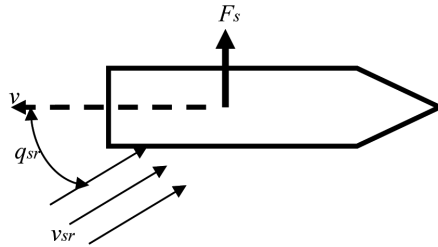


Fig. 5. Hydrodynamic „wing“ effect on ship

In general, equations of forces and moments can be used when mooring, adapting them to specific conditions.

2.8. Port infrastructure design (planning) principles for assessing ship control parameters

Port infrastructure means hydrotechnical and navigational structures and equipment for safe access of ships to the port, to stand in the port and to leave the port. When planning the port infrastructure, the parameters of the ships that can enter the port are taken into account. In the planning and development of seaport infrastructure, the main limiting factor is the maximum geometric parameters of the strait and other connections connecting a particular sea where it is planned to build port with the world's ocean. For example, for the Baltic Sea ports, the connection parameter is the depth of the Belts. Occasionally, port infrastructure parameters may be determined by other technical factors, such as the width of natural straits, other unchangeable or difficult-to-change technical parameters, such as a city near a strait that cannot be demolished or altered.

All other possible port planning constraints are relative and usually depend on market or other specific conditions and requirements, such as port basin sizes, rock-bound port entry, such as Stockholm, Helsinki ports.

Therefore, the following conditions should be assessed when planning the infrastructure elements of seaports and assessing the geometrical parameters and maneuverability of ships:

- restrictions of the straits on entering from ocean (like Danish straits);
- restrictions on port infrastructure development (eg overly complex and expensive port access development work);

- existing and anticipated cargo flows;
- existing and anticipated types of vessels, their maximum parameters and maneuverability;
- port economic situation and opportunities;
- environmental requirements and potential risks to the environment;
- other possible limitations

2.9. Minimum parameters of the port water area (channels, turning basins) required for the vessel maneuverability

When planning ports and their parts, it is important to set minimum parameters for port infrastructure (width of navigation channels, depth of channels and waterways). Having assessed the ship's maneuvering characteristics, it is necessary to calculate precisely the necessary minimum depths, which are oriented to the possible maximum ships, possible minimum channel widths, diameter of the ship's turning basins, possible minimum access to quays.

In order to determine the necessary depths for port channels and waters, it is necessary to assess the many factors that affect maritime safety. The depth of the channels and water areas is calculated taking into account: the maximum draft of the vessel; depth measurement accuracy; water level and possible change (accuracy of water level measurement); speeding of the ship; possible increase in draft due to longitudinal and lateral movement of the vessel; potential changes in the bottom, etc.

2.10. Summary of the second chapter

Theoretical studies of vessel maneuverability in various sailing conditions have been carried out, which have developed methods for assessing the maneuverability of a ship at low depths, which correspond to the conditions of ports and waterways. These techniques can be used at low depths when calculating port channel and waterway parameters and planning port infrastructure (channels and water areas).

Determining the precise internal and external forces acting on the ship and evaluating the interaction of moments allows to determine the boundary conditions for the sailing of the ports and waterways of the vessels, which is especially important in the case of complex hydrometeorological conditions for ships to and from ports, as they allow to calculate the necessary external forces in advance (tugs).

Thus, applying the methodology of calculating the ship's maneuvering elements in this chapter at low depths, analytical calculation methods were developed, which were used for the preparation of the dissertation and optimizing the infrastructure of Klaipeda and other ports.

3. Investigation of the Vessel Maneuverability Characteristics and Port Infrastructure Parameters

Practical calculations and experimental studies on real ships and simulators have been performed according to the methodology presented in second chapter.

3.1. Investigation of the characteristics of the rotating of the vessel at low depths

Practical calculations and experimental studies of the elements of the circulating elements (kinematic parameters and trajectories) of different ships on real ships and simulators have been performed according to the methodology of the second chapter. In the calculation, an experimental calculation method was used where the critical points of the ship's motion were determined on the actual ships (maximum angular velocity of the ship's rotation and stopping time of the vessel), then recalculating other kinematic parameters and trajectories used to determine the channel bends as well calculate and evaluate other practical port infrastructure parameters.

A computer program has been developed for the calculation of vessel maneuvers using the methodology described in Chapter 2. Vessel and experimental data for vessel movement trajectories, stopping distances and other vessel control parameters are given.

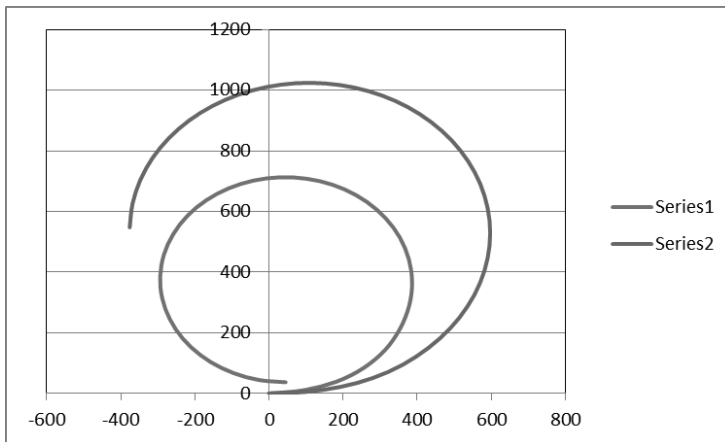


Fig. 6. M/v „Optima Seaways“ circular trajectory on shallow water ($T/H = 0.8$) and deep water ($T/H = 0.2$), obtained by calculation method

The ship is subjected to external impact forces, ie. wind and current, additional factors arise: aerodynamic and hydrodynamic forces and forces based on the “wing effect”.

Summary in English

Inside ports and waterways, the effects of waves are usually minimal or absent. The vessel will be operated until the steering wheel and (if available) the multiplier will reach a greater momentum compared to other moments if the sign is opposite to the moments generated by the rudder and thrusters.

Thus, the port infrastructure compatibility with the ship's maneuverability is particularly important when planning the entry of potential major vessels into the port. At present, container vessels ($L = 365$ m) of a similar size as the simulator, which regularly sail to the port of Southampton, improve maneuverability with the help of tugs, as their own maneuverability is not enough to safely sail through the entrance channel. It is therefore very important to identify in advance the marginal maneuverability of ships, to adapt them to port infrastructure parameters and to take additional measures to ensure maritime safety.

An increase in vessel draft due to vessel speed ("squat"), which depends on the ship's hull fullness and ship speed, is very important when sailing through port channels and waters. Many marine vessels have a total hull block coefficient ratio of 0.62 (relatively small vessels with a displacement of up to 10,000 tonnes and larger high-speed vessels - passenger, container vessels and the like) to 0.8–0.88 (large tankers, bulk carriers and similar vessels with a displacement of more than 50 000 tonnes). At speeds of up to 6 knots (limiting speed in many ports), the draft of large ships increases to 0.20–0.30 m.

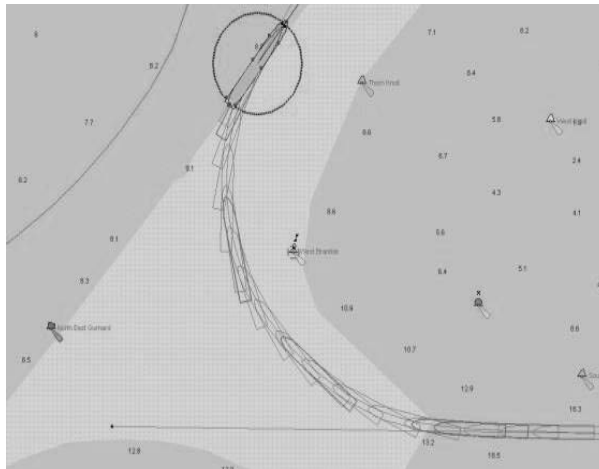


Fig. 7. Container ship ($L = 365$ m) sailing to Southampton port on approach channel bend trajectory (received by SimFlex 4 simulator and by theoretical method)

The manageability of the vessel at low depths specific to ports can be calculated using the methodology given in Chapter 2. This is important when maneuvering a ship in port waters and channels, and planning optimal port infrastructure elements or setting up the necessary additional control measures (tugs).

3.2. Investigation of vessel rotation characteristics and vessel draft increase at low depth

Characteristics of vessel motion (linear, rotational angles) at low depths compared to the same characteristics and power used at high depths due to increased resistance and added fluid (water) mass.

Experimental research of ships in Klaipėda port, analysis of conditions of vessel sailing in Korinthou (Greece), Sodertalje (Sweden), Ternezen (Belgium) channels and determined according to ship draft and depth (T/H), the ratio of the cross-section of the vessel to the cross-sectional area of the channel may reduce the speed of the ship to 1,5 times and more due to the impact of shallow water.

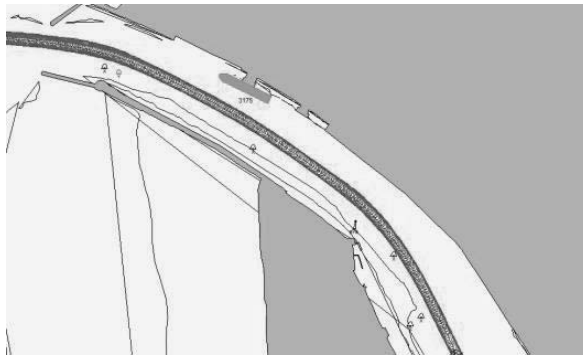


Fig. 8. LNG tanker's ($L = 315$ m) trajectory in Klaipėda port.

In the specified channels, the ship's draft and depth ratio is about 0.93 to 0.96, which reduces the vessel's handling by about 70%, which is why tugs are used to improve vessel control. You need to know beforehand in order to have additional control measures (tugs).

3.3. Investigation of vessel deceleration, acceleration and deceleration performance at low depths, their importance for port infrastructure planning

The ship's stopping characteristics are primarily related to the geometrical parameters of the harbour waters, as the vessel entering the port water area is stopped within the water area.

At low depths, the stopping performance of the vessel changes: due to increased shallow impact, the stopping distance and time are reduced.

The results of the ship's resistance tests are important in determining the limitations of the ship's departure from the port when it is necessary to move vessels from the harbour to the waves, because the increased resistance of the ship due to the impact of shallow water can hinder the achievement of the necessary safe speed at the port gate.

The methods of increasing the resistance on the side of the ship due to shallow impact in the dissertation allow accurate estimation of additional forces. When moving the vessel along the side wind and mooring the vessels to the piers, which are placed at a large angle to the current, because in case of current and shallow impact the tug-boat pulls the vessel away from the quay it may not be enough bollard pull without accurate calculations.

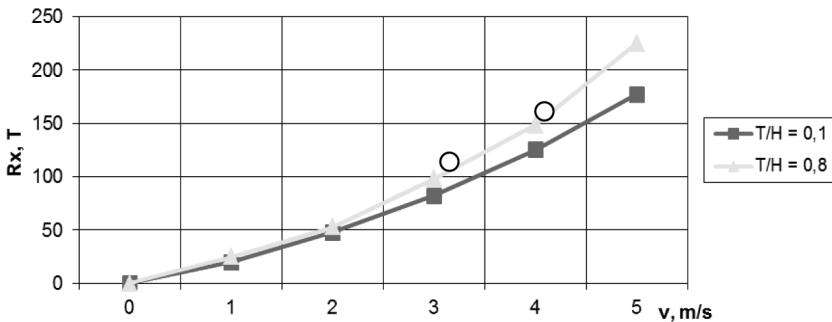


Fig. 9. Ship's resistance on the strait in deep and shallow water (T/H about 0,8), obtained by calculation method and checked by "o" experimental method depends on the ship speed

When the ship is sailing (at low depths), its stopping performance changes - the stopping distance is shortened, it must be pre-assessed (calculated) when navigating the port area or other similar places. It is difficult to block large vessels in the port water area, often using tugs. Since harbor waters and channels are usually restricted, additional forces are needed to keep the ship in the intended trajectory.

It is important to know the minimum speed of a vessel when ships enter the port at higher speeds due to the impact of high external forces. For example, ro-ro vessels are entering to Klaipeda port, where the wind speed reaches 20 m/s and more, and in that case the vessels pass the port gate at a speed of 12–14 knots, and when entering the port it has to reduce the speed of the ship to 7–8 knots (permissible speed of vessels in port – 8 knots).

In accordance with the methodology given in Chapter 2, a minimum vessel speed of wind 15 m/s is calculated for a tanker with a deadweight of 35 000 tonnes. Experiments on an analogue ship were performed to verify the calculated results and based on the results of AIS-LEERS observations. The results of digital and experimental trials on real ships are presented in the Figure.

Summary in English

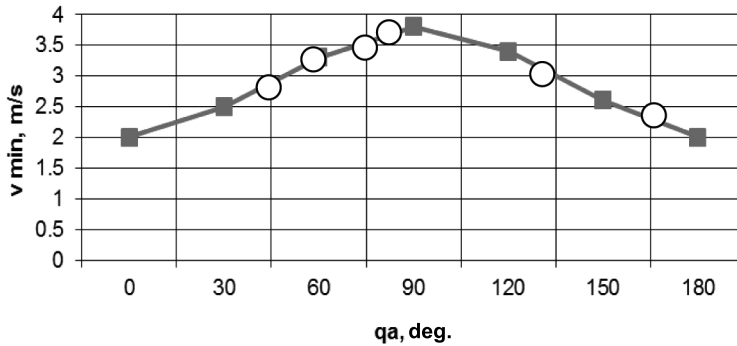


Fig. 10. Minimal tanker's (DWT 35000 t) steering speed at passive stopping phase, affected by the wind 15 m/s from different directions, obtained from methodology presented in theoretical section and real ship "o" experimental results

The reason for the departing bulk cargo ship "Efi Theo" (length – 190 m, width – 31 m, draft – 11.2 m, DWT – 45000 t) grouting on the port of Klaipėda channel slop – loss of control of the vessel due to failure of the main ship engine. The ship sailed at a speed of 6.1 knots in the port's internal navigation channel, decelerated passively when the main engine broke, speed down to 5.1 knots (2.6 m/s) when the wind speed reached 11 m/s and the wind angle was about 40°, the ship lost control, began to turn to the wind and sailed outside the channel. The calculations made suggest that the 50 T tug had to be positioned at 135° to the left side (about 45°) and to draw the tension of the tow rope to about 12 T, ie. to work at the lowest speed, it would have been enough to keep the ship in the navigation channel until it had sailed to the northern ship turning basin of the Klaipėda port, where additional tugs would have assisted.

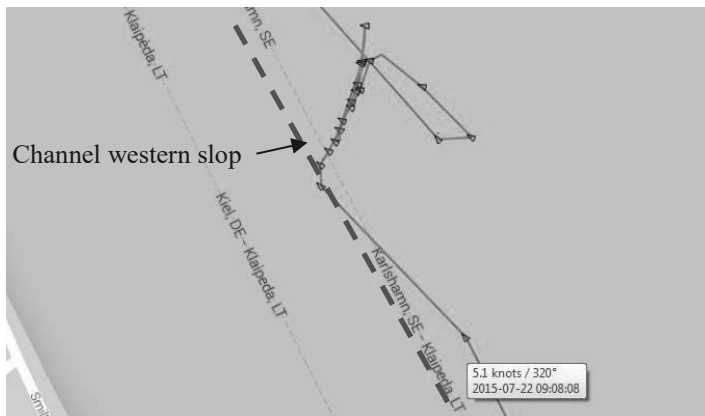


Fig. 11. M/v „Efi Theo“ sailing traectory, ship's control loss place and grouting

Thus, the minimum speed of vessel control when the ship is stopped or the variable pitch propeller blades are in the zero position must be determined for navigation in the ports, when planning the port infrastructure, in order to provide the necessary additional control measures (tugs) or minimum required channel and aquatorial parameters.

3.4. Investigation of changes in vessel draft in ports at low depths and limiting conditions

The increase in ship draft due to speed (squat) is calculated using the theoretical methods developed in the dissertation, which are presented in Chapter 2, tested on real ships and using SimFlex Navigator. The results of the research were compared with other studies carried out in Lithuania and abroad. At speeds of up to 6 knots, the increase in draft of the vessels under investigation (speed) is up to 0.20 – 0.25 m, and can be resulting from the increase (sinking) of the ship’s draft due to the impact of shallow water, are important in the planning of the port channels and port waters and in determining the limitations of ships entering ports to the existing depths.

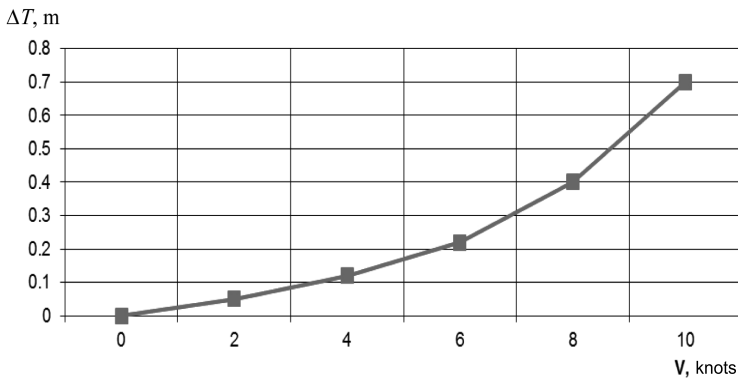


Fig. 12. Container vessel ($L = 250$ m) squat (m) in case $T/H = 0.87$ depending on the speed.

Comparative analysis is important for port infrastructure research. When selecting ports to be compared, it is important to accurately assess: the similarities of the ports analysed, the size of ships entering the ports, the largest ships entering, the level of casualties in ports.

Thus, theoretical and experimental research of channel width and depth with real ships and navigation simulator, theoretical and experimental researches of selected comparative ports revealed that entering incoming to Malku Bay and conditions of ship maneuvering in Malku Bay and comparative results obtained can be successfully used in Klaipeda and other ports.

Table 1. Ship turning basins diameter depends on the ship's length and turning method

Ship length L, m	100	120	140	160	180	200	220	250
D_B using tugs, m	136	150	170	192	214	236	258	291
D_B using thrusters, m	120	140	160	180	205	225	245	275

The theoretical part of the ship maneuvering properties survey, ship's lap pool assessment and optimization methodology, tested by experimental tests on real ships and simulator using 2D and 3D systems, revealed that theoretical calculations and experimental studies coincide, and errors do not exceed 7-10 % as provided by the IMO SOLAS 74 Convention.

3.5. Determination of channel parameters according to vessel maneuverability

One of the most important elements in the development of port infrastructure is port approach and internal channels. Main characteristics are: channel depth; width of channel and water area; channel turning radius; channel profile (full, open or semi-open).

When planning port navigational channels, it is important to accurately assess, taking into account the vessel's maximum maneuverability, channel turning radius, and possible deviations from the intended trajectory due to internal and external influences: rudder turning time; the reversing time of the ship's machinery; wind and current effects and possible changes in the channel turning point; wave effects etc. The reasons for forecasting additional reserve are due to inadequate testing, ie. lack of research and its practical application.

The absence of clear criteria or norms often leads to an unjustified increase in investment or risk in the development of port channels and waters and quays.

When planning the Klaipėda LNG Terminal, the results provided by foreign designers, consisted of, respectively: the width of the port entry channel should be at least 300 m, the width of the internal navigation channels should be at least 200 m. At the same time, the current width of the approach and internal navigation channels are 150 m and the increase of the channel width at that time is not planned.

In solving the tasks raised in the dissertation, it was necessary to accurately assess the potential safe widths of Klaipėda port approach and internal navigation channels by more accurately assessing the LNG tanker maneuverability at low depth and to prove that the existing port channel widths are sufficient for LNG standard tankers (LNG tanker capacity about 150000 m³).

3.6. Requirements for port infrastructure in terms of vessel maneuverability and draft

Vessel turning and mooring at the quay using tugs is a difficult maneuver, since at least three or four tugs are used for very large vessels and complex hydrometeorological conditions.

Theoretically calculated ship mooring capability of over forty simulations were compared with real ship mooring conditions (based on AIS information). The boundary conditions for self-mooring and mooring of the ships are more difficult to calculate and carry out, taking into account: the direction of the current; current speed; wind speed at the most unfavorable wind direction – perpendicular to the ship’s side; the ratio between the lateral force of the vessel and the displacement of the vessel; the ratio between the power of the vessel pushing and the displacement of the vessel.

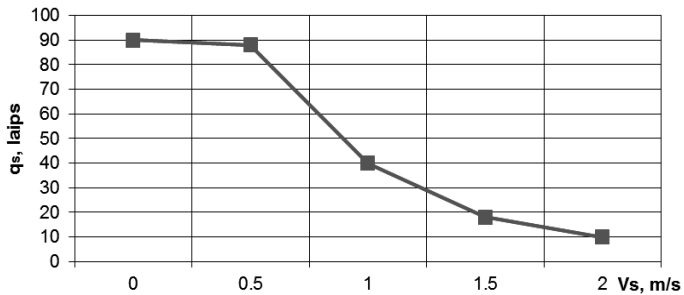


Fig. 13. Ship’s unmooring possibilities without external assistance depend on current velocity and current curce angle (wind 15 m/s in perpendicular direction)

On basis disertation research results preparing request tugs bollard pull for the different size of the ships for the quay wall No. 1 and No. 2 depends of the hydrometeorological conditions.

The results obtained should be considered critically: if a ship needs to be moored to or unmoored from the quay, but also to turn around, it is necessary to have at least 75% of the maximum towing force of the tugs at a particular wind speed.

In this way, calculating and evaluating the ship’s maneuverability objectives when planning the development of ports and waterways and evaluating the existing infrastructure makes it possible to adopt optimal parameters for navigation safety.

Table 2. Request total tugs bollard pull for the quay walls No. 1–2

v_a	N_a	v_{sr}	N_{sr}	h_b	q_b	270	220	180	150	100
10	0	1,0	305	–	–	–10	–8	–6	–4	–3
	60	1,0	305	–	–	–20	–15	–10	–6	–5
	120	1,0	305	–	–	12	9	8	3	2
	180	1,2	305	–	–	60	48	35	14	10
	240	0,8	305	1,0	260	55	42	29	12	9
	300	0,6	305	1,2	280	20	15	12	5	3
15	0	0,8	305	–	–	–50	–40	–28	–14	–10
	60	1,0	305	–	–	–64	–50	–36	–17	–13
	120	1,2	305	–	–	–24	10	8	18	2
	180	1,4	305	–	–	114	90	66	28	17
	240	–0,5	110	1,2	260	136	106	80	33	21
	300	–0,8	110	1,5	280	86	69	54	20	11
20	0	0,6	305	–	–	–102	–82	–58	–27	–18
	60	1,0	305	–	–	–130	–102	–72	–34	–24
	120	1,4	305	–	–	126	96	82	20	17
	180	1,8	305	–	–	208	163	120	49	31
	240	–0,6	110	1,4	260	225	179	138	56	35
	300	–1,0	110	1,8	280	136	108	86	32	19

4. Applying research results to port infrastructure development

Using the methodology developed in the dissertation, based on theoretical and experimental researches, 5 projects were carried out using the results of the thesis.

In preparation of feasibility study regarding Klaipėda port navigation channel dredging up to -17 m, the port approach channel was investigated, assessing the vessel's handling characteristics and research, it was found that the channel axis should be turned north about 10–12 degrees in order to minimize navigational risk when entering ships to the port and to the quays of the oil terminal. The possible maximum ships that could enter the Baltic Sea and Klaipėda port maneuvering properties, using the methodology developed in the dissertation, evaluating the potential impacts on sailing ships, have calculated and proposed optimal parameters of port approach and internal navigation channels in the mentioned study. The study was approved by the client and Klaipėda Port Development Council.

The proposed optimization of the infrastructure of the northern part of Klaipėda port, changing the direction of the entrance channel from 92.5 ° to 102 °, with the aim of reducing the angle of turn, flowing the port gate, as the existing port entrance channel and turn angle of 23° does not guarantee the port gate sufficient shipping safety for the introduction of POSTPANAMAX PLUS (length up to 365 m) and MEGA (length up to 400 m) container ships.

Summary in English

Optimizing quays No. 1 and No. 2 layout to accept SUECMAX type oil and LNG Q-Flex tankers and at the same time safely run the largest possible ships to and from the port (MEGA container vessel), taking into account their maneuverability along with the new direction of the port approach channel, proposed new layouts of quays No. 1 and No. 2.

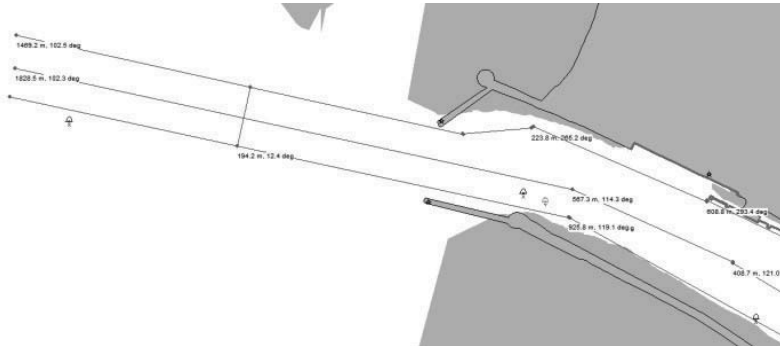


Fig. 14. Klaipeda port approach channels optimisation

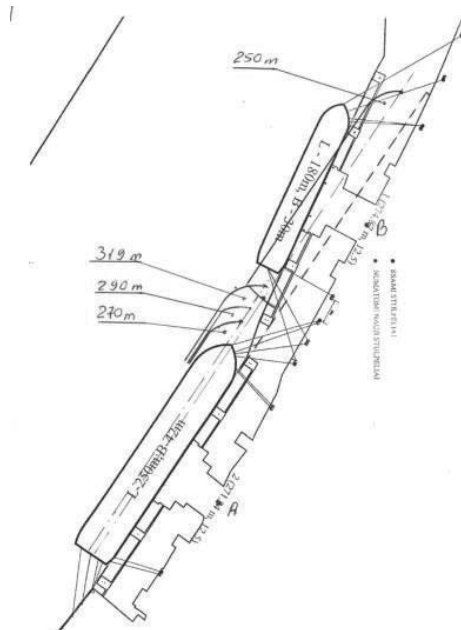


Fig. 15. Quay walls No. 1 and No. 2 suggested option

Summary in English

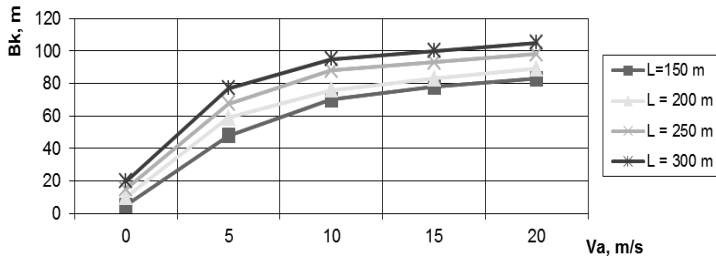


Fig. 16. Requested minimal navigational channel width for different ships length depends of the perpendicular wind direction on shallow waters (T/H about 0.8)



Fig. 17. The biggest ship entry until now in Klaipeda port: MEGA container vessel „MSC INGY“, length 400 m, width 59 m (2018.12.19)

On the basis of the research results obtained in the dissertation, the existing possibilities of Klaipeda port infrastructure allowed to increase the parameters of ships entering the port and maximize the use of the existing port infrastructure and plan its further development.

Recently, based on the dissertation investigation results, a study was made to survey the possibilities for vessels up to 400 m in length and up to 59 m wide (MEGA container ships – Class G) to call the port of Klaipeda. The study was approved by the customer (Klaipeda Smelte, Klaipeda State Seaport), Klaipeda State Seaport Master and MSC (Mediterranean Shipping Company).

General conclusions

1. The methodology for ship manoeuvre evaluation at port access and within port water area was supplemented with the forces and moments of the shallow water influence and the hydrodynamic effect of ship as a “wing”. The assessment methodology includes the main forces and ship motion moments. Evaluation of these elements will ensure greater shipping safety.
2. Following the comparative analysis of port infrastructure elements, the most important ship-to-port aspects to be considered in port development are:
 - shipping channels (depending on vessel length, width, draft);
 - turning basins parameters (depending on vessel length);
 - access to quays (depending on ship draft, propulsion complex characteristics).
3. Ship movement parameters are calculated using the extended mathematical model. Under specific conditions, the m/v OPTIMA SEAWAYS estimated rotational trajectory of 1020 m (experimental 1050 m) and stopping distance of 1200 m (experimental 1250 m). The error of calculation and actual measurement results in 1.3–4% which corresponds to SOLAS 74 Convention tolerances (+/- 10%).
4. Based on the results of analytical, numerical modelling and real experimental research, while maintaining the existing Klaipeda port infrastructure, the parameters of ships entering Klaipeda port are increased up to 25%, i.e. ship length up to 400 m, width – up to 59 m.
5. The parameters of Klaipeda, Gdansk, Gdynia, Ventspils and Ghent port channels, turning basins can be analysed through applied comparative analysis methods which enable a more accurate assessment of Klaipeda port infrastructure in order to accommodate largest ships that can navigate the Baltic Sea (length up to 400 m, width up to 60 m).
6. The results of the research carried out in the dissertation were applied to Feasibility study for the development of Klaipeda Port to the maximum possible depths (up to 17 m); used in optimal layout of berths No.1 and No.2 for their adaptation to possible maximum size tonnage (SUECMAX type ships); in preparation of LNG terminal navigation study (for standard and Q-Flex type LNG tankers); for optimal use of the southern part of Klaipeda port and other studies.

Klaipėdos universiteto leidykla

Donatas PAULAUSKAS

LAIVŲ MANEVRINIŲ SAVYBIŲ IR JŲ RYŠIO SU UOSTO
INFRASTRUKTŪROS PARAMETRAIS TYRIMAI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
transporto inžinerija (T 003)

THE RESEARCH ON SHIP'S MANEUVERABILITY AND ITS PARAMETERS
IN RELATION WITH PORT INFRASTRUCTURE

Doctoral dissertation

Technological sciences,
Transport Engineering (T 003)

Klaipėda, 2019

SL 1335. 2019 02 08. Apimtis 14,02 sąl. sp. l. Tiražas 40 egz.

Išleido ir spausdino Klaipėdos universiteto leidykla, Herkaus Manto g. 84, 92294 Klaipėda
Tel. (8 46) 398 891, el. paštas: leidykla@ku.lt; interneto adresas: <http://www.ku.lt/leidykla/>

