

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS

Irina PANASIUK

**ORO TARŠOS IŠ LAIVŲ JĖGAINIŲ  
MAŽINIMO TECHNOLOGIJŲ ĮDIEGIMO  
TYRIMAI**

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,  
TRANSPORTO INŽINERIJA (03T)

Klaipėda 2015

Mokslo daktaro disertacija rengta 2011–2015 metais, ginama Klaipėdos universitete pagal suteiktą Vilniaus Gedimino technikos universitetui kartu su Aleksandro Stulginskio universitetu ir Klaipėdos universitetu Lietuvos Respublikos švietimo ir mokslo ministro 2011 m. birželio 8 d. įsakymu Nr. V-1019 ir 2011 m. rugsėjo 29 d. įsakymu Nr. V-1748 Transporto inžinerijos mokslo krypties doktorantūros teise.

### **Mokslinis vadovas**

prof. habil. dr. Sergejus LEBEDEVAS (Klaipėdos universitetas, transporto inžinerija – 03T).

Klaipėdos universiteto Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

### **Pirmininkas**

prof. habil. dr. Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T)

### **Nariai**

prof. habil. dr. Vytautas PAULAUSKAS (Klaipėdos universitetas, transporto inžinerija – 03T),

dr. Laurencas RASLAVIČIUS (Kauno technologijos universitetas, transporto inžinerija – 03T),

prof. habil. dr. Bronislovas SPRUOGIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, transporto inžinerija – 03T),

dr. Rodolfo TACCANI (Triestės universitetas, transporto inžinerija – 03T).

Disertacija bus ginama viešajame Transporto inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje 2015 m. gruodžio 11 d. 13 val. Klaipėdos universitete, *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](mailto:ingrida.borisenko@ku.lt)

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2015 m. lapkričio 10 d.

Disertaciją galima peržiūrėti interneto svetainėje [www.ku.lt/mokslas/doktorantura](http://www.ku.lt/mokslas/doktorantura) ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto, Aleksandro Stulginskio universiteto bei Klaipėdos universiteto bibliotekose.

ISBN 978-9955-18-872-8

© Klaipėdos universiteto leidykla, 2015

© Irina Panasiuk, 2015

[irina.panasiuk@gmail.com](mailto:irina.panasiuk@gmail.com)

KLAIPĒDA UNIVERSITY

Irina PANASIUK

THE RESEARCH OF TECHNOLOGY  
INTRODUCTION OF AIR POLLUTION  
REDUCTION FROM SHIP  
PROPULSION

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,  
TRANSPORT ENGINEERING (03T)

Klaipėda 2015

Doctoral dissertation was prepared in 2011–2015, is defended at Klaipėda University according to the right to deliver doctoral studies in Transport Engineering, which was granted for Vilnius Gediminas Technical University together with Aleksandras Stulginskis University and Klaipėda University by the Act of the Minister of Education and Science (Republic of Lithuania) No. V-1019, signed on 8 June 2011 and No. V-1748, signed on 29 September 2011.

### **Scientific Supervisor**

Prof Dr Habil Sergejus LEBEDEVAS (Klaipėda University, Transport Engineering – 03T)

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

### **Chairman**

Prof Dr Habil Henrikas SIVILEVIČIUS (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – 03T)

### **Members**

Prof Dr Habil Vytautas PAULAUSKAS (Klaipėda University, Transport Engineering – 03T),  
Dr Laurencas RASLAVIČIUS (Kaunas University of Technology, Transport Engineering – 03T),

Prof Dr Habil Bronislovas SPRUOGIS (Vilnius Gediminas Technical University, Transport Engineering – 03T),

Dr Rodolfo TACCANI (University of Trieste, Transport Engineering – 03T).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Transport Engineering, in *Aula Magna* Conference room, Klaipėda University, at 1 p.m. on 11 December 2015.

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

Tel. (+370 46) 398 936; fax (+370 46) 398 999; e-mail [ingrida.borisenko@ku.lt](mailto:ingrida.borisenko@ku.lt)

A notifications of intend defending of the dissertation was send on 10 November 2015.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at the internet website, [www.ku.lt/mokslas/doktorantura](http://www.ku.lt/mokslas/doktorantura) and at the Libraries of Vilnius Gediminas Technical University Aleksandras Stulginskis University and Klaipėda University.

# Reziumė

Disertacijoje nagrinėjama oro taršos iš laivo jėginių mažinimo technologijų įdiegimo problematika. Pagrindinis tyrimo objektas yra laivo išmetamųjų dujų SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo technologijos. Disertacijos tikslas – sukurti SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo technologijos įdiegimo laive technologinio efektyvumo bei rentabilumo vertinimo metodologinius pagrindus ir juos realizuoti kompiuterinės programos pavidalu. Sukurtos programos taikymo sritis – priešprojektinė lyginamoji technologijų analizė, siekiant parinkti konkrečiam laivui optimalų naujų MARPOL 73/78 VI priedo reikalavimų vykdymo būdą.

Disertacijoje sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai: laivų išmetamųjų dujų SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo technologijų tarpusavio palyginimas, pagrindžiant jų taikymo racionalumą; plautuvių technologijos racionalaus instaliavimo laive metodologinių pagrindų sukūrimas (ekonominiai ir technologiniai aspektai); plautuvių technologijos efektyvumo vertinimas, siekiant užtikrinti Lietuvos laivyno atitiktį naujiems MARPOL 73/78 VI priedo reikalavimams; plautuvių technologijos pritaikymo laivuose eksperimentinio ir matematinio modeliavimo tyrimai.

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai, rezultatų apibendrinimas, naudotos literatūros ir autorės publikacijų disertacijos tema sąrašai bei priedai.

Įvadiniame skyriuje aptariama tiriamoji problema ir darbo aktualumas.

Pirmasis skyrius skirtas oro taršos iš laivo jėginių problematikos analizei. Jame pateikta: laivo išmetamųjų dujų kenksmingumo charakteristika; oro taršos iš laivų reguliavimo raida; oro taršos iš laivų mažinimo metodų analizė. Skyriaus pabaigoje formuluojamos išvados ir tikslinami disertacijos uždaviniai.

Antrajame skyriuje pateikti SO<sub>x</sub> plautuvių diegimo efektyvumo vertinimo metodologiniai pagrindai.

Trečiajame skyriuje pateikiami metodologinių pagrindų realizavimo principai kompiuteriniame komplekse ir aprašomas metodologijos Lietuvos laivynui vertinti taikymo matematinis modeliavimas.

Ketvirtajame skyriuje pateikiami plautuvės sistemos eksploatavimo sąlygomis eksperimentinio tyrimo rezultatai.

Disertacijos tema paskelbta 11 straipsnių: du straipsniai žurnale, įtrauktame į *Thomson ISI* sąrašą, vienas – *Inspec* duomenų bazėje cituojamame žurnale; trys – konferencijų medžiagose, referuotose *Thomson ISI* duomenų bazėje, vienas – tarptautiniame mokslo darbų rinkinyje; trys – recenzuojamose tarptautinių konferencijų medžiagose ir vienas – tarptautinio seminario medžiagoje. Disertacijos tema perskaityti aštuoni pranešimai Lietuvos ir kitų šalių konferencijose bei seminaruose.

# Abstract

The dissertation investigates the issues of problematics of air pollution reduction from ship propulsion. The main objects of research include technologies of SO<sub>x</sub> emission reduction. The primary purpose of this dissertation is to create the basis of evaluation of technological feasibility and economic efficiency of SO<sub>x</sub> emission reduction technology introduction and present the evaluation in the form of software. The scope of the software is the particular ship comparative analysis on pre-design phase, in order to select the optimal technology to comply with MARPOL 73/78 Annex VI requirements.

The dissertation approaches a few major tasks such as: the comparison of technologies of SO<sub>x</sub> reduction by demonstrating its introduction efficiency; the development of methodology basis of scrubber technology rational installation onboard (the economic and technological aspects); performance evaluation of scrubber's technology in order to ensure Lithuanian fleet compliance with the MARPOL 73/78 Annex VI requirements; studies of experimental and mathematical modeling of scrubber introduction onboard.

The dissertation consists of introduction, 4 chapters, conclusions, references, the author's publications on the dissertation topic and annexes.

The introduction reveals the investigated problem and importance of the thesis.

Chapter 1 revises problematics of air pollution from ship propulsion. It provides: characteristics of ship exhausts emission; the development of regulatory of air pollution from ships; the analysis of technologies of air pollution reduction from ships. The chapter ends with conclusions and revised dissertation tasks.

Chapter 2 presents methodological basis of the evaluation of SO<sub>x</sub> scrubber installation efficiency.

Chapter 3 presents the methodological framework of realization principles of software and describes the mathematical modeling of adaptation of the methodology of Lithuanian fleet assessment.

Chapter 4 presents results of the experimental research of scrubber system in operating mode.

11 articles focusing on the subject of the discussed dissertation are published: two articles – in the Thomson ISI register, one article – in the journal quoted by Inspec data base, three articles – in conference material and scientific papers in Thomson ISI data base, one article – in the scientific customize works, three articles – in material reviewed during international conferences and one article during an international seminar. 8 presentations on the subject have been given in conferences and seminars at national and international level.

---

# Žymėjimai

## Simboliai

$b_{emax}$	–	specifinės kuro sąnaudos esant maksimaliai variklio apkrovai
$b_{en}$	–	specifinės degalų sąnaudos
$B_{WL}$	–	laivo plotis projektinėje vaterlinijoje
$C_{equipment}$	–	įrangos pirkimo sąnaudos
$C_{design}$	–	projektavimo darbų sąnaudos
$C_{installation}$	–	įrangos instaliavimo sąnaudos
$C_{documentation}$	–	dokumentacijos paruošimo sąnaudos
$C_{LSHFO}$	–	mažasierių degalų kaina
$C_{HFO}$	–	HFO kaina
$\Delta C_{fuel}$	–	mažasierių ir HFO degalų kainų skirtumas
$C_{switching}$	–	degalų perjungimo išlaidos iš mažasierių į HFO

$C_{cargo}$	–	vienos tonos krovinio gabenimo vieną jūrmylę kaina
$C_{scrub\ maint.}$	–	plautuvės priežiūros išlaidos
$C_{scrub\ NaOH}$	–	išlaidos reagentams
$C_{scrub\ FW}$	–	vandens gėlinimo išlaidos
$C_{scrub\ En}$	–	papildomos energijos išlaidos
$C_B$	–	midelšpanhauto pilnumo koeficientas
$C_{WP}$	–	materlinijos pilnumo koeficientas
$E$	–	diskonto norma (infliacijos intensyvumas)
$f_{in}(t)$	–	įplaukos
$f_{out}(t)$	–	išmokos
$f_{net}(t)$	–	grynasis pinigų srautas
$f_{DCF}(t)$	–	diskontuotas pinigų srautas
$G_{fyear}$	–	metinės degalų sąnaudos
$G_{fuel}$	–	valandinės degalų sąnaudos
$G$	–	laivo masės centras
$G$	–	plautuvės masės centras
$\overline{GM}_L$	–	išilginis metacentrinis aukštis
$\overline{GM}$	–	skersinis metacentrinis aukštis
$\overline{GZ}$	–	atstojamasis petys
$\delta GZ$	–	atstojamojo peties nuokrypis
$K$	–	kilio linijos taškas (nulinė padėtis $Z$ ašies atžvilgiu)
$L_0$	–	stahiometrinė oro-degalų tiekimo konstanta
$L_{PP}$	–	laivo ilgis tarp statmenų
$M$	–	metacentras
$M_{TM}$	–	momento pokytis laivui nugrimzdus vieną metrą giliau
$M_{\theta}$	–	diferento momentas su plautuve
$m'_G$	–	laivo masė su plautuve
$m_{lightship}$	–	nepakrauto laivo masė
$m_g$	–	plautuvės masė
$\dot{m}_{gas}$	–	išmetamųjų dujų kiekis

$\dot{m}_{fuel}$	–	kuro sąnaudos
$nm$	–	metinis reisų atstumas
$P_{emax}$	–	maksimali variklio galia
$P_{en}$	–	nominalus variklio galingumas
$\bar{P}_e$	–	santykinis galingumas esant atitinkamam variklio darbo režimui
$R$	–	išilginis metacentrinis spindulys
$r$	–	skersinis metacentrinis spindulys
$T_{ECA}$	–	laivo eksploatavimo ECA rajonuose laikotarpis
$T_{ship\ exp.}$	–	likutinis laivo eksploatavimo laikotarpis
$t_{trip}$	–	reisų trukmė per metus, val./metus
$T_{MD}$	–	vidutinė laivo grimzlė
$\delta T_{MD}$	–	vidutinės laivo grimzlės pokytis
$\delta t_{KL}$	–	grimzlės skirtumas laivagalyje ir laivapriekyje
$w_i$	–	varbo režimo svertai
$X_{CG}, Y_{CG}, Z_{CG}$	–	laivo masės centrai X, Y, Z ašyse
$x_{CG}, y_{CG}, z_{CG}$	–	instaliuotos plautuvės masės centrai X, Y, Z ašyse
$\delta X_{CG}, \delta Y_{CG}, \delta Z_{CG}$	–	laivo su instaliuota plautuve masės centrų poslinkis X, Y, Z ašyse
$\alpha$	–	oro pertekliaus koeficientas
$\alpha(t)$	–	diskontavimo koeficientas, tenkantis konkrečiam laiko periodui
$\beta$	–	oro tiekimo santykis
$\rho$	–	vandens tankumas
$\varphi$	–	kreno kampas
$\delta\varphi$	–	kreno nuokrypis
$\delta\theta$	–	diferento nuokrypis

## Santrumpos

$CAPEX$	–	kapitalinės sąnaudos (angl. <i>Capital expenditures</i> )
$CO$	–	anglies monoksidas
$CO_2$	–	anglies dioksidas

<i>DFDS</i>	– Jūrų keltų kompanija
<i>DPBP</i>	– diskontuotas atsiperkamumo laikotarpis
<i>DWT</i>	– dedveitas
<i>EBITDA</i>	– investicijų pelningumas (angl. <i>Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization</i> )
<i>ECA</i>	– kontroliuojama emisijos teritorija (angl. <i>Emission Control Area</i> )
<i>EC</i>	– Europos Komisija (angl. <i>European Commission</i> )
<i>ES</i>	– Europos Sąjunga
<i>HC</i>	– angliavandeniliai
<i>HFO</i>	– sunkieji laiviniai degalai (angl. <i>Heavy Fuel Oil</i> )
<i>ICS</i>	– Tarptautinės laivybos rūmai (angl. <i>The International Chamber of Shipping</i> )
<i>IMO</i>	– Tarptautinė laivybos organizacija (angl. <i>International Marine Organization</i> )
<i>LNG</i>	– suskystintos dujos (angl. <i>Liquefied Natural Gas</i> )
<i>MARPOL 78/73 VI priedas</i>	– Tarptautinės konvencijos oro taršos iš laivų prevencijos taisyklės (angl. <i>International Convention for the Prevention of Air Pollution from Ships</i> )
<i>MDO</i>	– laivų dyzeliniai degalai (angl. <i>Marine Diesel Oil</i> )
<i>MEPC</i>	– Jūrų aplinkos apsaugos komitetas (angl. <i>Marine Environment Protection Committee</i> )
<i>MGO</i>	– laivų gazolis (angl. <i>Marine Gas Oil</i> )
<i>MRC</i>	– maksimali jėgainės apkrova (angl. <i>Maximum Continuous Rating</i> )
<i>NaOH</i>	– natrio hidroksidas
<i>NO<sub>x</sub></i>	– azotų oksidai
<i>NPV</i>	– dabartinė grynoji vertė
<i>NECA</i>	– kontroliuojama NO <sub>x</sub> emisijos teritorija (angl. <i>NO<sub>x</sub> Emission Control Areas</i> )
<i>OPEX</i>	– eksploatacinės sąnaudos (angl. <i>Operating expenditures</i> );
<i>PBP</i>	– atsiperkamumo laikotarpis (angl. <i>Pay Back Period</i> )
<i>PM</i>	– kietosios dalelės

<i>ROI</i>	–	investicijų pelningumo rodiklis
<i>ro-pax</i>	–	keleivinis laivas, į kurį gali įvažiuoti ir iš jo išvažiuoti transporto priemonės (angl. <i>Roll-on/Roll-off</i> )
<i>ro-ro</i>	–	krovininis laivas, į kurį gali įvažiuoti ir iš jo išvažiuoti transporto priemonės (angl. <i>Roll-on/Roll-off</i> )
<i>S</i>	–	siera
<i>SCR</i>	–	selektyvinis katalitinis redukavimas (angl. <i>Selective Catalytic Reduction</i> )
<i>SECA</i>	–	kontroliuojama SO <sub>x</sub> emisijos teritorija (angl. <i>SO<sub>x</sub> Emission Control Areas</i> )
<i>SO<sub>x</sub></i>	–	sieros oksidai
<i>Tier I, II, III</i>	–	MARPOL 73/78 VI priedo konvencijos normatyvų pakopos



---

# Turinys

ĮVADAS .....	1
Problemos formulavimas .....	1
Darbo aktualumas .....	3
Tyrimo objektas .....	5
Darbo tikslas .....	5
Darbo uždaviniai .....	5
Tyrimo metodika .....	6
Darbo mokslinis naujumas .....	6
Darbo rezultatų praktinė reikšmė .....	6
Ginamieji teiginiai .....	7
Darbo rezultatų aprobavimas .....	7
Disertacijos struktūra .....	8
1. ORO TARŠOS IŠ LAIVŲ JĖGAINIŲ PROBLEMATIKOS APŽVALGA	9
1.1. Oro taršos iš laivų reguliavimo raida .....	10
1.2. Oro taršos iš laivų mokslinių tyrimų analizė .....	14
1.3. SO <sub>x</sub> emisijos mažinimo technologijų analizė .....	20
1.3.1. Mažasieriai ir alternatyvūs degalai .....	20
1.3.2. LNG .....	22
1.3.3. Plautuvės .....	23

1.3.4. SO <sub>x</sub> emisijos mažinimo technologijų palyginimas.....	27
1.3.5. Šlapiųjų SO <sub>x</sub> plautuvių veikimo principas .....	28
1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas .....	33
<b>2. PLAUTUVĖS DIEGIMO EFEKTYVUMO VERTINIMO</b>	
<b>METODOLOGINIAI PAGRINDAI .....</b>	<b>37</b>
2.1. Plautuvės diegimo problematika .....	38
2.2. Plautuvės sistemos parinkimas .....	45
2.3. Plautuvės ekonominio efektyvumo vertinimas .....	53
2.4. Plautuvės technologinio efektyvumo vertinimas .....	61
2.5. Antrojo skyriaus išvados .....	71
<b>3. PLAUTUVĖS EFEKTYVUMO VERTINIMO MATEMATINIS</b>	
<b>MODELIAVIMAS .....</b>	<b>73</b>
3.1. Matematinio modeliavimo etapai .....	74
3.2. Matematinio modelio adaptavimas .....	84
3.2.1. Lietuvos laivyno apžvalga .....	84
3.2.2. Lietuvos laivyno modernizavimo vertinimas .....	87
3.2.3. Plautuvės diegimo efektyvumo vertinimas Ro-Pax kelte .....	89
3.4. Trečiojo skyriaus išvados .....	92
<b>4. PLAUTUVĖS TECHNOLOGIJOS EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI</b>	
<b>EKSPLOATAVIMO SĄLYGOMIS .....</b>	<b>95</b>
4.1. Eksperimento objektas .....	97
4.1.1. Laivo techninė charakteristika .....	97
4.1.2. Laivo eigos variklių techninė charakteristika .....	98
4.1.3. Plautuvės sistemos techninė charakteristika .....	99
4.2. Plautuvės sistemos išdėstymo laive patikrinimas .....	101
4.3. Ekologinių rodiklių matavimo tyrimų metodologija .....	106
4.3.1. Eksperimento atlikimo etapai .....	107
4.4. Eksperimento rezultatų apdorojimas.....	111
4.5. Ketvirtojo skyriaus išvados .....	114
<b>BENDROSIOS IŠVADOS .....</b>	<b>117</b>
<b>LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....</b>	<b>121</b>
<b>AUTORĖS PUBLIKACIJOS DISERTACIJOS TEMA .....</b>	<b>131</b>
<b>SUMMARY</b>	
<b>PRIEDAI .....</b>	<b>177</b>

---

# Contents

INTRODUCTION .....	1
Formulation of the problem .....	1
Topicality of the thesis .....	3
The object of the research .....	5
The aim of the thesis .....	5
The tasks of the thesis .....	5
The research methods .....	6
Scientific novelty .....	6
Practical significance of achieved results .....	6
Defended statements .....	7
Approval of the research results .....	7
The structure of the dissertation .....	8
1. THE OVERVIEW OF PROBLEMATICS OF AIR POLLUTION FROM SHIP PROPULSION .....	9
1.1. The development of regulatory of air pollution from ships .....	10
1.2. The research analysis of air pollution from ships .....	14
1.3. The analysis of SO <sub>x</sub> emissions reduction technology .....	20
1.3.1. Low sulphur fuel and alternative fuel .....	20
1.3.2. LNG .....	22
1.3.3. Scrubbers .....	23

1.3.4. The comparison of SO <sub>x</sub> emission reduction technology .....	27
1.3.5. The operating principle of wet SO <sub>x</sub> scrubber .....	28
1.4. The conclusions of the first chapter and the formulation of dissertation goals .....	33
<b>2. THE METHODOLOGICAL FRAMEWORK OF SCRUBBER INSTALLATION ASSESSMENT .....</b>	<b>37</b>
2.1. The problematic of scrubber installation.....	38
2.2. The selection of scrubber system .....	45
2.3. The economic assessment of scrubber .....	53
2.4. The technological assessment of scrubber .....	61
2.5. The conclusions of the second chapter.....	71
<b>3. THE MATHEMATIC MODELLING OF SCRUBBER EFFICIENCY ASSESSMENT .....</b>	<b>73</b>
3.1. Stages of the mathematic modelling .....	74
3.2. The adaptation of mathematic model .....	84
3.2.1. The review of the Lithuania fleet .....	84
3.2.2. The assessment of the Lithuania fleet modernization .....	87
3.2.3. The assessment of the efficiency of scrubber installation on Ro-Pax ship .....	89
3.4. The conclusions of the third chapter .....	92
<b>4. THE EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE SCRUBBER SYSTEM IN OPERATING CONDITIONS .....</b>	<b>95</b>
4.1. The object of the experiment .....	97
4.1.1. The technical characteristic of the ship.....	97
4.1.2. The technical characteristic of the ship's propulsion .....	98
4.1.3. The technical characteristic of the scrubber system .....	99
4.2. The verification of scrubber system location onboard .....	101
4.3. The measuring methodology of ecological indicators research .....	106
4.3.1. Stages of the experiment .....	107
4.4. Experiment results .....	111
4.5. The conclusions of the fourth chapter .....	114
<b>GENERAL CONCLUSIONS.....</b>	<b>117</b>
<b>REFERENCES .....</b>	<b>121</b>
<b>LIST OF THE AUTHOR'S SCIENTIFIC PUBLICATIONS ON THE TOPIC OF DISSERTATION .....</b>	<b>131</b>
<b>SUMMARY</b>	
<b>ANNEXES<sup>1</sup> .....</b>	<b>177</b>

---

<sup>1</sup>The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

---

# Ivadas

## Problemos formulavimas

Pasaulinė globalizacija daro įtaką prekybinių srautų augimui, dėl to šiandien apie 90 % pasaulinės prekybos objektų gabenama jūrų transportu ir per metus laivais gabenama daugiau nei 8 mlrd. t krovinių (IMO 2012). Lyginant su kitomis transporto rūšimis, laivybos išmetamas šiltnamio efektą sukeliančių dujų kiekis (t/km) yra sąlyginai nedidelis (Baltoji knyga, 2011). Tačiau intensyvus laivyno vystymasis turėjo įtakos metinių laivyno degalų sąnaudų augimui. Laivyba per metus sunaudoja apie 250÷325 mln. t, arba 9 % nuo pasaulinių bunkerinių degalų sąnaudų (Acciario 2014). Pusė šių degalų sunaudojama Europoje. Taigi, turint omenyje jūrų transporto sunaudojamų degalų kiekį, nuo kurio tiesiogiai priklauso oro taršos iš laivų intensyvumas, jau dabar laivynas kelia didelę grėsmę aplinkai. Atsižvelgiant į tai, kad pasaulinis prekybos intensyvumas tik didėja, vienintelė išeitis yra mažinti laivo jėginių kenksmingų išmetamųjų dujų emisiją.

Siekdama sumažinti aplinkos užterštumą, 1973 m. Tarptautinė jūrų organizacija (IMO) išleido MARPOL 78/73 konvenciją, kurios pagrindinis tikslas – mažinti jūrų transporto daromą neigiamą įtaką aplinkai. 1997 m. konvencija buvo papildyta oro taršos iš laivų prevencijos taisyklėmis – MARPOL 78/73 VI priedu. 2005 m. įsigaliojusiam VI priede nustatyta leistina kenksmingų dalelių koncentracija laivo išmetamosiose dujose, taip pat ženkliai sumažinta ir leistina kenksmingų azoto bei sieros oksidų ( $\text{NO}_x$  ir  $\text{SO}_x$ ) emisija (MARPOL 73/78 Annex VI 2008). Griežčiausi apribojimai, pagal MARPOL 78/73 VI priedą, yra taikomi emisijos kontrolės rajonuose (ECA), tarp kurių yra Baltijos, Šiaurės ir Viduržemio jūros, Jungtinių Amerikos Valstijų ir Kanados pakrantės bei daugelis kitų akvatorijų, kurios ateityje neišvengiamai išsiplės pasauliniu mastu (MARPOL 73/78 Annex VI 2008).

Oro taršos iš laivų mažinimo reikalavimų vykdymas yra susijęs su naujų technologijų įdiegimu laivybos sektoriuje. Šiuo metu galima išskirti šias perspektyvias oro taršos iš laivų mažinimo technologijas: alternatyvių degalų naudojimas ir išmetamųjų dujų valymas. Kiekviena iš technologijų pasižymi tam tikrais privalumais ir trūkumais, kurie plačiai analizuojami moksliniuose darbuose. Alternatyvūs degalai, tokie kaip suskystintosios dujos (LNG – *Liquefied Natural Gas*) ir biodegalai, net neįdiegus papildomų valymo įrenginių, užtikrina  $\text{NO}_x$  ir  $\text{SO}_x$  emisijos apribojimus. Pažymėtina, kad kainos atžvilgiu LNG ir biodegalai prilygsta sunkiesiems laiviniams degalams (HFO – *Heavy Fuel Oil*). Tačiau LNG reikalauja ženklų kapitalinių sąnaudų, susijusių su laivo modernizacija (variklio keitimas, sistemų bei vamzdynų keitimas ir t. t.). Svarbu ir tai, kad nepakankamai išvystyta LNG ir biodegalų pasiūla bei infrastruktūra. Todėl masinis pasaulinio laivyno pervedimas naudoti šio tipo degalus yra sunkiai įgyvendinamas. Degalai su maža sieros koncentracija (didžiąja dalimi tai MGO – *Marine Gas Oil*), kitaip vadinami mažasieriais, dėl sudėtingesnio gamybos proceso palyginti su HFO pasižymi ženkliai didesne kaina. Be to, mažasieriai degalai neužtikrina  $\text{NO}_x$  emisijos apribojimų ir reikalauja įdiegti papildomą įrangą, kad atitiktų MARPOL 73/78 reikalavimus. Išmetamųjų dujų plautuvės (angl. *scrubber*) analogiškai kaip ir mažasieriai degalai užtikrina tik  $\text{SO}_x$  emisijos mažinimą. Todėl, norint visa apimtimi vykdyti reikalavimus, tektų instaliuoti  $\text{NO}_x$  neutralizatorių. Kaip pagrindinį plautuvių privalumą galima išskirti galimybę naudoti pigesnius HFO ir atitikti

reikalaujamą  $SO_x$  emisiją laivo išmetamosiose dujose. Palyginti su mažesniais degalais plautuvės pasižymi ženkliai mažesnėmis eksploatacinėmis sąnaudomis. Tačiau plautuvių įdiegimas neišvengiamai reikalauja ženklių kapitalinių investicijų. Apibendrinant analizuotus mokslinius darbus, galima teigti, kad kiekvienos iš išvardytų technologijų diegimas su tam tikrais niuansais leidžia pasiekti reikiamą emisijos mažinimo efektą, tačiau jų rentabilumas turi būti vertinamas atsižvelgiant į konkretaus laivo charakteristiką.

Mokslininkai sutaria, kad kol kas nėra sukurtos technologijos, kuri būtų optimali visam pasauliniam laivynui, neatsižvelgiant į konkretaus laivo charakteristikas ir eksploataavimo rajoną. Pavyzdžiui, laivui, nuolat plaukiojančiam ECA rajonuose, trumpalaikėje perspektyvoje mažesniai degalai gali būti vertinami kaip tinkamiausia technologija, nereikalaujanti ženklių kapitalinių investicijų. Tačiau ilgalaikėje perspektyvoje išaugusios eksploatacijos sąnaudos (degalų kainų skirtumas) privers laivo savininką padidinti krovinio gabenimo kainą, o tai darys neigiamą įtaką laivo konkurencingumui lyginant su sausumos transportu. Todėl tik dalį laiko ECA rajonuose eksploatuojamuose laivuose tikslinga įrengti papildomą mažesnių degalų talpyklą, siekiant išvengti ženklių investicijų laivo modernizacijai. Laivams, nuolat eksploatuojamiems ECA rajonuose, plautuvių įdiegimas dėl ženklaus mažesnių degalų ir HFO kainų skirtumo atsipirks jau per keletą eksploataavimo metų.

Dėl neoptimalaus technologijos pasirinkimo ilgalaikėje perspektyvoje konkretaus laivo konkurencingumas sumažės. Todėl, vertinant viso laivyno mastu, emisijos mažinimo technologijų pasirinkimas tiesiogiai paveiks krovinių pasiskirstymą tarp laivybos ir sausumos transporto. Sprendžiant optimalios technologijos parinkimo (plautuvės arba mažesnių degalų) klausimą, šiame darbe pateikiami metodologiniai pagrindai, kurie remiasi technologiniais ir ekonominiais plautuvės diegimo aspektais.

## **Darbo aktualumas**

Oro taršos iš laivo jėginių mažinimas dabartiniu metu yra ypač aktualus dėl 2015 m. sausio mėnesį įsigaliojusio 0,1 %  $SO_x$  koncentracijos degaluose apribojimo ECA rajonuose, kuriems priskirtas ir Baltijos jū-

ros regionas. Kol kas šis apribojimas taikomas tik laivams, eksploatuojamiems minėtuose ECA rajonuose, tačiau nuo 2020 m. apribojimai bus taikomi ir globaliai – 0,5 % SO<sub>x</sub> koncentracijos degaluose (MARPOL 73/78 Annex VI 2008). Griežtesni MARPOL reikalavimai privertė laivų savininkus naudoti technologijas, mažinančias SO<sub>x</sub> emisiją. Pažymėtina, kad papildomos investicijos į naujas technologijas neišvengiamai daro įtaką gabenimo laivais kainos augimui. Netolimoje ateityje dalis krovinių iš jūros kelių gali persikelti į sausumą, o tai aplinkos taršos atžvilgiu tik pablogins esamą situaciją. Taigi technologijos pasirinkimas turi įtakos ne tik konkretaus laivo konkurencingumui lyginant su sausumos transportu, bet ir viso laivybos sektoriaus padėčiai rinkoje.

Šiuo metu daugelis laivų savininkų pasirinko lengviausią ir ženkliai kapitalinių investicijų nereikalaujantį būdą – naudoti mažesnius degalus. Tačiau ši technologija ilgalaikėje perspektyvoje, ypač didžiąją laiko dalį laivą eksploatuojant ECA rajonuose, pasižymi ženkliu degalų sąnaudų augimu, todėl tam tikrais atvejais nėra optimalus sprendimas.

Atsižvelgiant į tai, kad apie 80–90 % prekybinio laivyno per savo gyvavimo ciklą bent kartą įplaukia į ECA rajonus, vertinti naujų technologijų taikymo efektyvumą yra būtina. Daugelio siūlomų metodologijų vertinimas atliekamas tik ekonominiu aspektu, apskaičiuojant investicijų atsiperkamumo laikotarpį. Minėtas vertinimas efektyvus tik tuo atveju, jei laivo savininkas nori apsispręsti, kurią iš technologijų analizuoti detaliau. Kitaip tariant, tai pirmasis vertinimo etapas, kuriame nustatoma, ar, pavyzdžiui, plautuvės instaliacija atsiperks per laivo savininkui priimtina laikotarpį. Tuo atveju, jei atsiperkamumas tenkina laivo savininką, būtina atlikti technologinį vertinimą. Mokslininkai pritaria, kad, atsižvelgiant į plautuvės masę ir gabaritus, ji turės įtakos laivo jūrinėms charakteristikoms. Tačiau atlikti tyrimai nepakankamai susieti su ekonominiu vertinimu. Pažymėtina, kad papildomos įrangos instaliavimas daro tiesioginę įtaką tokioms svarbioms laivo savybėms kaip stovumas. Taigi, norint užtikrinti modernizuojamo laivo atitiktį projektinėms charakteristikoms, būtina ne tik sumažinti laivo dedveitą, bet ir imti papildomo balasto, siekiant išlaikyti horizontalią laivo padėtį.

Tokie pakeitimai darys tiesioginę įtaką ir technologijos rentabilumui. Papildomos įrangos masė ir balastas – tai proporcingas laivo keliamosios galios sumažėjimas arba negautas pelnas, atsisakius dalies krovinių. Šie ir kiti aspektai turi būti įvertinti, nustatant konkrečios technologijos efektyvumą. Formuojant technologijų efektyvumo vertinimo metodologinius pagrindus buvo atsižvelgta į paminėto technologinio vertinimo bei rentabilumo sąsają.

### **Tyrimo objektas**

Darbo tyrimo objektas – oro taršos iš laivo jėgainių mažinimo technologijos.

### **Darbo tikslas**

Darbo tikslas – sukurti SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo technologijos parinkimo metodologinius pagrindus, atsižvelgiant į konkretaus laivo parametrus. Remiantis parinkimo pagrindais, sukurti technologijos ekonominio ir technologinio efektyvumo vertinimo metodologiją, kuri bus taikoma, siekiant nustatyti optimalų MARPOL 73/78 reikalavimų vykdymo sprendimą konkrečiam laivui.

### **Darbo uždaviniai**

Darbo tikslui pasiekti iškelti šie uždaviniai:

1. Atlikti laivų išmetamųjų dujų SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo laivuose naudojamų technologijų analizę.
2. Suformuoti SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo technologijos parinkimo metodologinius pagrindus (ekonominiai ir technologiniai aspektai).
3. Eksperimentiniais tyrimais patikslinti plautuvės įrangos išdėstymo laive principus ir nustatyti dujų valymo efektyvumą realiomis įrangos eksploatavimo sąlygomis.

4. Remiantis suformuotais metodologiniais pagrindais, atlikti Lietuvos laivyno modernizacijos vertinimą, siekiant nustatyti prognozuojamą įtaką laivyno konkurencingumui.

### **Tyrimo metodika**

Disertacijos tyrimų pagrindą sudaro analitiniai, eksperimentiniai ir matematinio modeliavimo metodai. Matematiniam modeliavimui ir rezultatams apdoroti naudota *Microsoft Office* programinė įranga.

Eksperimentiniai tyrimai atlikti DFDS *Viktoria Seaways* laive eksploatuojant plautuvės sistemą reiso metu. Eksperimento metu naudota dujų emisijos matavimo įranga *Testo 350*, HGA, MAHA.

Lietuvos laivynui vertinti sukurta kompiuterinė programa, kurios tikslumas patikrintas analizuojamu instaliuotų plautuvių projektinės dokumentacijos pagrindu.

### **Darbo mokslinis naujumas**

Rengiant disertaciją, buvo gauti šie transporto inžinerijos mokslui nauji rezultatai:

1. Kompleksiškai ištirti  $SO_x$  emisijos mažinimo technologijų parinkimui ir pritaikymui įtakos turintys veiksniai.
2. Sukurti  $SO_x$  emisijos mažinimo technologijų efektyvumo ir rentabilumo vertinimo metodologiniai pagrindai, kurie realizuoti kompiuterinės programos pavidalu.
3. Atlikti eksperimentiniai plautuvės sistemos išdėstymo laive ir išmetamųjų dujų valymo efektyvumo vertinimo tyrimai.
4. Eksperimentinių tyrimų pagrindu patikslinta sukurta kompiuterinė programa.

### **Darbo rezultatų praktinė reikšmė**

Sukurti ir kompiuterine programa realizuoti  $SO_x$  emisijos mažinimo technologijų efektyvumo ir rentabilumo vertinimo metodologiniai pag-

rindai, kuriuos taikant ištirta Lietuvos laivyno modernizacijos įtaka sektoriaus konkurencingumui.

Sukurta kompiuterinė programa yra tinkama vertinti tiek pavienius konkrečių laivų modernizavimo atvejus, tiek ir visą laivyną.

Atlikti Lietuvos laivyno modernizacijos tyrimai ir nustatyta, kad tik 34 % viso Lietuvos laivyno (keltai, sausakrūviai) tikslinga modernizuoti, įdiegiant plautuves. Likusiems laivams – spec. paskirties, vilkikams, žvejybos laivams, kurie sudaro 66 % viso laivyno, dėl laivų amžiaus ir metinio sunaudojamų degalų kiekio tikslinga būtų naudoti mažesnius degalus.

### **Ginamieji teiginiai**

1. Sukurta laivo jėginių išmetamųjų dujų  $SO_x$  emisijos mažinimo technologijų naudojimo skirtingų tipų laivuose technologinių sprendimų ir lyginamojo rentabilumo vertinimo metodologija, su kurios pagalba, atlikus Lietuvos laivyno vertinimus, gauti nauji plautuvės sistemos eksploatacinio rentabilumo duomenys.
2. Sukurta plautuvės sistemos išdėstymo laive pasirinkimo metodologija, kuri patvirtinta 18 įvykdytų plautuvės instaliacijos projektų eksploatuojamuose laivuose tikrinamojo modeliavimo pagrindu.
3. Tiriant plautuvės sistemos išdėstymo laive ir dujų valymo efektyvumą realiomis laivo eksploataavimo sąlygomis, patikslinti atskirų sistemos mazgų išdėstymo laive principai bei nustatytas stabilus  $SO_x$  emisijos mažinimas iki MARPOL 73/78 VI priedo reglamentuojamo lygio.

### **Darbo rezultatų apibavimas**

Disertacijos tema yra atspausdinta 11 mokslinių straipsnių: du – mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Thomson ISI* sąrašą (Panasiuk and Lebedevas 2014; Panasiuk and Turkina 2015); vienas – mokslo žurnale, cituojamame *Inspec* duomenų bazėje (Panasiuk *et al.* 2014); trys – recenzuojamame tarptautinės konferencijos straipsnių rinkinyje (Panasiuk

2012a; Panasiuk 2013a; Panasiuk and Lebedevas 2013); trys – kituose tarptautinių ir respublikinių konferencijų straipsnių rinkiniuose (Panasiuk 2012b; Panasiuk 2012c; Panasiuk 2013b); vienas – recenzuojamame mokslinių darbų rinkinyje (Панасюк и Туркина 2015); vienas – recenzuojamame tarptautinio doktorantų seminario mokslinių darbų rinkinyje (Panasiuk 2015).

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti 8-iose mokslinėse konferencijose ir seminaruose Lietuvoje bei užsienyje:

- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“ 2012 ir 2013 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „Technologijos mokslo darbai Vakarų Lietuvoje“ 2012 m. Klaipėdoje;
- Tarptautinėje konferencijoje „Transport Means“ 2012 ir 2013 m. Klaipėdoje;
- Tarptautinėje konferencijoje „Transbaltika“ 2013 m. Vilniuje;
- Seminare pagal Laivų įrenginių ir aparatūros montavimo bei remonto technologijų kompetencijų tobulinimo programą „Technologinių naujovių bei gamybos / paslaugų plėtros tendencijos“ 2014 m. Klaipėdoje.
- Tarptautiniame doktorantų seminare „International PhD Seminar in Maritime Science“ 2015 m. Švedijoje.

## **Disertacijos struktūra**

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai: 1. Oro taršos iš laivų jėginių problematikos apžvalga; 2. Plautuvės diegimo efektyvumo vertinimo metodologiniai pagrindai; 3. Plautuvės efektyvumo vertinimo matematinis modeliavimas; 4. Plautuvės technologijos eksperimentiniai tyrimai eksploataavimo sąlygomis. Pateiktos darbo išvados, literatūros ir šaltinių sąrašas, santrauka anglų kalba, priedai.

Darbo apimtis (be priedų) – 196 puslapiai, tekste yra 39 numeruotos formulės, 48 paveikslai ir 12 lentelių. Rašant disertaciją buvo remiamasi 119 literatūros šaltiniais.

# 1

---

## Oro taršos iš laivų jėgainių problematikos apžvalga

Jūrų ir upių akvatorijų ekologinė pusiausvyra didžiąja dalimi priklauso nuo kenksmingų komponentų iš laivų jėgainių emisijos, kuri yra neatsiejama vidaus degimo variklio darbo proceso dalis. Todėl siekiant sumažinti oro taršą iš laivų jėgainių, būtina diegti kenksmingos emisijos mažinimo technologijas, tokias kaip alternatyvūs degalai arba išmetamųjų dujų plautuvės. Dėl aplinkai daromos žalos yra ypač aktualūs lokalų neigiamą poveikį sukeliantys  $SO_x$  ir  $NO_x$ . Šios medžiagos iškrinta rūgščiais lietumis, kurie sukelia lėtines plaučių ir kvėpavimo takų ligas. Pasaulyje per metus iš laivų išmetama apie 4,5÷6,5 milijonų tonų  $SO_x$ , tai sudaro apie 4 % visos pasaulinės  $SO_x$  emisijos, apie 5 milijonus tonų  $NO_x$ , arba apie 7 % visos metinės  $NO_x$  emisijos (Cullinane & Bergqvist 2014).

Oro užteršimas ypač aktualus intensyvios laivybos teritorijose, tokiose kaip Europos Sąjunga (ES). ES valstybės narės kontroliuoja daugiau nei 90 tūkst. kilometrų pakrančių, kuriose yra daugiau nei

1 200 prekybinių uostų. Europos laivų savininkai valdo 30 % pasaulio laivų ir 35 % pasaulinio laivyno tonažo (be kita ko, 55 % konteinerinių laivų ir 35 % tanklaivių). Šiais laivais vežamos prekės sudaro 42 % pasaulinės jūrų prekybos vertės. Per ES uostus kasmet vyksta daugiau nei 400 mln. keleivių. Daugiau kaip 20 % pasaulio tonažo sudarančių laivų registruota su ES valstybių vėliavomis, o ES bendrovės kontroliuoja per 40 % pasaulinio laivyno (Europos Komisija 2014).

Mokslininkai pripažįsta, kad laivai yra viena iš efektyviausių transporto priemonių, gali gabenti didžiulius krovinių kiekius palyginti mažomis sąnaudomis. Todėl laivybos srityje, skirtingai nei sausumos transporto sferoje, iki 1997 m. praktiškai nebuvo taikoma išmetamųjų dujų kenksmingumo apribojimų. Tačiau nepaisant to, kad laivyba ekologiniu požiūriu yra daug efektyvesnė, intensyvėjantys jūrų transporto srautai kelia vis didesnę susirūpinimą. Pažymėtina, kad oro tarša jūroje gana greitai ir dideliais atstumais pasklinda ore, todėl laivybos poveikis juntamas ir sausumoje. Turint omenyje, kad ES laivynas pagal eksploatuojamų laivų kiekį sudaro daugiau nei 40 % pasaulinio laivyno, oro tarša iš laivų ES pakrantėse kelia grėsmę ten gyvenantiems žmonėms. Mokslininkų buvo nustatyta, kad išlaikant dabartinę laivybos vystymąsi ir nesiimant atitinkamų veiksmų, kenksmingų dalelių emisija iki 2050 m. gali išaugti net 1,5–2 kartus ir tam tikrose teritorijose, kur laivybos srautai itin intensyvūs, gali viršyti sausumos transporto taršos lygį (IMO 2012). Dėl išvardytų priežasčių yra priimti įstatymai, ribojantys SO<sub>x</sub> ir NO<sub>x</sub> koncentraciją laivo išmetamosiose dujose.

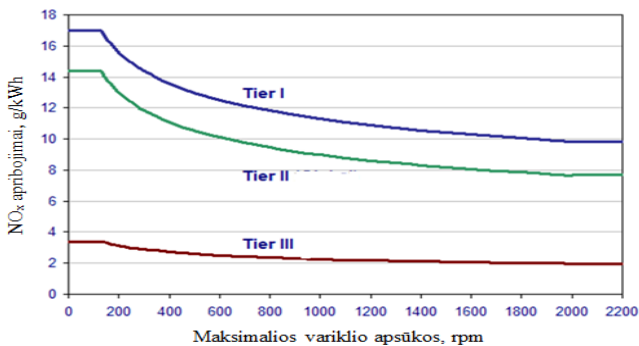
### 1.1. Oro taršos iš laivų reguliavimo raida

Besivystantis laivybos sektorius priverė peržiūrėti laivams keliamus aplinkos apsaugos reikalavimus. ES, siekdama išspręsti susidariusią problemą, sukūrė įvairių programų, skirtų aplinkos užteršimo kontrolei ir prevencijai. Buvo sukurta *ES Transportas 2050* strategija, kurioje išdėstyta efektyvesnė ir ekologiškesnė visų rūšių transporto veiklos sistema (Baltoji knyga 2011). Vandens transporto plėtrai koordinuoti Tarptautinė jūrų organizacija IMO sukūrė darbo grupę MEPC (*Marine Environment Protection Committee*), kuri atsakinga už laivybos išmetamųjų dujų emisijos mažinimo problemos sprendimą (Lloyd's Register 2012). Šiandien oro taršos iš laivų prevencija domisi ne tik mokslininkai ir politikai, bet ir laivų statytojai, remontininkai bei laivų savininkai. Tarptautinės laivybos rūmai (ICS – *The International*

*Chamber of Shipping*) sukūrė tinklalapį, kuriame pateikiami statistiniai duomenys apie srities pasirengimą sumažinti pasaulinį išmetamųjų dujų kiekių, skirtingų aspektų tyrimai, rekomendacijos ir kita naudinga informacija (EC 2012).

Pagrindinis oro taršos reguliavimo dokumentas yra 1973 m. IMO išleista Tarptautinė MARPOL 78/73 konvencija. 1997 m. buvo pateiktos oro taršos iš laivų prevencijos taisyklės (VI priedas), kurios įsigaliojo 2005 m (MARPOL 73/78 Annex VI 2008). VI priedas reglamentuoja leistiną kenksmingų dalelių koncentraciją laivo išmetamosiose dujose. Pagrindinis dėmesys VI priede skiriamas  $\text{NO}_x$  ir  $\text{SO}_x$ .

MARPOL 73/78 VI priedas yra suskirstytas į tris lygius (Tier I, Tier II, Tier III). Tier I lygio reikalavimai pristatyti 1997 m. kartu su konvencijos VI priedu. 2008 m. į VI priedą buvo įtraukti du nauji emisijos sugriežtinimo lygiai Tier II ir Tier III. Pagal VI priedo reikalavimus, 2000-aisiais metais ir vėliau pastatyti laivai, kurių variklių galingumas viršija 130 kW, turi atitikti Tier I lygio reikalavimus. Nuo 2011 m. sausio 1 d. įsigaliojo Tier II reikalavimai, o nuo 2016 m. įsigalios Tier III reikalavimai. Tier III lygio reikalavimai, skirtingai nei Tier I ir Tier II, negalios trumpesniems nei 24 metrai laivams, kurie naudojami tik pramoginiams tikslais arba laivams, kurių variklio galia neviršija 750 kW. Toliau pateiktas konvencijos įsigaliojimo grafikas  $\text{NO}_x$  atžvilgiu (DieselNet):

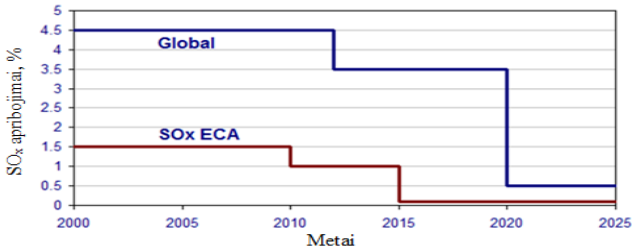


1.1 pav.  $\text{NO}_x$  emisijos apribojimai (MARPOL 73/78 VI priedas)

Fig. 1.1. Restrictions of  $\text{NO}_x$  emission (MARPOL 78/73 Annex VI)

1999 m. direktyvoje (su 2005 m. pakeitimais) reglamentuojamas sieros kiekis jūrų transporto priemonių naudojamuose degaluose. 2008 m. MARPOL 73/78 konvencijos patikslinto protokolo VI priede

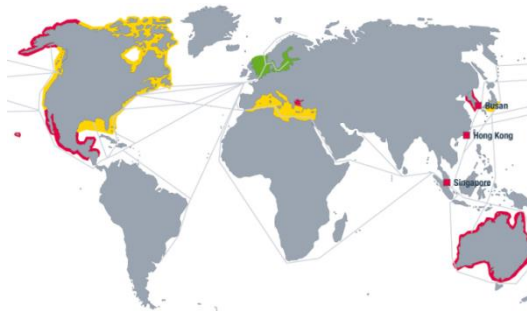
numatyta iki 2020 m. šį kiekį laipsniškai sumažinti net iki 0,5 %  $\text{SO}_x$  koncentracijos naudojamuose degaluose (DieselNet):



**1.2 pav.**  $\text{SO}_x$  emisijos apribojimai  
**Fig. 1.2.** Restrictions of  $\text{SO}_x$  emission

Vadovaujantis reikalavimais,  $\text{SO}_x$  emisija gali būti sumažinta dviem būdais: sumažinus degalų sieringumą iki atitinkamos koncentracijos arba išvalius išmetamąsias dujas iki ekvivalentiškos koncentracijos.

Naudojant direktyvos redakcijoje numatyti vadinamosios išmetamųjų teršalų kontrolės zonos ECA, kuriuose aplinka turi būti ypač saugoma (DieselNet):



**1.3 pav.** Teritorijos, kuriose keliamos griežtesnės toksinių junginių emisijos normos:

■ ECA; ■ planuojama prijungti; ■ svarstoma; — intensyvios laivybos magistralės  
**Fig. 1.3.** Areas where more stringent toxic emission standards are approved:  
■ existing ECA; ■ planned ECAs; ■ discussed ECAs; — most used trading routes

Prie šių zonų priskiriama: nuo 2006 m. Baltijos jūra; nuo 2007 m. Šiaurės jūra; nuo 2012 m. Šiaurės Amerikos ir Kanados pakrantės; nuo

2015 m. Pietų Korėja, Malakos sąsiauris, Viduržemio jūra (IMO 2012). Šioms teritorijoms gali būti suteiktas SECA arba NECA statusas ( $\text{SO}_x$  or  $\text{NO}_x$  Emission Control Areas), tuomet minėtuose rajonuose leistina sieros oksidų ir azoto oksidų emisija 3–5 kartus mažesnė nei pasauliniu mastu (1.2–1.3 pav.). Pažymėtina, kad MARPOL 73/78 direktyva taikoma teritoriniu pagrindu, t. y. bet kuris laivas, net ir nepriklausantis tos šalies laivynui, privalo atitikti jos akvatorijai taikomus reikalavimus.

Išanalizavus tokių zonų atsiradimo priežastį buvo nustatyta, kad laivo dyzeliai, aprūpinantys laivą elektros energija, nuolat dirba uosto teritorijoje, ir nors globaliu mastu laivai didelės įtakos bendram oro užterštumui nedaro, bet uostamiesčiuose išmetamųjų dujų rodiklis ženkliai padidėja: iki 10–30 % (Viana *et al.* 2014). Šiose zonose ekologinio fono pablogėjimas vyksta dėl šių priežasčių:

- dėl akvatorijos apribojimo toksiniai junginiai negali greitai išsisklaidyti ore;
- uosto teritorijoje pakrovimo / iškrovimo metu laivo dyzeliai dirba aukštais sūkliais.

Minėtose teritorijose padidėjęs laivybos intensyvumas verčia griežtinti laivams keliamus reikalavimus. Pavyzdžiui, Baltijos jūros baseino plotas tėra 0,12 % pasaulinio vandenyno ploto. Tačiau intensyvumas yra didžiulis: kasmet čia aptarnaujami daugiau nei 60 tūkst. laivų, kurių bendros kuro sąnaudos siekia 5,6 mln. t (per 1,6 % pasaulinio degalų sąnaudų). Dėl išvardytų priežasčių toksinių junginių emisija Baltijos jūroje ženkliai skiriasi (daugiau nei 13 kartų didesnė) nuo pasaulinio vidurkio: čia išmetama per 390 tūkst. t  $\text{NO}_x$  ir 135 tūkst. t  $\text{SO}_x$  (IMO 2009).

Analizuodami kitus regionus, kur jūrų transporto srutai taip pat dideli, matome, kad atskiros šalys savo iniciatyva stengiasi sumažinti akvatorijų užteršimą. Pavyzdžiui, nuo 2011 m. Singapūro uoste startavo kenksmingų junginių emisijos mažinimo programa. Pagal šią programą, laivams, kuriuose įdiegtos išmetamųjų dujų valymo sistemos arba naudojami mažasieriai degalai, taikomos 15 % mažesnės rinkliavos už stovėjimą uoste. Kiti uostai (Švedijos, Suomijos, JAV) įvedė papildomą oro taršos iš laivų mokestį ir apribojo laivų, neatitinkančių uosto keliamų reikalavimų, įplaukimą į akvatoriją (EMSA 2010; EMSA 2013).

Pažymėtina, kad MARPOL 73/78 VI priedas, vykdamas reikalavimus, leidžia taikyti tiek pirminius (mažasieriai ir alternatyvūs degalai), tiek ir antrinius (išmetamųjų dujų valymas) emisijos mažinimo metodus. Kadangi  $SO_x$  emisijos apribojimais įsigaliojo nuo 2015 m. sausio 1 d., tinkamos technologijos pasirinkimas tapo ypač aktualus. Daugelis laivų savininkų neskuba instaliuoti papildomos išmetamųjų dujų valymo įrangos ir kol kas naudoja mažasierius degalus. Tačiau daugelis atliktų mokslinių tyrimų rodo, kad šis metodas ilgalaikėje perspektyvoje tam tikrais atvejais (pavyzdžiui, kai laivas didžiąją dalį laiko praleidžia ECA rajonuose) yra nerentabilus. Todėl daugelis mokslinių tyrimų oro taršos iš laivo jėgainių srityje nukreipti lyginamajai skirtingų technologijų naudojimo analizei, siekiant nustatyti optimalų sprendimą ir išsaugoti laivybos konkurencingumą.

## 1.2. Oro taršos iš laivų mokslinių tyrimų analizė

Įsigaliojus MARPOL 73/78 VI priedo reikalavimams, mokslininkai pradėjo aktyviai analizuoti oro taršos iš laivų problematiką.

2008–2010 m. daugelis mokslinių tyrimų buvo nukreipta į laivo išmetamųjų dujų emisiją ir kenksmingų dalelių atsiradimo priežastis (EC 2005; Fridell *et al.* 2008; IMO 2009; Jalkanen *et al.* 2009a; Jalkanen *et al.* 2009b; HELCOM 2010; DNV 2009).

2010–2012 m. buvo išleistos ekonominės įtakos, įsigaliojus oro taršos mažinimo reikalavimams, vertinimo ataskaitos. Turku universiteto mokslininkai išsamiai ištyrė degalų savikainos augimą susietą su 0,1 %  $SO_x$  koncentracijos mažinimu ECA rajonuose (EMSA 2010). Švedijos, Vokietijos ir Didžiosios Britanijos mokslininkai savo darbuose pateikia degalų kainos augimo įtaką laivybos sektoriui ir uosto bendrovėms (Swedish Maritime Administration 2009; ENTEC 2009; German Shipowners Association 2010). Lygiagrečiai buvo tiriami ir atliekama  $SO_x$  emisijos mažinimo metodų lyginamoji analizė (ITMMA 2010, AEA Technology 2010, SKEMA 2010, Kruse 2012, MEPC 2009).

2010–2014 m. prie mokslininkų prisijungė ir įrangos gamintojai, pradėję aktyviai bendradarbiauti su mokslo institucijomis. Tuo laikotarpiu pasirodė eksperimentinių plautuvių instaliacijos tyrimų ataskaitos (Wärtsilä 2010; Wärtsilä 2011; Wärtsilä 2012; Wärtsilä

2013; Wärtsilä 2014; LLOYD 2012; DNV 2012; ABS 2013; MAN 2013; MAN 2014).

2011–2015 m. atlikus daugelį eksperimentinių tyrimų, atsirado plautuvių valymo procesų aprašymų, įrangos galimumo parinkimo metodologija, instaliavimo laive instrukcijų, plautuvės sistemos išdėstymo laive ir eksploatavimo ypatumų bei kitų veiksmų, susijusių su įrangos projektavimu, aprašymų (Glosten 2011; Yang *et al.* 2012; Lack *et al.* 2012; Walter and Wagner 2012; Tai and Dung-Ying Lin 2013; Brynolf *et al.* 2014; Kennan 2014; Shinas *et al.* 2014).

ES oro taršos iš laivų problematika buvo tiriama dviem kryptimis:

- ✓ kenksmingos emisijos / koncentracijos vertinimas tiek regiono, tiek ir ES mastu;
- ✓ emisijos mažinimo technologijų rentabilumo ir technologinio tinkamumo vertinimas, lyginant skirtingus metodus tarpusavyje.

*Laivybos emisija ES vandenyse.* Kompleksiškai išanalizuota jūrinio transporto įtaka aplinkai, pateikiant pramonės ir visų transporto rūšių emisijos apimties lyginamąją analizę pasauliniu mastu (Whall *et al.* 2002). Tai buvo vienas pirmųjų mokslinių darbų, kuriame buvo išskirta ES jūrinio transporto įtaka aplinkai lyginant su sausumos emisija. Minėtame darbe buvo panaudoti *Lloyds Marine Intelligence Unit* 2000 m. tyrimų rezultatai, kuriuose buvo aprašyta emisijos vertinimo metodologija ir pateikti skirtingų tipų laivų emisijos statistiniai duomenys (LMIU 2000). Stavrakaki *et al.* (2005) įvertino ne tik bendrą emisiją, bet ir išskyrė laivo emisiją jūroje, uoste, vidaus vandenyse, 12 ir 200 mylių laivui nutolus nuo kranto. Įvertinus skirtingų regionų jūrinio transporto emisijos lygį, buvo pasiūlyta taikyti skirtingus taršos iš laivų vertinimo metodus: atskirų jūrinio transporto magistralių ir regionų užterštumas; konkrečios valstybės laivyno; atsižvelgiant į degalų pardavimo ir suvartojimo apimtį; atsižvelgiant į gabenamų krovinių kieki; proporcingai lyginant su sausumos emisija (Stavrakaki *et al.* 2005). Laivybos emisija buvo analizuojama ir ES užsakytame tyrime (De Ceuster *et al.* 2007), kuriame pateikiama visų rūšių transporto įtaka oro užterštumui. Emisijos skaičiavimo metodologijoje pateikiamas patobulintas *Remove* modelis, kuris buvo sukurtas siekiant įvertinti skirtingų transporto rūšių emisijos apimtį ir numatyti emisijos augimo intensyvumą atskirose valstybėse 1995–2020 m. Minėtas modelis buvo sukur-

tas dar 1997 m., tačiau jame buvo pateikiamas tik sausumos transporto vertinimas. Remiantis Whall *et al.* (2002) atliktu tyrimu 2010 m. modelis buvo papildytas laivybos emisijos vertinimu. Cofala *et al.* tyrimuose, kurie apima laivybos emisijos įtaką oro kokybei ES vandenyse ir pakrantėse, pateiktas laivybos emisijos intensyvumas 12 mylių atstumu nuo Baltijos, Šiaurės, Viduržemio, Juodosios jūrų ir Atlanto vandenyno pakrančių (Cofala *et al.* 2007). Minėtame tyrime didelis dėmesys skiriamas SO<sub>x</sub> ir NO<sub>x</sub> emisijai, o tyrimų rezultatai 2010–2012 m. praplečiami atsižvelgiant į 2010 m. Getenburgo protokolą – emisijos mažinimo planą (Wagner *et al.* 2010, Hammingh *et al.* 2012). Kiti autoriai (Chiffi *et al.* 2007; Schrooten *et al.* 2009) pateikia statistinius duomenis apie laivų tipus, eksploatuojamus ES vandenyse, gabenamų krovinių tipus bei apimtis ir kiekvienam laivo bei krovinio tipui priskiria emisijos kiekį. Kadangi ECA rajonuose SO<sub>x</sub> emisijos reikalavimai sugriežtinti net iki 0,1 %, mokslininkai prognozuoja naujų ECA zonų atsiradimą, pagrįsdami savo tyrimus emisijos intensyvumo parametrais (Campling *et al.* 2012). Didėjantis mokslininkų susidomėjimas ir ES finansavimas paskatino atlikti regioninius atskirų valstybių emisijos intensyvumo vertinimus. De Meyer *et al.* (2008) savo tyrimuose pateikia Belgijos CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> emisijos apimtis per 2003–2004 m. laikotarpį ir palygina juos su bendra ES emisija. Praplėtus analizuojamą laikotarpį iki 2010 m., buvo atnaujintas Belgijos laivybos emisijos vertinimas (Schrooten *et al.* 2009). Atsižvelgus į Marmuro jūros laivybos intensyvumą, buvo atliktas emisijos kiekio skaičiavimas, įvertinant eksploatuojamų laivų ir jų jėgainių tipus, plaukimo greitį ir kt. (Deniz, Durmusoglu 2008). Danijos tarptautinės laivybos ir žvejybos emisijos tyrimas buvo atliktas Winther (2008), įvertinus vietines degalų sanaudu apimtis. Marmer *et al.* (2005, 2009) pateikė laivybos emisijos statistinius duomenis Viduržemio jūroje per 2000–2008 m. laikotarpį. Pietinės Europos dalies valstybių akvatorijos yra labiau užterštos nei Vakarų Europa (Vestreng *et al.* 2007). Whall *et al.* (2010) tyrime nustatyta atskirų regionų emisija, t. y. Didžiosios Britanijos, įskaitant Šiaurės jūrą ir Anglijos kanalą (Whall *et al.* 2010). Atsižvelgiant į augantį laivybos intensyvumą, Graikijos pakrantėse buvo atliktas 1984–2008 m. laikotarpio emisijos vertinimas (Tzannatos 2010a). 2008–2009 m. Tzannatos (2010b) išanalizavo kasmetinę emisijos intensyvumą Graikijos pakrantėse, atsižvelgiant į sezoniškumą ir laivybos intensyvumą. Šiaurės

jūros uostų teritorijų užterštumas analizuojamas (Cotteleer, van der Tak 2011a; 2011b; Cotteleer, Hulskotte 2012; Hammingh *et al.* 2012). NO<sub>x</sub> emisijos problematika ir mažinimo metodų efektyvumas analizuojamas Danish EPA (2012) tyrime. Degalų sąnaudų ir atitinkamai emisijos apimtis Baltijos jūroje pateikti (EPA 2008; Smailys *et al.* 2009; Smailys *et al.* 2012; Baltoji knyga 2011; Lloyd's Register 2012; Jalkanen *et al.* 2009b; Jalkanen *et al.* 2012; Smailys *et al.* 2012; Europos Komisija 2014). Jalkanen *et al.* savo tyrimuose patikslino laivo degalų sąnaudų skaičiavimo metodiką ir susiejo emisijos intensyvumą su variklio darbo režimais. Atskirų regionų mokslininkų aktyvumas skiriasi priklausomai nuo oro taršos intensyvumo ir atitinkamai tyrimų finansavimo iš valstybės arba ES fondų. Tačiau didžioji dalis ES valstybių tiria ne tik bendrą ES emisijos problematiką, bet ir adaptuoja tyrimus konkrečiam regionui vertinti: Danijai (Danish EPA 2012), Norvegijai (AMAP 2011; DNV 2012), Švedijai (Isakson *et al.* 2001), Ispanijai (Querol *et al.* 1996; Velders *et al.* 2011; Viana 2008; Chiffi *et al.* 2007; Pandolfi *et al.* 2011), Nyderlandams (Velders *et al.* 2011; Berkhout *et al.* 2012; Hammingh *et al.* 2012; Schembari *et al.* 2012), Turkijai (Marmer, Langmann 2005), Didžiąjai Britanijai (Dore *et al.* 2007; Buhaug *et al.* 2009), Italijai (Marmer *et al.* 2005; Marmer *et al.* 2009; Becagli *et al.* 2012), Airijai (Hellebust *et al.* 2010) ir kitiems.

*Emisijos mažinimo metodų analizė.* Atsižvelgiant į 2005/33/EC direktyvą, atliktas sausumoje taikomų SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo metodų rentabilumo vertinimas, pritaikant juos laivuose (Bosch *et al.* 2009). Analogiškus tyrimus atliko (Faber *et al.* 2009; Faber *et al.* 2012; Paxian *et al.* 2010; Campling *et al.* 2010; Campling *et al.* 2012; Miola *et al.* 2010; Miola *et al.* 2011). Gautų duomenų pagrindu atliekamas laivybos ir sausumos transporto konkurencingumo vertinimas mažinant oro taršą. Jalkanen *et al.* (2009) išanalizavo sieros koncentracijos mažinimo kainą Baltijos ir Šiaurės jūrų regionuose. Nikopoulou (2008) išskiria Šiaurės jūros SO<sub>x</sub> ir NO<sub>x</sub> emisijos mažinimo, naudojant naujas technologijas, problematiką. Corbett ir WInebrake (2012) analizuoja alternatyvių degalų naudojimo laivuose problematiką. DNV (2009) ir *Green Ship of the Future* (2012) analizuoja iššūkius, susijusius su mažasierių degalų naudojimu laivuose, taip pat degalų savikainą, perjungimo išlaidas, variklio gedimą ir kita. Rozmarinowska (2012) pateikia skirtingų SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo metodų taikymo galimybes Baltijos jūros re-

gione. EMSA (2010) įvertina alternatyvių degalų naudojimo įtaką skirtingų tipų laivų eksploatacijos sąnaudų augimui. Kalli *et al.* (2009) įvertina transportavimo laivais kainų augimą, susietą su mažasierių degalų naudojimu. MEPC (2009) pateikia išsamų laivo išmetamųjų dujų valymo technologijų aprašymą, išvardija kiekvienos sistemos diegimo problematiką. Analogiška tema analizuota *Lloyds* (2012). *Wic* (2010) įvertino vidutinių apskukų laivo variklių emisijos mažinimo galimybes. ABS (2013) tyrimuose pateikiamas išmetamųjų dujų plautuvių veikimo principas, aprašant skirtingų tipų plautuvių ypatumus. *Kjølholt et al.* (2012) išanalizavo atvirojo kontūro plautuvių naudojimo problematiką ir pabrėžė, kad daugelyje uostų ECA rajonuose draudžiama išpilti naudotus vandenis iš plautuvės sistemos į uosto akvatoriją. Todėl atvirojo kontūro plautuvėms taikomi atitinkami naudojimo apribojimai, ir, autorių nuomone, tikslinga būtų naudoti mišraus kontūro plautuves. *Wärtsilä* (2011) pateikė siūlomos plautuvės sistemos instaliacijos etapus, nurodyma pagrindinių sistemos elementų išdėstymo laive reikalavimus. *Wärtsilä* (2012) aprašė gamintojo sukurtas SO<sub>x</sub> ir NO<sub>x</sub> emisijos mažinimo technologijas, pabrėžė jų efektyvumą ir taikymą modernizuojant eksploatuojamus laivus. *Wärtsilä* (2013) nurodė plautuvės projektavimo etapus (nuo plautuvės parinkimo iki instaliavimo), trumpai aprašė kiekvieno etapo problematiką. *Wärtsilä* (2014) pateikė trumpas plautuvės parinkimo rekomendacijas. MAN (2014) aprašė siūlomas skirtingų tipų plautuves, pritaikytas dvitakčiams varikliams. MAN (2014) aprašė sausojo ir šlapiojo tipo plautuves, nurodė reagentų, vandens, energijos poreikio skaičiavimo metodologiją. *Walet, Wagner* (2012), pateikdami plautuvės parinkimo metodologiją, išskiria esminius skirtumus tarp sausojo ir šlapiojo tipo plautuvių. Vertindami plautuvės įdiegimo efektyvumą, *Walet, Wagner* pateikė plautuvės kapitalinių sąnaudų formavimo metodiką, aprašė plautuvėje naudojamų medžiagų skaičiavimo principą. Tačiau rekomenduojami skaičiavimai susieti su variklio apkrova. Pažymėtina, kad vertinant plautuvės efektyvumą priešprojektinėje stadijoje tikslūs variklio darbo režimai dažniausiai nėra žinomi. Todėl skaičiavimams būtų patogiau naudoti medžiagų poreikį, susietą su degalų sąnaudomis. Kalli (2013) įvertino plautuvių įdiegimo efektyvumą, pritaikant jas ES laivyne. Vertinimas atliktas naudojant statistinį ES degalų sąnaudų kiekį, palyginus plautuvės ir mažasierių degalų naudojimo savikainą. *Donaldson* (2014) pateikė iš-

metamo dujų kiekio skaičiavimo metodologiją, kuri gali būti taikoma parenkant plautuvės debetą.

Apibendrinant galima teigti, kad oro taršos iš laivų emisija ištirta išsamiai. Esamos emisijos mažinimo technologijos aprašytos ir palygintos tarpusavyje. Įvertintas laivo eksploatacijos sąnaudų padidėjimas dėl įsigaliojusių reikalavimų sugriežtinimo. Išvardyti technologijų diegimą ribojantys veiksniai. Aprašytos skirtingų technologijų efektyvumo palyginimo metodikos. Tačiau plautuvės instaliavimo problematika aprašyta nepakankamai. Būtina pažymėti, kad plautuvės įrangos instaliavimą daugeliu atvejų aprašo įrangos gamintojai, nepateikdami konkrečių skaičiavimų. Mokslinių tyrimų šioje srityje nepakanka. Daugelis tyrimų aprašo konkretaus laivo plautuvės instaliavimo atvejį, nepateikdami sistemos parinkimo ir išdėstymo laive metodologijos. Tyrimuose trūksta plautuvės sistemos įtakos laivo stovumui vertinimo. Tokie skaičiavimai atliekami rengiant plautuvės instaliavimo projektą ir nėra skelbiami viešai. Atliekant stažuotes, laivo stovumo apskaičiavimai buvo gauti iš gamintojų ir laivų savininkų (plautuvės projektai). Tačiau atviroje prieigoje (moksliniuose tyrimuose) stovumo vertinimo duomenų nepakanka. Vertinant plautuvės įdiegimo rentabilumą, moksliniuose tyrimuose pasigendama pelno sumažėjimo vertinimo, susijusio su būtiniais laivo pakeitimais pradiniam stovumui atkurti. Todėl rengiant plautuvės technologijos rentabilumo vertinimo metodologinius pagrindus išvardyti trūkumai buvo patikslinti. Išanalizavus skirtingų laivų plautuvių diegimo projektus, metodologiniai pagrindai, supaprastinus tam tikrus skaičiavimus, buvo pritaikyti skirtingos paskirties laivų modernizacijai vertinti instaliuojant plautuvę.

Plautuvės ir mažasieriai degalai neužtikrina  $\text{NO}_x$  emisijos mažinimo iki reikalaujamo lygio. Todėl, siekiant užtikrinti  $\text{NO}_x$  emisijos sumažėjimą, tiek plautuvės, tiek ir mažasierių degalų naudojimo atveju būtina instaliuoti papildomą neutralizavimo įrangą. Atsižvelgiant į vienodus  $\text{NO}_x$  emisijos mažinimo trūkumus, šie aspektai disertacijoje nevertinami. Plautuvės ir mažasierių degalų technologijų efektyvumas vertinamas tik  $\text{SO}_x$  aspektu.

### 1.3. SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo technologijų analizė

2015 m. sausio 1 d. ECA rajonuose, įsigaliojus SO<sub>x</sub> emisijos apribojimo reikalavimams, naujų technologijų diegimas, siekiant atitikti laivams keliamus reikalavimus, tapo aktualus kiekvienam laivui, kuris eksploatuojamas minėtuose rajonuose. Jau įsigalioję ECA rajonų apribojimais pastebimai paveikė juose eksploatuojamų laivų rentabilumą. Ateityje tokių rajonų tik daugės. Atsižvelgiant į tai, kad didžioji dalis prekybinio laivyno per savo gyvavimo ciklą bent kartą įplaukia į ECA rajonus, SO<sub>x</sub> reikalavimai paveiks praktiškai kiekvieno laivo savininką.

Pažymėtina, kad didžioji dalis laivų, plaukiojančių su Lietuvos vėliava, eksploatuojama būtent ECA rajonuose. Todėl efektyvus SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo metodų parinkimas yra gyvybiškai svarbus ir Lietuvos laivybos sektoriui. Atitinkamai įmonės, orientuotos į laivybą, turės pasirinkimą: pasitraukti iš ECA rajonų arba investuoti į SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo technologijų diegimą. Šiuo metu galima išskirti tokias SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo technologijas:

- ✓ Mažasieriai ir alternatyvūs degalai, kuriuose sieros koncentracija atitinka keliamus MARPOL 73/78 reikalavimus;
- ✓ Plautuvės, kuriomis išvalomi laivo jėgainių išmetami dūmai ir užtikrinami SO<sub>x</sub> emisijos reikalavimai.

Išvardytos technologijos vis dar yra bandymų stadijoje, todėl jas lydi specifiniai technologiniai ir eksploataciniai iššūkiai, kurie toliau bus aptarti ir palyginti tarpusavyje.

#### 1.3.1. Mažasieriai ir alternatyvūs degalai

Vidutinis ES laivybos sektoriuje naudojamų degalų sieringumas yra apie 2,7 % (MAN 2013). Kaip paminėta, šis skaičius turi būti sumažintas iki 0,1 % 2015 m. ECA rajonuose. Lengviausias ir, atrodytų, priimtinausias metodas būtų tiesiog sumažinti sieros koncentraciją degaluose ir naudoti išvalytus mažasierius degalus (sieros koncentracija <0,1 %). Tačiau mažasierių degalų gamybos procesas yra gerokai sudėtingesnis už įprasto HFO gamybą. Be to, mažasierių degalų su mažesne nei 0,1 % SO<sub>x</sub> koncentracija gamybos technologija yra sudėtinga. Desulfurizacijos procesas reikalauja didesnių energijos sąnaudų, o tai, be didesnių gamybos kaštų, turi įtakos šiltnamio efektą sukeliančių dujų

augimui net iki 6,5 %. Norint užtikrinti atitinkamo kiekio degalų gamybą, būtina modernizuoti pačias naftos perdirbimo gamyklas. Gamyklos modernizavimas pareikalautų nemažų investicijų. Atsižvelgiant į tai, kad dėl pasaulinio ekonominio nuosmukio naftos perdirbimo įmonės jau dabar dirba ne visu pajėgumu, šis iššūkis joms gali būti nepakeliamas. Šiandienos naftos pramonė yra nepajėgi pagaminti reikiamą kiekį mažasierių degalų. Todėl rinkoje atsiranda pasiūlos trūkumas, kas gerokai padidina mažasierių degalų kainą.

Kaip alternatyvą galima naudoti LNG (suskistintos gamtinės dujos), biodegalus, metanolį ir t. t. Skirtingai nei mažasieriai ir biodegalai bei metanolis, LNG reikalauja ženkliai modernizuoti laivą. Todėl šia degalų rūšį aptarsime atskirai 1.3.2 poskyryje.

Siekiant užtikrinti 0,1 %  $SO_x$  koncentraciją be didesnių investicijų, gali būti taikomas švaresnio kuro, pavyzdžiui, biokuro, ir įprasto kūro maišymo metodas. Tačiau kol kas biodegalai yra brangūs palyginti su HFO. Pažymėtina, kad dauguma laivo variklių pritaikyti HFO arba MDO (angl. *Marine diesel oil*). Todėl perėjimą prie mažasierių degalų gali lydėti variklio efektyvumo sumažėjimas arba gedimai eksploataavimo metu. Tyrimų duomenimis, pagrindinės variklių gedimų priežastys – sumažėjęs degalų klampumas, rūgštingumas ir degimo kokybė. Siekiant užtikrinti saugų variklio eksploatavimą naudojant mažasierius degalus, laive būtina instaliuoti papildomas talpyklas, vamzdynus, modifikuoti degalų tiekimo sistemą ir kita (Smailys *et al.* 2012; EMSA 2010).

Šiuo metu laivai, kurie ECA zonose praleidžia ne visą laivo eksploataavimo laikotarpį, siekdami sumažinti sąnaudas, mažasierius degalus naudoja tik įplaukę į ECA, likusį laiką naudoja HFO. Be abejo, tai ženkliai sumažina laivo sąnaudas, tačiau laivo pervedimą vartoti dviejų rūšių degalus lydi ženklios variklio modifikavimo išlaidos. Priklausomai nuo variklio tipo, toks modifikavimas gali kainuoti 350 000 € ir daugiau. Be to, pats perjungimas vyksta kelias papildomas valandas vienos kelionės metu, dėl to patiriama papildomų nuostolių, kurie gali siekti 30 000 € per metus (EPA 2008), atsižvelgiant į tai, kad nuo 2000 m. per dešimtmetį degalų kaina pakilo beveik 2,8 karto ir siekė 322 €/tona (Bunkerworld 2015). Remiantis pesimistiniu scenarijumi, priklausomai nuo  $SO_x$  koncentracijos, jų savikaina gali padidėti net iki 60 %:

**1.1 lentelė.** Degalų kainos priklausomybė nuo  $SO_x$  koncentracijos

**Table 1.1.** Fuel price and  $SO_x$  content dependencies

<b><math>SO_x</math> koncentracija</b>		<b>Degalų kaina (€/tona)</b>	<b>Padidėjimas nuo HFO</b>
<b>Nuo</b>	<b>Iki</b>		
3,5 %	1,5 %	322–357	5
1,5 %	1,0 %	357–370	8
1,0 %	0,5 %	370–490	45
0,5 %	0,1 %	490–557	60

Be ženkliai brangesnio mažasierių degalų gamybos proceso, jų kainai įtaką daro ir mažėjanti rinkos pasiūla. Taigi jų pranašumas gali būti pagrįstas tik tuo atveju, jei kiti metodai dėl konkretaus laivo charakteristikų (amžiaus, laivo vertės, eksploatavimo intensyvumo ir t. t.) nebus tinkami naudoti. Tuo tarpu plautuvės su 90 % valymo efektyvumu leidžia naudoti 3,5 %  $SO_x$  koncentracijos degalus ir vis dar atitinka 0,1 %  $SO_x$  reikalavimus (SKEMA 2010).

### 1.3.2. LNG

Vienas perspektyviausių metodų sumažinti laivo išmetamųjų dujų toksiškumą – naudoti LNG kaip alternatyvą įprastiems degalams. Tuo užtikrinama laivo atitiktis tiek  $SO_x$ , tiek ir  $NO_x$  reikalavimams. Todėl laivų savininkai vis labiau domisi galimybėmis pritaikyti esamą laivą LNG.

Iki šiol LNG, kaip degalai, buvo naudojami tik dujovežiuose. Pirmasis LNG varomas dujovežis buvo pastatytas Japonijoje 1993 m. Vėliau buvo pastatyti dar trys tokio tipo laivai. Iki pat 2000 m. susidomėjimas tokio tipo degalais buvo sumažėjęs, ir tik 2009 m. Norvegijos laivybos įmonė *I. M. Skaugen* užsisakė šešis LNG varomus dujovežius, kurie buvo pastatyti Kinijoje (Skaugen 2010). Didžiausias trikdys plėtoti LNG yra infrastruktūros trūkumas. LNG tinka ne tik naujai statomiems laivams, bet ir modernizuojamiems laivams. Didžioji modifikuotų laivų dalis yra keleiviniai keltai ir ofšoriniai laivai, priklausantys Japonijos ir Norvegijos įmonėms (IMO 2012). Atliktų tyrimų rezultatai rodo, kad laivo pritaikymo LNG procesas yra įmanomas, tačiau vis dėlto jis yra ganėtinai sudėtingas ir reikalauja ženkliai modifikuoti variklį, įrengti

didesnes degalų saugojimo talpyklas, specialią degalų tiekimo sistemą ir t. t.

Nepaisant sudėtingo laivų modifikavimo ir LNG infrastruktūros stokos, šio tipo degalai ekonomiškai yra patrauklesni nei mažasieris kuras ar biodegalai. Jų atsiperkamumo laikotarpis siekia 1–3 metus (GL and MAN 2011). Tikimasi, kad ateityje kaip ir šiandien LNG kaina išliks panaši kaip HFO. Tai reiškia, kad šie degalai yra daug patrauklesni ekonominiu atžvilgiu nei mažasieriai degalai. Turint omenyje, kad LNG užtikrina  $SO_x$  ir  $NO_x$  reikalavimų atitikimą, šių degalų pranašumas ateityje tik didės. Tačiau mokslininkai pripažįsta, kad dėl sudėtingo laivo modifikavimo LNG technologija yra tinkama naujų laivų projektavimo stadijoje. Modernizuojant ši technologija yra sudėtinga ir daugeliu atvejų nerentabili.

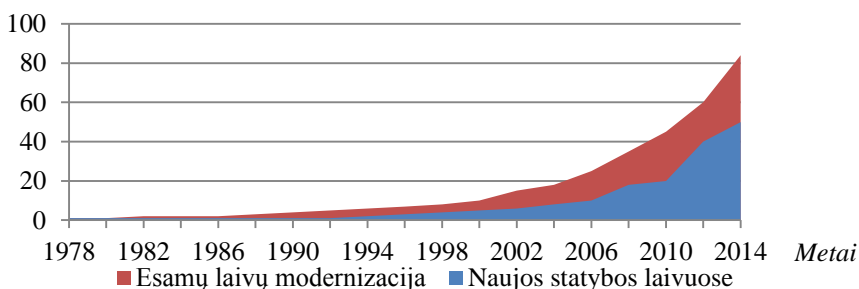
### 1.3.3. Plautuvės

MARPOL 73/78 VI priedas kaip alternatyvą sieros koncentracijos degalų mažinimui leidžia taikyti antrinius (nemotorinius) išmetamųjų dujų toksiskumo mažinimo metodus, prie kurių priskiriamos ir plautuvės. Kol kas plautuvės nėra plačiai taikomos, tačiau 2015 m., įsigaliojus naujiems  $SO_x$  reikalavimams, susidomėjimas šia technologija išaugo. Tam įtakos turėjo ir ženklus HFO bei mažasierių degalų kainų skirtumas 235 €/t, arba 59 % (Bunkerworld 2015). Todėl šiandien vis daugiau laivų įrangos gamintojų įsitraukia į išmetamųjų dujų valymo sistemų kūrimą.

Antriniais išmetamųjų dujų valymo metodai pradėti taikyti gamyklose dar prieš 80 metų. Todėl pati technologija gerai žinoma ir išbandyta. Tačiau laivuose šis metodas pirmą kartą buvo išbandytas tik 1960 m. ir iki pat 1990 m. nebuvo aktyviai tobulinamas ir bandomas realiomis sąlygomis. Sugriežtėjus laivams keliamiems reikalavimams, atsirado ir plautuvių tobulinimo bei pritaikymo laivuose poreikis. Todėl įrangos gamintojai ėmė aktyviai siūlyti savo sukurtas sistemas. Šiuo metu tokios įmonės kaip *Hamworthy*, *Marine Exhaust Solution*, *Wärtsilä* ir kitos yra instaliavusios per 80 plautuvių, kurios patvirtino išmetamųjų dujų valymo efektyvumą: iki 99 %  $SO_x$  ir iki 60 % PM (MINTC 2009).

Kiekvienais metais vis didėja tiek naujai statomų, tiek ir modernizuojamų laivų plautuvių užsakymų. Nuo 1978 iki 2006 m. laivuose buvo instaliuota iki 25 plautuvės sistemų, o nuo 2006 iki 2014 m. plautuvių skaičius išaugo 4 kartus – iki 84 (NABU 2015):

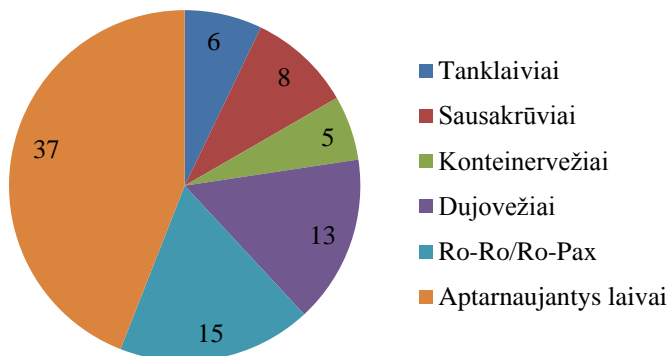
Plautuvės, vnt.



**1.4 pav.** Plautuvės sistemų instaliacija nuo 1978 iki 2014 m.

**Fig. 1.4.** The installation of scrubber system from 1978 to 2014 year

Plautuvių instaliacija pagal laivų tipus pasiskirstė nevienodai:



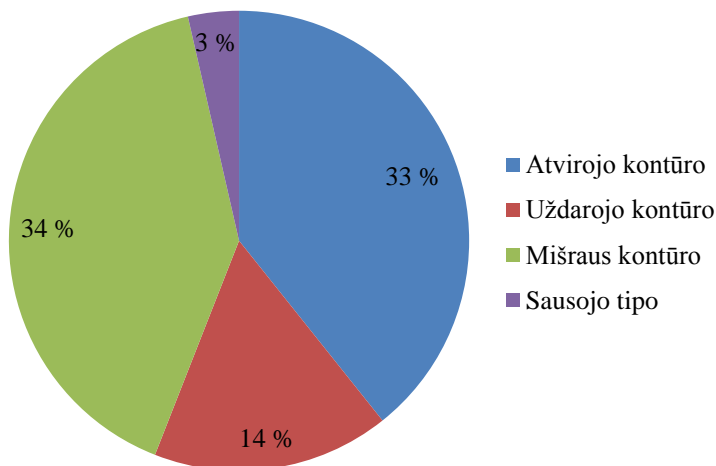
**1.5 pav.** Instaliuotų plautuvių pasiskirstymas pagal laivų tipus

**Fig. 1.5.** Installed scrubbers distribution by ship type

Aptarnaujančiuose laivuose, keltuose ir dujovežiuose instaliuota didžioji dalis plautuvės sistemų. Šį faktą galima paaiškinti laivų, kurie didžiąją laiko dalį plaukioja ECA rajonuose, eksploataavimo specifika.

Šiuo metu yra sukurti du plautuvių tipai: sausasis (angl. *dry*) ir šlapiasis (angl. *wet*). Taip jie apibūdinami pagal savo veikimo principą. Sausasis veikia be vandens ir valo išmetamąsias dujas cheminiais reagentais. Šlapijojo tipo plautuvėse naudojamas vanduo. Sausojo tipo

plautuvių naudojimas yra beveik du kartus brangesnis už šlapiojo. Todėl laivams siūlomos šlapiojo tipo plautuvės, kurios taip pat skirstomos į atvirojo (angl. *sea water*) ir uždarojo (angl. *fresh water*) bei mišraus kontūro sistemas. Tiek atvirojo, tiek uždarojo kontūro plautuvės yra efektyvios ir tinkamos naudoti naujai statomuose ir modernizuojamuose laivuose. Iki 1990 m. laivuose buvo bandoma diegti sausojo tipo plautuvės, kurios buvo plačiai taikomos sausumos pramonėje. 2010–2012 m., gaminant plautuvių sistemas, buvo pradėta nuo paprastesnės atvirojo kontūro plautuvės konstrukcijos. Vystant sukurtas technologijas, atsirado ir uždarojo kontūro sistemos, kurios išsprendė naudoto vandens išpylimo problemą. Vėliau atsirado mišri sistema, kurios pagrindinis privalumas – galimybė eksploatuoti sistemą uosto akvatorijoje ir sumažinti išlaidas atviroje jūroje. Todėl šiuo metu pastebima atvirojo ir mišraus kontūro sistemų paklausa:



**1.6 pav.** Instaliuotų plautuvių pasiskirstymas pagal sistemos tipus  
**Fig. 1.6.** Installed scrubbers distribution by system type

Technologiniu požiūriu plautuvės yra efektyvios, tačiau gana masyvios, todėl mažesniuose laivuose būtų sunku jas instaliuoti. Projektuojant naujai statomą laivą, plautuvės gabaritai įvertinami dar projek-

tavimo stadijoje. Tačiau modernizuojant laivą, plautuvė turės įtakos laivo stovumui. Dar vienas ne mažiau svarbus trūkumas – krovinio masės sumažėjimas, dėl kurio laivo savininkas patirs papildomų nuostolių. Eksploatavimo metu aprūpinant sistemą patiriami 1–3 % energijos nuostoliai, dėl to padidėja degalų sąnaudos. Tačiau lyginant su mažesnių degalų gamyba, kurios metu dėl sudėtingesnio technologinio proceso energijos sąnaudos padidėja maždaug 6,5 %, plautuvės turi pastebimą pranašumą (EPA 2008). Vertinant ekonominius aspektus, būtina pabrėžti, kad pati sistema yra brangi ir, priklausomai nuo plautuvės tipo bei instaliavimo sąlygų, jos kaina gali siekti 200–400 €/kW arba, priklausomai nuo jėgainės galingumo, – 1–6 mln. € (MINTC 2009, DNV 2012, Wärtsilä. 2014).

Vertinant atvirojo ir uždarojo kontūro plautuvių kainas pažymėtina, kad atvirojo kontūro plautuvės panaudotą jūros vandenį išleidžia atgal į jūrą. Dėl didelės SO<sub>x</sub> koncentracijos naudotame vandenyje atvirojo kontūro plautuvės negali būti naudojamos daugelyje ES uostų akvatorijų. Todėl net ir būdamos žemesnės kainos, jos neturi ženklaus pranašumo, lyginant su uždarojo kontūro plautuvėmis. Šiuo metu plautuvių savikaina atbaido laivų savininkus. Tačiau vertinant ekonominių plautuvių patrauklumą, būtina paminėti, kad jų atsiperkamumas siekia 1–2 metus naujai statomuose ir 2–6 metus modernizuojamuose laivuose (GL and MAN. 2011; DNV 2012; Wärtsilä. 2014). Plautuvių atsiperkamumas priklauso ne tik nuo sistemos tipo ir laivo charakteristikų bei plaukiojimo rajono, bet ir nuo plautuvę instaliuojančios laivų statyklos galimybių.

Nepaisant išvardytų trūkumų, plautuvės yra pranašesnės už mažesnius degalus tiek technologiniu, tiek ir ekonominiu požiūriu. Tačiau jos užtikrina tik SO<sub>x</sub> reikalavimų atitiktį. Atsižvelgiant į 2016 m. naujus NO<sub>x</sub> reikalavimus, laivų savininkai bus priversti kartu su plautuvėmis instaliuoti ir NO<sub>x</sub> neutralizuojančią įrangą, kuri dar labiau padidins laivo savininko išlaidas.

Tai rodo vis didėjančią laivų savininkų susidomėjimą šiuo išmetamųjų dujų valymo metodu ir skatina įrangos gamintojus dar aktyviau kurti bei testuoti savo sistemas. Nors plautuvių eksploatavimas realiomis sąlygomis įrodė jų efektyvumą, tačiau atliktų tyrimų nepakanka. Šis metodas vis dar yra kūrimo ir bandymų stadijoje, todėl gali būti lydimas įvairių techninių nesklandumų.

### 1.3.4. SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo technologijų palyginimas

Nepriklausomai nuo pasirinktos technologijos, papildomų išlaidų išvengti nepavyks. Tačiau būtina pabrėžti, kad kiekviena technologija pasižymi savo investavimo specifika. Pvz., mažasierių degalų naudojimas pasižymi nedidelėmis kapitalinėmis sąnaudomis ir trumpalaikėje perspektyvoje yra patrauklus laivų savininkams. Tačiau šie degalai dėl ženkliai didesnės savikainos (56 % brangesni už HFO) ilgalaikėje perspektyvoje gali tapti neefektyvūs. LNG naudojimas pasižymi ženkliais kapitalinėmis investicijomis, tačiau dėl mažesnės savikainos (artimos HFO) šie degalai gana greitai atsiperka. Bet dėl technologinių sunkumų LNG modernizacija eksploatuojamuose laivuose praktiškai netaikoma. Savo ruožtu plautuvei įdiegti taip pat reikia ženklių kapitalinių investicijų. Tačiau tai leidžia vietoje mažasierių degalų naudoti HFO, ir tai užtikrina sąlyginai trumpą atsipirkimo laikotarpį. Todėl plautuvės technologija ilgalaikėje perspektyvoje pasižymi efektyvumu, nepaisant kapitalinių sąnaudų (Asariotis and Benamara 2012; DNV 2012). Apibendrinus 1.2.1–1.2.3 poskyriuose išvardytus technologijų taikymo privalumus ir trūkumus, pateikiama lyginamoji analizė:

#### 1.2 lentelė. SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo technologijų palyginimas

**Table 1.2.** The comparison of SO<sub>x</sub> emission reduction technologies

Kriterijus	Privalumai	Trūkumai
<b>Mažasieriai ir biodegalai</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>nesudėtingas perėjimas nuo HFO (tuo atveju, jei nėra būtina variklio modifikacija);</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>sudėtingas degalų gamybos procesas;</li> <li>didesnė savikaina lyginant su HFO;</li> <li>degalų pasiūlos trūkumas;</li> <li>turi įtakos variklio gedimui;</li> <li>padidina degalų sąnaudas.</li> </ul>
<b>LNG</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>pašalina 90–100 % SO<sub>x</sub>, 60 % NO<sub>x</sub>, 70 % PM ir 25 % CO<sub>2</sub>;</li> <li>kaina artima HFO;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>reikalauja variklio ir laivo modifikacijos;</li> <li>laivo modifikacija labai sudėtinga ir brangi;</li> <li>LNG infrastruktūros trūkumas.</li> </ul>

Kriterijus	Privalumai	Trūkumai
Plautuvė	<ul style="list-style-type: none"> <li>pašalina 90–99 % SO<sub>x</sub> ir 60–85 % PM, 10 % NO<sub>x</sub>;</li> <li>suteikia galimybę naudoti HFO;</li> <li>palyginti trumpas atsipirkimo laikotarpis;</li> <li>tinka naujai statomiems ir modifikuojamiems laivams.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>nėra iki galo išbandyta realiomis sąlygomis;</li> <li>reikalauja ženklių investicijų;</li> <li>padidina degalų sąnaudas;</li> <li>būtinos atliekų talpyklos;</li> <li>sumažina krovinių laivo tūrį;</li> <li>neužtikrina NO<sub>x</sub> reikalavimų, todėl būtina papildoma įranga NO<sub>x</sub> neutralizuoti.</li> </ul>

Kiekvienos iš pateiktų technologijų diegimą eksploatuojamame laive lydės technologiniai ir eksploataciniai sunkumai. Tačiau atsižvelgiant į konkretaus laivo charakteristikas ir eksploataavimo sąlygas, pasireiškia tam tikros technologijos pranašumai.

### 1.3.5. Šlapiųjų SO<sub>x</sub> plautuvių veikimo principas

Šlapiosio tipo plautuvės yra skirstomos pagal prijungimo ir naudojamo reagento tipą bei veikimo kontūrą.

Pagal plautuvės prijungimą prie pagrindinio variklio ir pagalbinį generatorių jos yra skirstomos į:

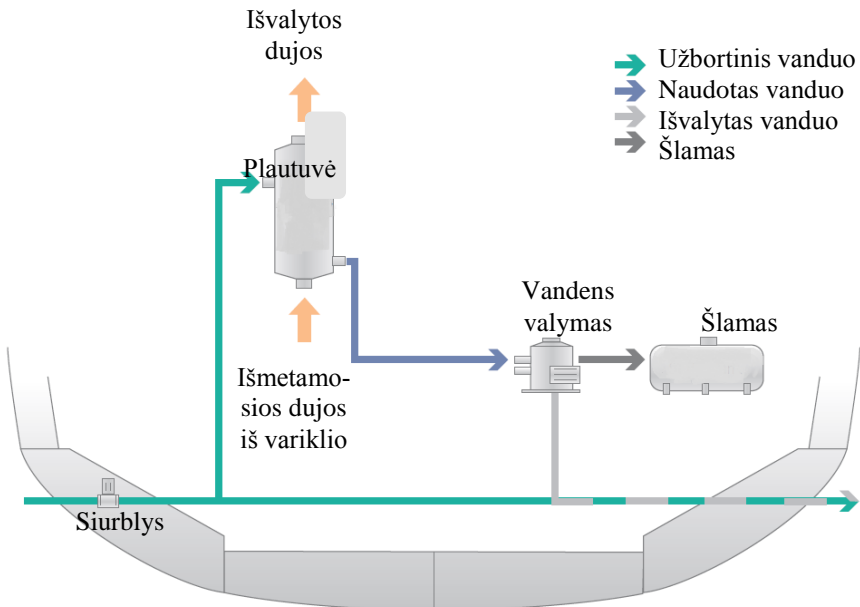
- ✓ pagrindinio srauto;
- ✓ integruotos.

Pagrindinio srauto plautuvės jungiamos tiesiogiai prie laivo jėgainės išmetamojo trakto. Tokios sistemos privalumai yra pigesnis įrengimas bei eksploatavimas palyginti su integruota plautuve, kurios vamzdiniais prijungiamos prie kelių laivo jėgainių. Abiejų tipų sistemos yra skirtos visų tipų laivams ir gali būti įdiegiamos tiek naujame, tiek ir eksploatuojamame laive.

Šlapiosios plautuvės pagal veikimo kontūrą skirstomos į:

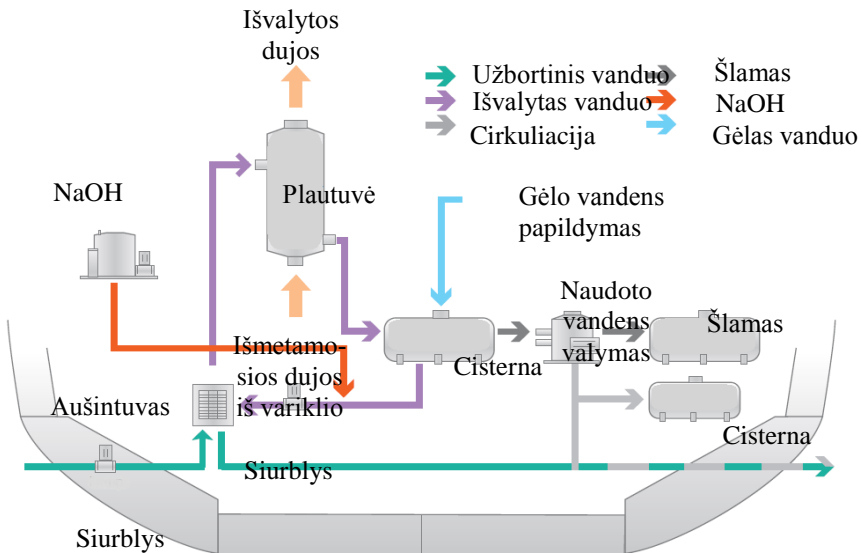
- ✓ atvirojo kontūro;
- ✓ uždarojo kontūro;
- ✓ mišraus kontūro.

Atvirojo kontūro sistemoje išmetamosioms dujoms valyti naudojamas jūros vanduo. Visas naudotas sistemoje vanduo yra išvalomas ir išleidžiamas. Vanduo iš kingstono dėžių siurbliais ir vandens cirkuliacijos vamzdynais tiekiamas į plautuvę. Išmetamojo trakto vamzdynais iš variklio į plautuvę tiekiami išmetamieji dūmai. Plautuvėje užbortiniu vandeniu dujos valomos ir išvalytos išleidžiamos į aplinką. Naudotas vanduo cirkuliacijos vamzdynais nukreipiamas į sūkurinį separatorių, kuris atskiria vandenį ir kenksmingas daleles. Susidaręs šlammas tiekiamas į saugojimo cisterną, kur jis sandėliuojamas iki pristatymo į krantą. Išleidžiamas išvalytas vanduo lygiomis dalimis sumaišomas su užbortiniu vandeniu, siekiant kuo labiau suvienodinti išpilamo ir jūros vandens pH. Sistemos veikimo principas pagrįstas jūros vandens šarmingumo naudojimu valymo procese. Jūros vandenyje esantys šarmai jungiasi su išmetamosiose dujose esančiais sieros oksidais ir paverčia juos nekenksmingais sieros sulfatais. Atvirojo kontūro sistemos principinė schema pavaizduota 1.7 paveiksle (Lloyd's Register 2012).



**1.7 pav.** Atvirojo kontūro plautuvė  
**Fig. 1.7.** Open loop scrubber

Uždarojo kontūro plautuvės naudoja chemiškai apdorotą gėlą vandenį. Sistemos veikimo principas panašus į atvirojo kontūro sistemas. Vanduo yra tiekiamas į plautuvę keliose jos vietose, o išbėgęs iš plautuvės patenka į sukurinį separatorių, kur visos kenksmingos nuotekos atskiriamos nuo vandens ir patenka į saugojimo cisterną. Sistema nuo atvirojo kontūro sistemos skiriasi tuo, kad uždarojo kontūro sistemoje išmetamosioms dujoms valyti naudojamas cheminis reagentas (NaOH). NaOH maišomas su gėlu vandeniu ir tiekiamas į plautuvę. Gėlas vanduo sistemai gali būti tiekiamas iš atskiro rezervuaro, skirto plautuvės sistemai, iš geriamojo vandens rezervuaro arba iš gėlinimo įrenginių, jei tokie naudojami. Uždarojo kontūro sistemos schema pavaizduota 1.8 paveiksle (Lloyd's Register 2012):

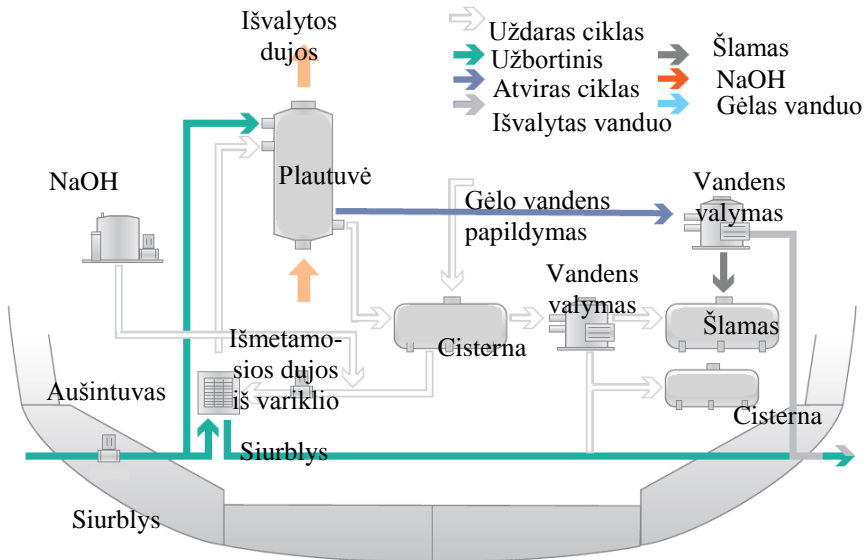


1.8 pav. Uždarojo kontūro plautuvė

Fig. 1.8. Close loop scrubber

Mišri sistema yra sudaryta iš uždarojo ir atvirojo kontūro sistemų. Abi sistemos suderintos taip, kad papildytų viena kitą ir panaikintų abiejų sistemų trūkumus. Mišraus kontūro sistemą sudaro tie patys elementai kaip ir uždarojo kontūro sistemą, tačiau yra naudojami du van-

dens valymo įrenginiai. Centrifuginis vandens valymo įrenginys naudojamas tada, kai sistema dirba uždaru ciklu, o sukūrinis separatorius tada, kai sistema dirba atvirojo kontūro režimu. Kad sistema galėtų veikti dviem skirtingais režimais, kai kurie sistemos elementai turi turėti dviejopą veikimo paskirtį. Jūros vandens siurblys, sistemai veikiant uždaruju ciklu, tiekia vandenį aušintuvui, o sistemai veikiant atviroju ciklu, tiekia papildomą vandenį maišymui su išpilamu vandeniu. Gėlo vandens siurblys, sistemai veikiant uždaruju ciklu, užtikrina gėlo vandens cirkuliaciją sistemoje, o sistemai veikiant atviroju ciklu, tiekia vandenį iš kingstoninių dėžių į plautuvę. 1.9 paveiksle pavaizduota principinė mišrios sistemos schema (Lloyd's Register 2012):



1.9 pav. Mišraus kontūro plautuvė

Fig. 1.9. Hybrid type scrubber

Atsižvelgiant į mišraus kontūro sistemos lankstumą (prireikus pereiti prie atvirojo kontūro ir atvirkščiai), 2013–2015 m. laivyboje pradėta taikyti būtent ši sistema. Iki šiol nėra įteisinti griežti naudoto plautuvių vandens išpylimo už borto reikalavimai. Tačiau vis dažniau IMO išreiškia susirūpinimą galima neigiama užteršto užbortinio vandens įtaka. Todėl tiek įrangos gamintojai, tiek ir laivų savininkai

neabejoja, kad griežtesnių naudoto vandens išpylimo reikalavimų įteisinimas yra tik laiko klausimas. Dėl ženklių kapitalinių investicijų į plautuves, tokios įrangos modifikavimas ar keitimas neigiamai paveiks ir šiaip sumažėjusį laivybos konkurencingumą lyginant su sausumos transportu. Todėl šiuo metu būtina rinktis išmetamųjų dujų valymo įrangą, kuri atitiktų net ir griežčiausius naudoto vandens utilizavimo reikalavimus.

Todėl šiame darbe bus analizuojamas būtent mišraus kontūro plautuvės naudojimo efektyvumas lyginant su mažasierių degalų naudojimu. Apibendrinus išvardytus plautuvių tipus, galima išskirti tokius sistemų privalumus ir trūkumus:

### 1.3 lentelė. SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo technologijų palyginimas

**Table 1.3.** The comparison of SO<sub>x</sub> emission reduction technology

Plautuvių tipai	Privalumai	Trūkumai
<b>Atvirojo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• procese nenaudojami papildomi reagentai;</li> <li>• sistema paprasta;</li> <li>• sąlyginai nedidelės eksploatacinės išlaidos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• valymo efektyvumas priklauso nuo vandens cheminių savybių ir temperatūros;</li> <li>• išvalytas vanduo su padidėjusiu pH išpilamas už borto;</li> <li>• didesnės energijos sąnaudos 1–2 % variklio galios palyginti su 0,5–1 % uždarojo kontūro.</li> </ul>
<b>Uždarojo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• užtikrinamas emisijos sumažėjimas nepriklausomai nuo vandens cheminės sudėties ar temperatūros;</li> <li>• padidėja sistemos autonomiškumas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sistema sudėtingesnė nei atvirojo kontūro;</li> <li>• reikalingas pastovus NaOH papildymas 6l/MWh*% S, laikymas ir aptarnavimas.</li> </ul>

Plautuvių tipai	Privalumai	Trūkumai
<b>Mišraus</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• atvirojo ir uždarojo kontūrų privalumai;</li> <li>• leidžia lanksčiau pritaikyti prie laivo eksploataavimo sąlygų.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• sistema sudėtinga (atvirasis ir uždarasis kontūrai kartu).</li> </ul>

Šiuo metu plautuvių sistemos yra plačiai tiriamos. Tačiau technologiniai plautuvės instaliacijos aspektai aprašomi nepakankamai. Mokslininkai pažymi galimą plautuvės įtaką laivo jūrinėms charakteristikoms, tačiau detali skaičiavimo metodologija nepateikiama (Green Ship of the future 2012; Walter and Wagner 2012; EMSA 2013; ABS 2013; Wärtsilä 2013; EGCSA 2014; German Shipowners Association 2014). Taip pat trūksta ekonominio vertinimo patikslinimo, įvertinus būtiną laivo modifikavimą, susijusį su technologinio vertinimo rezultatais (sąnaudos dėl krovinio gabenimo galios sumažėjimo, išlaidų sistemai aptarnauti ir t. t.). Todėl šiame darbe nuspręsta praplėsti atliktus tyrimus ir sudaryti metodologinius pagrindus plautuvės naudojimo efektyvumui vertinti.

#### 1.4. Pirmojo skyriaus išvados ir disertacijos uždavinių formulavimas

1. SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo technologijų diegimo aktualumas pagrįstas 2015 m. įsigaliojusiais reikalavimais ECA rajonuose, kuriems priskirta ir Baltijos jūra, iki 0,1 % sumažinti sieros koncentraciją degaluose arba ekvivalentiškai sumažinti išmetamųjų dujų emisiją, naudojant dujų valymo įrangą;
2. Šiuo metu eksploatuojamuose laivuose galima išskirti dvi technologijas: mažasierius degalus; plautuves.
3. Atsižvelgiant į laivo parametrus bei eksploataavimo intensyvumą ir buvimą ECA rajonuose, pasireiškia minėtų technologijų efektyvumas, t. y. laivui, kuris per metus potencialiai sunaudoja sąlyginai nedaug mažasierių degalų, plautuvę instaliuoti nerentabilu. Tuo tarpu laivui, kuris didžiąją dalį laiko plaukioja ECA rajonuose,

mažeseriai degalai ženkliai padidins eksploataavimo savikainą, todėl lyginant su minėtų degalų naudojimu plautuvė atsipirks jau per pirmuosius 1–2 metus.

4. Atsižvelgiant į laivo apribojimus instaliuoti papildomą įrangą, tokius kaip masė ir vietos trūkumas, šiuo metu galima išskirti du plautuvių tipus: sausąsias ir šlapiąsias. Sausosios dėl ženkliai didesnės savikainos laivuose praktiškai nenaudojamos, išskyrus kelis eksperimentinius laivus, kuriuose buvo instaliuota minėta sistema. Šlapiosios plautuvės po daugiau nei 5 metų eksploataavimo ir bandymų laikotarpio patvirtino savo efektyvumą. Dabartiniu metu plačiai taikomi trys šlapiųjų plautuvių tipai: atvirojo kontūro – šios plautuvės išmetamąsias dujas valo jūriniu vandeniu ir naudotą šį vandenį išpila už borto; uždarojo kontūro – išmetamosios dujos plaunamos jūriniu vandeniu, kuris naudojamas ir pakartotinai, jį išvalius; mišraus kontūro – šio tipo plautuvės gali veikti pagal poreikį – tiek atvirojo, tiek ir uždarojo kontūro režimu.
5. Plautuvių diegimo problematika plačiai tiriama, tačiau vis dar trūksta kompleksinio plautuvės efektyvumo vertinimo. Ypač mažai dėmesio skiriama plautuvės įtakos laivo stovumo tyrimams. Skaičiavimuose nepakankamai įvertinamos išlaidos ir negautas pelnas dėl būtinos laivo modifikacijos (patalpų perkėlimo, krovinio masės praradimo, įrangos eksploataavimo išlaidų ir t. t.). Siekiant patikslinti vertinimo metodologiją, būtina atlikti daugelį ekonominių bei technologinių skaičiavimų ir, susiejus gautus rezultatus tarpusavyje, sukurti metodologinius pagrindus plautuvės technologinio efektyvumui bei rentabilumui vertinti.

Atsižvelgiant į skyriaus išvadas, formuojami esminiai disertacijos tyrimų uždaviniai:

1. Sukurti plautuvės efektyvumo vertinimo metodologinius pagrindus.
2. Sukurtus metodologinius pagrindus realizuoti kompiuterinės programos pavidalu.
3. Eksperimentiniais tyrimais patikslinti suformuotus metodologinius pagrindus,

4. Eksperimentiniais tyrimais atlikti plautuvės sistemos išmetamųjų dujų valymo efektyvumo vertinimą realiomis eksploataavimo sąlygomis (laivo reiso metu);
5. Naudojant sukurta kompiuterinę programą, atlikti Lietuvos laivyno vertinimą, siekiant nustatyti reikalavimų sugriežtinimo įtaką laivyno konkurencingumui.



---

## Plautuvės diegimo efektyvumo vertinimo metodologiniai pagrindai

Rengiant įdiegtos plautuvės efektyvumo vertinimo metodologinius pagrindus, publikuoti 6 straipsniai recenzuojamose tarptautinėse konferencijose ir mokslo žurnaluose (Panasiuk 2012a; Panasiuk 2012b; Panasiuk 2012c; Panasiuk 2013a; Panasiuk 2013b; Panasiuk and Lebedevas 2013).

Disertacijos tyrimai buvo atliekami 2010–2015 m. autorei stažuojantis plautuvių įrangos gamintojų ir tiekėjų, laivų projektavimo, statybos ir remonto, laivų savininkų įmonėse:

- ✓ Tyrimai susiję su įrangos projektavimu, diegimu ir eksploatavimu laivuose buvo atlikti *Wärtsilä* įrangos gamintojo filialuose (Suomijoje, Estijoje, Lietuvoje).

- ✓ Plautuvių diegimo projektinės dokumentacijos rengimo ir stovumo vertinimo klausimai buvo nagrinėti įmonėje *Western Baltic Ingeneering* (Lietuva).
- ✓ Darbų parengimo ir atlikimo klausimai buvo nagrinėti Vakarų laivų remonto įmonėje bei Vakarų Baltijos laivų statykloje (Lietuva).
- ✓ Plautuvių integravimo ir eksploatavimo problematika nagrinėta jūrų keltų kompanijoje DFDS *Seaways* (Lietuva).
- ✓ Plautuvių integravimo eksploatuojamuose laivuose projektų rengimo klausimai tirti konsultuojantis su įmonės *Odense Maritime Technology* specialistais (Danija), atlikusiais nagrinėjamo DFDS keltų plautuvės instaliavimo projektą.
- ✓ Trylikos eksploatuojamų ir penkių naujai statomų laivų su įdiegtomis plautuvėmis projektinė dokumentacija gauta ir iš-tirta bendradarbiaujant su jūros pramonėje besispecializuojančia kompanija BLRT AS (Estija).

## 2.1. Plautuvės diegimo problematika

Paskelbus po 2015 m. įsigaliojusius SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo išmetamosiose dujose reikalavimus, plautuvių gamintojai sulaukia vis daugiau užsakymų dėl išaugusios jų paklausos. Šiandien pasauliniame laivyne į skirtingų tipų laivus yra įdiegta daugiau nei 80 plautuvės sistemų. Per paskutinius penkerius metus rinkoje atsirado daug plautuvių įrangos gamintojų, kurie specializuojasi kurti būtent laivo išmetamųjų dujų SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo technologijas: *Alfa Laval Aalborg*, *Clean Marine*, *Couple Systems*, *DuPont BELCO Clean Air Technologies*, *Green Tech Marine*, *MAN Diesel and Turbo*, *Marine Exhaust Solutions*, *Wärtsilä Hamworthy Krystallon* (ABS 2013, DNV 2012).

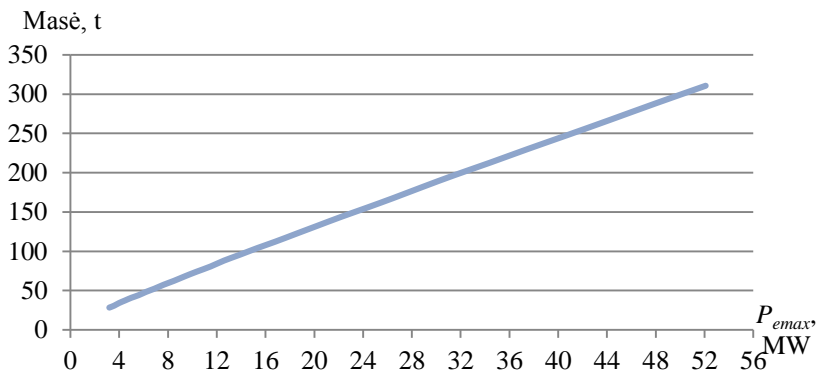
Plautuvių technologija yra gerai žinoma ir ne vieną dešimtmetį taikoma sausumos pramonėje. Tuo tarpu laivuose jų praktinis naudojimas daugiausia realizuojamas nuo 2010 m., įsigaliojus MARPOL 73/78 VI priedo SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo reikalavimams. Iki tol plautuvių diegimas laivuose buvo tiriamas laboratorijose, ir tik nedidelis

skaičius jų buvo instaliuota laivuose. Todėl šiuo metu praktinių duomenų apie įrangos diegimą nepakanka.

Plautuvės naudojimo laivuose problematika analizuojama įrangos gamintojų ir mokslinių institucijų duomenų pagrindu. Atlikus gamintojų siūlomos įrangos analizę buvo nustatyta, kad vidutinė įrangos masė nuo 3 iki 50 MW jėginei svyruoja nuo 30 iki 300 t, tūris atitinkamai – nuo 30 iki 1 000 m<sup>3</sup>. Akivaizdu, kad įrangos masė ir tūris daro didelę įtaką modernizuojamam laivui, ypač jei jis yra mažesnių gabaritų. Todėl plautuvės sistemos diegimą eksploatuojamuose laivuose riboja tam tikri veiksniai, kurie turi įtakos technologijos naudojimo galimybėms konkretaus laivo atveju (Lloyd 2012; Wärtsilä 2010; Wärtsilä 2013; MEPC 2009; Marine Engineering Practice Series 2000):

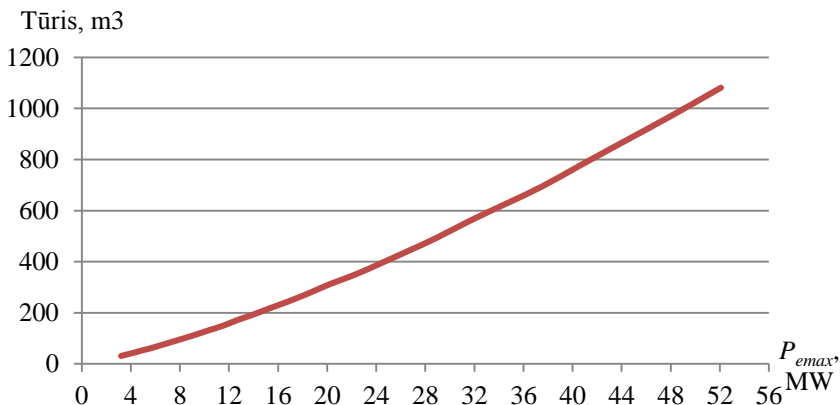
- ✓ vietos trūkumas;
- ✓ sistemos masės neigiama įtaka laivo stovumui;
- ✓ papildomo balasto poreikis;
- ✓ vietinio ir bendras korpuso stiprumo sumažėjimas;
- ✓ krovininės keliamosios galios sumažėjimas;
- ✓ papildomos energijos poreikis;
- ✓ papildomos kapitalinės ir eksploatacinės išlaidos;
- ✓ šlamo saugojimo talpyklų ir atidavimo būtinumas;
- ✓ laivo sistemų apkrovimas (vandens tiekimo, nugėlinimo).

Siekiant užtikrinti minimalią korpuso masę, laivai projektuojami nepaliekant laisvų patalpų rezervo. Todėl juose įdiegti daug vietos užimančius įrenginius yra sudėtinga. Atlikus įrangos gamintojų siūlomų plautuvių analizę nustatyta, kad įrangos tūris laivo jėgainėms nuo 3 MW iki 50 MW sudaro 0,009–0,025 m<sup>3</sup>/kW (DNV 2012, EMSA 2013, ABS 2013, Wärtsilä 2014):



**2.1 pav.** Plautuvės sistemos masės ir jėgainės galingumo santykis  
**Fig. 2.1.** Scrubber system mass per engine capacity

Plautuvių galingumas tiesiogiai priklauso nuo laivo jėgainių galingumo. Pastebėta, kad mažesnio galingumo (iki 20 MW) plautuvių įrangos tūris didėja santykinai lėčiau nei didesnio už minėtą galingumo plautuvių. Išmetamųjų dujų valymo technologinis procesas turi įtakos plautuvės diegimui šalia esamo laivo išmetamojo trakto. Pažymėtina, kad ne tik plautuvė, bet ir cirkuliacijos bei reagentų talpyklos turi būti kuo arčiau plautuvės, siekiant mažesnės vamzdynų masės ir sistemos darbo efektyvumo. Išanalizavus įrangos gamintojų siūlomas plautuves, buvo nustatyta, kad vidutinė sistemos masė laivo jėgainėms 3–50 MW sudaro 5–8 t/MW (DNV 2012, EMSA 2013, ABS 2013, Wartsila 2014):



**2.2 pav.** Plautuvės sistemos tūrio ir jėgainės galingumo santykis  
**Fig. 2.2.** Scrubber system volume per engine capacity

Beveik pusė plautuvės sistemos masės sukoncentruota šalia esamo falškamino, t. y. aukštai virš laivo vaterlinijos. Kita dalis elementų išdėstoma vienu ar keliais deniais žemiau plautuvės įrenginio. Būtent šiems plautuvės sistemos elementams sudėtingiausia rasti vietas dėl laisvų patalpų trūkumo ir poreikio instaliuoti elementus kuo arčiau plautuvės bloko (detalesiau aptariama 2.2 skyriuje). Todėl priklausomai nuo laivo dydžio poveikis stovumui gali būti ženklus. Diegiant plautuvės sistemą, tenka atsisakyti dalies esamų patalpų, tokių kaip degalų talpyklos, krovinių saugyklos ir t. t. Bet koks laivo perplanavimas neigiamai veikia jo eksploatacines charakteristikas: sumažėja laivo autonomiškumas, atsisakius dalies degalų talpyklų ar provizijos; sumažėja kroviniinis tūris, atsisakius dalies patalpų kroviniams ir t. t. Didesniuose laivuose plautuvės sistemos masė turi mažesnę įtaką. Ją diegiant mažesniuose laivuose gali būti problemiška atstatyti pradinis laivo stovumo parametrus. Krovininė laivo galia ir atitinkamai krovinių gabenimo pelnas, esant pilnai pakrautam laivui, sumažės proporcingai plautuvės sistemos svoriui. Esant nepilnai pakrautam laivui, plautuvės masė neturės įtakos krovinio gabenimo pelnui. Tačiau papildoma ma-

sė turi įtakos degalų sąnaudų didėjimui, taigi vienai krovinio tonai teks daugiau sunaudotų degalų nei laive iki plautuvės įdiegimo.

Jeį pradiniai stovumo parametrai neatsistatė, atsisakius krovinio masės, tolygios plautuvės sistemai, būtina imti papildomo balasto plautuvės masei kompensuoti. Pažymėtina, kad papildomo balasto kiekio parinkimas atliekamas užtikrinus pradinę laivo grimzlę. Stabilumo pokyčių atsiras dėl plautuvės išdėstymo aukščiau vaterlinijos, dėl to sumažės metacentrinis aukštis, kuris, kaip žinoma, yra pagrindinė stabilumo charakteristika. Metacentriniam aukščiui atstatyti būtina perkelti dalį krovinio ar balasto aukščiau vaterlinijos. Tuo atveju, jeigu plautuvės sistemą tenka montuoti arčiau laivagalio ar laivapriečio, nutolus nuo laivo masės centro, atsiranda diferentas. Diferentas kompensuojamas perkėlus dalį balasto į priešingą laivo pusę. Analogiškai išdėsčius sistemą kairiajame arba dešiniajame borte, krenui kompensuoti dalis balasto pernešama į priešingą bortą. Masės pernešimas į priešingas puses galimas ir atsargų sąskaita, tačiau dažniausiai tenka imti papildomo balasto ir atitinkamai papildomai sumažinti laivo krovinio gabenimo galią. Laivo su plautuve stovumui atstatyti atsisakoma dalies krovinio ir imamas papildomas balastas, kuris kompensuoja laivo pasvirimą į vieną ar kitą pusę. Kroviniomasės sumažėjimas neišvengiamai sumažina krovinių gabenimo pelną.

Plautuvės sistema daro tiesioginę įtaką išilginiam ir vietiniam laivo korpuso stiprumui. Bendras korpuso stiprumas atstatomas kompensuojant plautuvės masę papildomu balastu priešingoje laivo pusėje. Vietinis stiprumas užtikrinamas sustiprinant korpuso konstrukciją plautuvės išdėstymu vietose. Analogiškai kaip ir stovumo atveju, didžiausias neigiamas poveikis bus juntamas mažesniuose laivuose.

Pažymėtina, kad sistema reikalauja papildomų 1–3 % energijos sąnaudų priklausomai nuo laivo paskirties (DNV 2012, EMSA 2013, ABS 2013, Wartsila 2014, NABU 2015). Dideliuose laivuose su galingomis per 10MW jėgainėmis sistemos aprūpinimas užtikrinamas gamyklinėmis variklio energijos atsargomis. Tačiau mažesniuose laivuose toks poreikis yra ženklus ir gali lemti laivo propulsinio komplekso darbo efektyvumo sumažėjimą. Laivo jėgainės galingumo ir jo dydžio bei krovininės galios santykis priklauso nuo konkretaus laivo

tipo bei greičio. Kuo didesnis laivas, tuo santykinai mažesnis energijos poreikis tenka bėginiam jo ilgio metrui. Atitinkamai ir plautuvės sistema didesniai laivui turės mažesnę įtaką. Plautuvės santykinio galingumo priklausomybė gali būti išreikšta ir konkretaus laivo Frudo skaičiumi. Laivai su mažesniu Frudo skaičiumi reikalauja mažiau energijos, tenkančios vienam bėginiam laivo ilgio metrui. Konteinervežiai, keltai, ro-ro / ro-pax tipo laivai turi didesnę Frudo skaičių nei, pavyzdžiui, tanklaiviai ar vilkikai. Analogiškai mažesni laivai turi didesnę Frudo skaičių nei to paties tipo didesni laivai. Vadovaujantis klasikiniais laivų teorijos pagrindais, mažesniems laivams reikia santykinai galingesnės plautuvės, atitinkamai ir energijos poreikiai bus didesni (Rawson and Tupper 2005). Pavyzdžiui, 239 m ilgio *Aframax* tanklaiviui uždarojo tipo plautuvės sistemai aptarnauti reikės ~0,15 % jėgainės galingumo papildomos energijos, 154 m ilgio to paties tipo laivui *Handysize* reikės ~0,75 %, 100 m laivui reikės apie 1 %. Atitinkamai mažesnių laivų energijos poreikis gali siekti iki 3 %. Pavyzdžiui, mažo laivo iki 10 MW varikliui prireiks apie 300 kW papildomos energijos sistemai aptarnauti (NABU 2015). Dažniausiai tokios energijos atsargos mažesnių laivų varikliai neturi, todėl sistemos įdiegimas gali sutrikdyti visą laivo darbą, aprūpinant propulsinį kompleksą ir t. t. Nepriklausomai nuo plautuvės tipo, kiekviena sistema reikalauja papildomos energijos. Uždarojo tipo sistema reikalauja papildomų cheminių reagentų NaOH. Atvirojo tipo sistemos efektyvumas užtikrinamas naudojant didesnę kiekį (lyginant su uždarojo tipo sistema) atitinkamos kokybės vandens. Todėl beveik dvigubai išauga energijos sąnaudos vandeniui tiekti. Tačiau tokio tipo sistemoje nėra poreikio sandėliuoti naudotą vandenį. Be to, siekiant iš naudoto vandens išvalyti nesudegusius degalus ir kitus elementus, reikės cheminių reagentų. Sistemos paleidimas taip pat užima tam tikrą laiką, o nuostoliai dėl ilgesnio laivo ruošimo reisui gali sudaryti dešimtį tūkstančių eurų. Be to, plautuvės sistemai reikalingi kasmetiniai priežiūros bei remonto darbai. Todėl neišvengiamai padidės laivo eksploatacinės išlaidos.

Akivaizdu, kad plautuvės ir sistemos elementų dydis tiesiogiai priklauso nuo išmetamųjų dujų debeto esant maksimalioms jėgainės apkro-

voms (kg/s esant 100 % MRC). Ne mažiau svarbus ir sieros kiekis degaluose. Tačiau sudėtinga tiksliai prognozuoti, kokį kurą laivo savininkas naudos ateityje, o dešimtujų procento sieros koncentracijos pokytis degaluose nedaro ženklios įtakos sistemos gabaritams. Todėl projektuojant nustatoma maksimali 3,5 % sieros koncentracija degaluose siekiant užtikrinti 0,1 % SO<sub>x</sub> išmetamosiose dujose esant 100 % jėgainės apkrovimo (Wartsila 2014). Projektuojant sistemą esant maksimaliems parametrams atitinkamai sumažėja sistemos rentabilumas. Tačiau iš dalies perteklinis sistemos debitas kompensuojamas automatizuotai nustatant vandens / reagentų poreikį esant atitinkamam jėgainių galingumui arba tiksliau – išmetamųjų dujų kiekiui. Atsižvelgiant į vietos trūkumą laive, atsarginė sistema nėra instaliuojama. Todėl plautuvės sistemai yra keliami aukšti patikimumo ir saugumo reikalavimai. Plautuvės laivuose visu pajėgumu pradėjo veikti tik nuo 2015 m. Todėl vis dar trūksta praktinių žinių, kad būtų galima tiksliai įvertinti visas su sistemos eksploatavimu, aptarnavimu bei remontu susijusias išlaidas. Tačiau atsižvelgiant į sistemos sudėtingumą ir tai, kad valymas atliekamas naudojant didelį kiekį vandens bei reagentų, būtina užtikrinti nuolatinę sistemos priežiūrą ir saugumą. Pavyzdžiui, cirkuliacijos talpyklos turi būti išdėstytos atskiroje sandarioje patalpoje, kad būtų galimybė įvykus gedimui apsaugoti laivą nuo užliejimo. Darbas su cheminiais reagentais taip pat reikalauja specifinių įgulos žinių, kadangi medžiagos yra nuodingos. Vamzdynai, kurie prijungti prie esamų sistemų, taip pat turi užtikrinti visų sistemų darbo proceso efektyvumą. Todėl jų projektavimui, montavimui ir priežiūrai būtina skirti daug dėmesio. Be to, atsižvelgiant į gana platų sistemos elementų išdėstymą (nuo mašinų skyriaus iki išmetamojo trakto vamzdynų), darbo procesas turi būti visiškai automatizuotas, siekiant per daug neapkrauti įgulos. Plautuvės sistema turi būti pajungta taip, kad net ir sistemai sugedus variklio darbas nebūtų sutrikdytas, t. y. plautuvės sistemos gedimas galėtų turėti įtakos tik išmetamųjų dujų valymo efektyvumui, bet ne jėgainių darbui. Tai ypač aktualu esant integruoto tipo plautuvei, kai kelioms laivo jėgainėms įrengiama viena bendra plautuvė. Tuo užtikrinamas sistemos paprastumas, tačiau išmetamųjų dujų vamzdynų prijungimo taškuose turi būti užtikrintas leistinas slėgio pokytis. Taip pat plautuvės sistema turi užtikrinti darbo efektyvumą tiek veikiant visoms laivo jėgainėms kartu, tiek ir eksploatuojant tik dalį variklių. Sistemos efekty-

vumui užtikrinti būtina numatyti atsarginius elementus, kurie garantuotų sistemos veikimą kilus tam tikriems gedimams. Įrangos gamintojai, turėdami sausumos plautuvių gamybos patirties, rekomenduoja įrengti papildomą cirkuliacinę talpyklą ir siurblius, kurie esant, pavyzdžiui, trims siurbliams yra pajėgūs užtikrinti 50 % reikiamo pajėgumo, analogiškai dvi cirkuliacinės talpyklos užtikrina 100 % reikalingo vandens mišinio kiekį. Plautuvė gali turėti įtakos išmetamųjų dujų slėgio kritimui, kuris kompensuojamas įrengiant dujų ištraukimo ventiliatorius. Išpilti naudotą vandenį yra draudžiama daugumoje Baltijos jūros uostų. Todėl laivynui, kuris eksploatuojamas minėtame rajone, modernizuoti tinkamos uždarojo ir mišraus tipo plautuvės (DNV 2012, EMSA 2013, ABS 2013, Wartsila 2014, NABU 2015).

Atsižvelgiant į išvardytus plautuvės diegimo problematikos aspektus, sistemos parinkimas neturi apsiriboti tik plautuvės galingumo nustatymu. Įvertinus visų sistemos elementų gabaritinius parametrus, būtina identifikuoti daromą įtaką laivo charakteristikoms. Nustačius laivo charakteristikų pasikeitimo parametrus, apskaičiuojami būtini laivo dedveito, patalpų išdėstymo ir kiti pakeitimai, siekiant atstatyti pradinį laivo stovumą. Minėti pakeitimai turi būti išreikšti kaip laivo nuostoliai, papildomos išlaidos ar negautas pelnas ir tiesiogiai susieti su plautuvės diegimo rentabilumo vertinimu.

## **2.2. Plautuvės sistemos parinkimas**

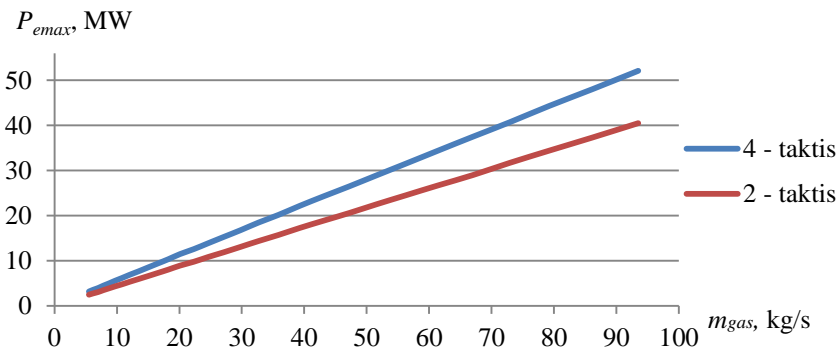
Plautuvės įdiegimo efektyvumas priklauso nuo plautuvės sistemos parinkimo, atsižvelgiant į konkretaus laivo parametrus. Paprastai plautuvės debetas parenkamas esant didžiausiam jėgainių apkrovimui, t. y. įvertinus didžiausią išmetamųjų dujų kiekį per laiko vienetą. Nepriklausomai nuo gamintojo, plautuvė parenkama tiesiogiai atsižvelgiant į konkretaus laivo jėgainės galingumą. Plautuvės debitas parenkamas atsižvelgiant į išmetamųjų dujų kiekį, kuris, kaip žinoma, yra tiesiogiai susijęs su jėgainės galingumu. Tuo atveju, jeigu projektuojama plautuvė yra tiesioginės srovės, kiekvieno variklio arba katilo išmetamųjų dujų srautas vertinamas atskirai. Integruotos plautuvės atveju

vertinamas bendras visų jėgainės elementų išmetamųjų dujų srautas. Taigi išmetamųjų dujų kiekis yra pagrindinis parametras, kuriuo remiantis parenkamas reikiamas plautuvės debitas. Būtina pažymėti, kad plautuvė projektuojama esant maksimaliam jėgainės apkrovimui ir apskaičiuojama taip:

$$\dot{m}_{gas} = \dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{fuel} \cdot L_0 \cdot \alpha \cdot \beta, \text{ kg/s} \quad (2.1)$$

čia:  $\dot{m}_{gas}$  – išmetamųjų dujų kiekis, kg/s;  $\dot{m}_{fuel} = P_{emax} \cdot b_{emax}$  – kuro sąnaudos, kg/s;  $L_0$  – stochiometrinė oro-degalų tiekimo konstanta, priimama 14,5;  $\alpha$  – oro pertekliaus koeficientas;  $\beta$  – oro tiekimo santykis, priimamas 1,45 2-takčiams ir 1,1 4-takčiams varikliams (Mollenhauer *et al.* 2010).

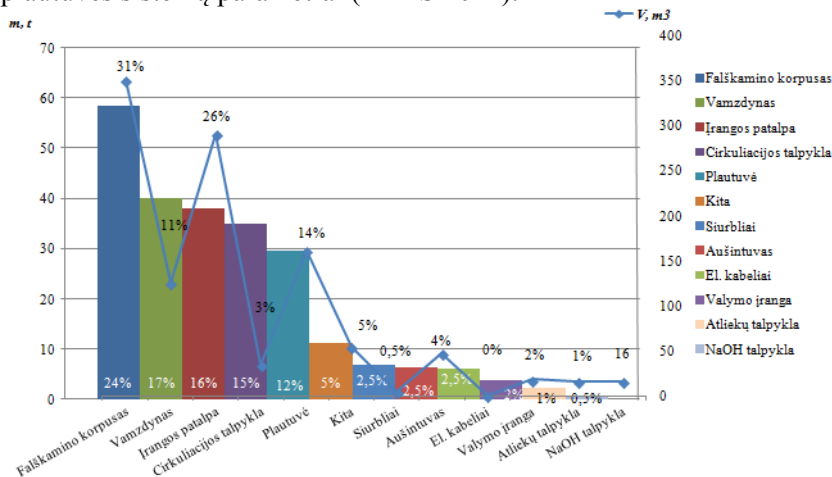
Pagrindinis  $\dot{m}_{gas}$  skaičiavimo formulio parametras yra tiekiamo oro masės santykis. Minėtas santykis tiesiogiai priklauso nuo variklio taktų skaičiaus. 2-takčiai varikliai pasižymi didesniu išmetamųjų dujų kiekiu lyginant su 4-takčiais. Todėl, esant vienodam variklių galingumui, 2-takčiam varikliui reikės galingesnės plautuvės nei 4-takčiam (ISO 8178-1:2006):



**2.3 pav.** Plautuvės debito ir jėgainės galingumo bei taktų skaičiaus santykis

**Fig. 2.3.** Scrubber capacity per engine capacity and strokes

Plautuvės masė ir gabaritai tiesiogiai priklauso nuo išmetamųjų dujų srauto per laiko vienetą. Kitaip tariant, plautuvės masė ir geometriniai parametrai tiesiogiai susieti su plautuvės galingumu. Siekiant nustatyti kiekvienos plautuvės elemento masės ir tūrio įtaką laivo charakteristikoms, buvo naudoti konkretaus gamintojo skirtingų matmenų plautuvės sistemų parametrai (DFDS 2014):



**2.4 pav.** Plautuvės sistemos elementų masė ir tūris  
**Fig. 2.4.** The mass and volume of each element of scrubber system

Kaip parodyta 2.4 paveiksle, tarp sistemos elementų masės ir tūrio nėra tiesinės priklausomybės. Atlikus skaičiavimus buvo nustatyta, kad didžiausią įtaką turi pirmasis blokas – falškamino korpusas su plautuve, kuri apskritai sudaro apie 36 % visos sistemos masės ir 45 % sistemos tūrio. Panašūs parametrai yra ir antrojo bloko – įrangos patalpos su cirkuliacijos ir NaOH talpyklomis, kurios sudaro 31 % masės ir 29 % tūrio. 17 % masės ir 11 % tūrio sudaro sistemos vamzdynai. Tačiau jų išdėstymas priklauso nuo anksčiau minėtų dviejų blokų. Todėl skaičiavimuose vamzdynų masę ir tūrį tikslinga vertinti padalijus lygiomis dalimis tarp minėtų blokų. Didžiausią įtaką laivo stovumui turės blokų masė, tuo tarpu tūris darys įtaką galimybei juos išdės-

tyti esamose laivo patalpose. Pažymėtina, kad laivai projektuojami optimizuojant kiekvieną patalpą taip, kad maksimaliai sumažėtų bendrą korpuso masę. Todėl eksploatuojamuose laivuose ne taip paprasta rasti vietas – ypač stambesniems elementams. Parenkant plautuvės sistemą, būtina apskaičiuoti plautuvės galingumą, nuo kurio priklauso visų sistemų elementų parametrai. Kaip minėta, optimizuojant sistemos elementų išdėstymą, skaičiavimuose vertinama bendra atskirų blokų masė. Todėl parinkus plautuvės galingumą, kiekvieno elemento masė ir tūris parenkami vadovaujantis gamintojo rekomendacijomis.

Nepriklausomai nuo gamintojo, uždarojo, atvirojo ir mišraus tipo plautuvių darbo principai yra panašūs. Todėl sistemų elementų masės ir gabaritų, siurblių galingumo, vandens ir cheminių reagentų poreikio ir t. t. skirtumai yra neženklūs. Kuriant metodologinius plautuvės efektyvumo vertinimo pagrindus, skirtumas tarp gamintojų gali būti nevertinamas. Neatsižvelgiant į plautuvės tipą, įrenginys instaliuojamas falškamine, šalia išmetamojo trakto vamzdynų (ABS 2013; DNV 2012; Kalli *et al.* 2009). Falškamine yra sąlyginai daug vietos įrangai sumontuoti ir priėjimui, aptarnaujant plautuvės sistemą, užtikrinti. Tačiau laivo atžvilgiu plautuvę tenka įrengti aukštai virš vaterlinijos, nutolus nuo laivo masės centro, kas daro didesnę įtaką bendram stovumui.

Pagal prijungimo tipą, plautuvės skirstomos į tiesiogines ir integruotas. Tiesioginės montuojamos prie konkretaus variklio išmetamojo trakto vamzdyno. Tačiau tuo atveju, jei laive yra daugiau nei viena jėgainė, dažniausiai naudojama integruota sistema, įrengiant išmetamųjų dujų nukreipimo vamzdyną, sujungiant kelių jėgainių išmetamuosius traktus. Tuo optimizuojama bendra sistema ir vietoj dviejų parenkama viena galingesnė plautuvė. Neatsižvelgiant į plautuvės prijungimo tipą, būtina užtikrinti sistemos lankstumą ir prireikus turėti galimybę atjungti plautuvės sistemą, nukreipiant išmetamąsias dujas į esamą išmetamųjų dujų trakto vamzdyną.

Atvirojo tipo plautuvę įrengti yra paprasčiau palyginti su uždarojo tipo. Sistema tiekia jūros vandenį tiesiogiai į plautuvę, o naudotas vanduo, pašalinus nesudegusių degalų likučius, išpilamas už borto. Sistema nereikalauja papildomų cheminių reagentų, todėl eksploatacijos sąnaudos yra ma-

žesnės. Tačiau lyginant su uždarojo tipo, sistema reikalauja 30 % didesnio vandens kiekio ir energijos sąnaudų, kurios priklauso nuo to, į kokį aukštį tiekiamas jūros vanduo: kuo aukščiau, tuo jos didesnės. Taip pat tam tikruose rajonuose, pavyzdžiui, šiaurinėje Baltijos jūros dalyje, ar uždaroje akvatorijose, kur vandens šarmingumas yra nepakankamas, dujų valymo efektyvumas neužtikrinamas. Daugelyje Baltijos jūros uostų vandenį išpilti už borto draudžiama. Todėl naudojant atvirojo tipo plautuves, uostuose tenka pereiti dirbti mažesniais degalais. Susidūrę su atvirojo tipo plautuvės sistemos eksploatavimu griežtų reikalavimų rajonuose, laivų savininkai yra linkę rinktis uždarojo arba mišraus tipo plautuves, kurios paskutinius 5 metus dominuoja Baltijos jūroje eksploatuojamuose laivuose.

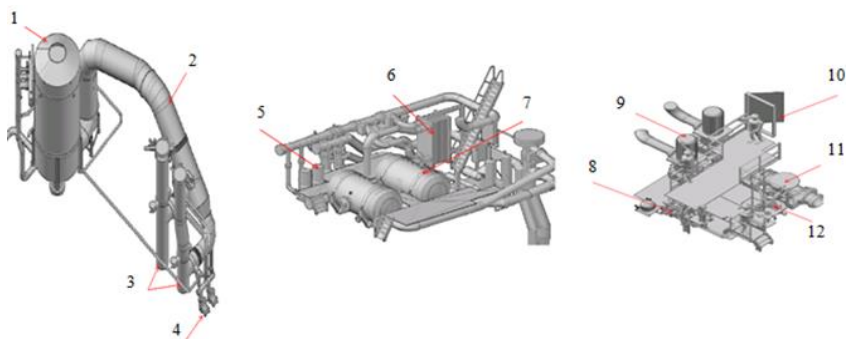
Uždarojo tipo plautuvės diegimas yra sudėtingesnis, nes sistema naudoja cheminių reagentų ir vandens mišinį, kuris cirkuliuoja uždarame kontūre. Todėl sistema, be plautuvės ir vandens tiekimo vamzdynų, susideda iš NaOH ir cirkuliacijos talpyklos, aušinimo sistemos, naudoto vandens valymo sistemos. Vandens srautas uždarojo tipo sistemoje yra mažesnis lyginant su atvirojo tipo, todėl energijos poreikis atitinkamai taip pat yra mažesnis. Lyginant atvirojo ir uždarojo tipo plautuvių eksploatacines sąnaudas, jos skiriasi neženkliai (atvirojo tipo didesnės energijos sąnaudos; uždarojo – NaOH sąnaudos). Tačiau uždarojo tipo plautuvės kapitalinės sąnaudos yra apie 15 % didesnės nei atvirojo tipo (NABU 2015). Be to, atsiranda ir atliekų atidavimo sąnaudos, kurios apskritai yra didesnės nei atvirojo tipo. Sistemos efektyvumas pasireiškia galimybe eksploatuoti ją griežtų reikalavimų rajonuose.

Mišraus tipo plautuvės įdiegimo sudėtingumu yra panašios į uždarojo tipo sistemas. Tačiau kitaip nei anksčiau minėta, ši sistema turi du vamzdynų kontūrus: atvirąjį ir uždarąjį. Todėl ši sistema yra sudėtingesnė ir atitinkamai brangesnė nei pirmos dvi. Uždarojo ir mišraus tipo plautuvių veikimo principai yra panašūs. Mišraus tipo sistemoje įrengiamas papildomas vamzdynas su vožtuvais, kurie užtikrina automatizuotą perėjimą iš atvirojo kontūro į uždarąjį ir atvirkščiai. Mišraus tipo plautuvės efektyvumas pasireiškia galimybe uoste naudoti uždarąjį kontūrą, o esant jūroje – atvirąjį. Taip esant jūroje sutaupoma ne-naudojant cheminių reagentų ir nekaupiant atliekų, neprarandant gali-

mybės naudoti sistemą ir uoste bei griežtų reikalavimų rajonuose (Man Emission Project Guide 2014).

Nepriklausomai nuo skirtingų gamintojų, uždarojo ir mišraus tipo plautuvių sistemos susideda iš trijų pagrindinių blokų (žr. *Aalborg* mišraus tipo plautuvės blokus DFDS ro-pax laive, 2.5 pav.):

- ✓ plautuvės blokas: papildomas falškamino konstrukcijos korpusas su plautuvių ir išmetamųjų dujų kolektoriumi viduje, sujungtu su esamu išmetamojo trakto vamzdynu;
- ✓ įrangos blokas: atskira sandari įrangos patalpa su cirkuliacijos ir NaOH talpyklomis bei vandens ir reagentų tiekimo bei maišymo siurbliais;
- ✓ siurblių blokas: vandens tiekimo siurbliai ir naudoto vandens valymo įrenginys, esantis šalia užbortinio vandens tiekimo siurblių.



**2.5 pav.** Mišraus tipo plautuvės sistemos blokų elementai: 1 – plautuvė; 2 – dujų kolektorius; 3 – esamas išmetamųjų dujų traktas; 4 – sandarinimo oro ventiliatorius; 5 – cirkuliacijos siurbliai; 6 – aušintuvas; 7 – cirkuliacijos talpykla; 8 – NaOH įrenginys; 9 – užbortinio vandens siurblys; 10 – sandarios durys; 11 – užbortinio vandens filtras; 12 – naudoto vandens valymo įrenginys

**Fig. 2.5.** The scrubber system elements: 1 – scrubber; 2 – exhaust manifold; 3 – existing exhaust pipe; 4 – sealing air fan; 5 – circulation pump; 6 – cooler; 7 – circulation tank; 8 – NaOH equipment; 9 – sea water pump; 10 – waterlight door; 11 – sea strainer; 12 – sludge equipment

Išmetamųjų dujų valymo efektyvumui būtina užtikrinti priešpriešines vandens ir išmetamųjų dujų srovių kryptis. Todėl nepriklausomai nuo įrangos diegimo projektinių sprendimų, falškamino konstrukcijos papildomas korpusas instaliuojamas šalia esamo išmetamųjų dujų trakto, praplečiant esamą falškamino konstrukciją. Plautuvė, esanti papildomos falškamino konstrukcijos viduje, turi būti išdėstyta kuo arčiau esamo išmetamųjų dujų trakto, dažniausiai už jo, arčiau laivagalio. Plautuvės išdėstymo vietos pasirinkimui įtakos turi vamzdynų, jungiančių laivo jėginių išmetamąjį traktą ir plautuvę, masė ir sumažėjęs dujų srauto slėgis. Kuo toliau nuo esamo trakto bus išdėstoma plautuvė, tuo didesnė bus papildomo vamzdyno masė ir ženklesnis slėgio praradimas. Atskira sandari įrangos patalpa turi būti kuo arčiau plautuvės, siekiant užtikrinti efektyvų vandens ir reagentų mišinio tiekimą į plautuvės sistemą, naudojant kuo mažiau energijos (t. y. siurblių galios). Todėl optimizuojant siurblių darbą ir vamzdynų ilgį vandens mišiniui tiekti, įrangos blokas su cirkuliacijos ir reagentų talpykla išdėstomas deniu žemiau nei plautuvė, nuo jos nutolus nedideliu atstumu. Nauja įrangos patalpa turi būti išdėstyta taip, kad užtikrintų tiesioginį patekimą iš mašinų skyriaus į naują įrangos patalpą ir iš jos – prie plautuvės. Pažymėtina, kad minėti du blokai sudaro pagrindinę įrangos masę ir, siekiant užtikrinti dujų valymo proceso efektyvumą, išdėstomi aukščiau laivo vaterlinijos. Todėl vertinant plautuvės sistemos įtaką laivo stovumui, būtina atkreipti dėmesį būtent į šiuos blokus. Užbortinio vandens tiekimo sistemos dažniausiai sujungiamos su esamomis laivo sistemomis. Todėl siurblių blokas su siurbliais ir naudoto vandens valymo įrenginys išdėstomi esamoje siurblinėje žemiau vaterlinijos. Šio bloko svoris ir tūris yra nedideli. Be to, siurbliai prijungiami prie esamos užbortinio vandens tiekimo sistemos, padidinant užbortinio vandens filtro pralaidumą. Todėl naujų siurblių projektinė padėtis apsiriboja esamos siurblinės patalpa. Atsižvelgiant į nedidelę įrangos masę ir tūrį, šio bloko išdėstymo optimizavimas gali būti nevertinamas. Apibendrinant galima teigti, kad nepriklausomai nuo laivo tipo ir jo patalpų suplanavimo, plautuvės sistemos padėtis laive visada priklauso nuo išmetamųjų dujų trakto ir mašinų skyriaus padėties.

Sugrupavus atskirus sistemos blokus, remiantis įrangos gamintojų duomenimis, identifikuojamas bendras sistemos masės ir galingumo santykis.

**2.1 lentelė.** Plautuvės sistemos masės ir tūrio santykis su galingumu  
**Table 2.1.** The mass and volume of scrubber system per it's capacity

Plautuvės debitas, kg/s	Masė, t	Tūris, m <sup>3</sup>	Plautuvės debitas, kg/s	Masė, t	Tūris, m <sup>3</sup>
<1	11	6	<b>61–70</b>	221	658
<b>1–5</b>	17	22	<b>71–80</b>	257	849
<b>6–10</b>	42	58	<b>81–90</b>	298	1 021
<b>10–15</b>	54	81	<b>91–100</b>	334	1 204
<b>16–20</b>	75	132	<b>101–110</b>	359	1 339
<b>20–25</b>	88	161	<b>111–120</b>	385	1 484
<b>26–30</b>	103	206	<b>121–130</b>	413	1 654
<b>31–35</b>	127	292	<b>131–140</b>	443	1 828
<b>36–40</b>	138	329	<b>141–150</b>	475	2 019
<b>41–50</b>	161	421	<b>151–160</b>	508	2 236
<b>51–60</b>	189	522	<b>171–180</b>	542	2 459

Supaprastinus skaičiavimus, galima naudoti santykinius kiekvieno bloko parametrus (pirmo, antro ir trečio blokų santykiu 47/42/11 svoriui ir 49/33/18 tūriui), siejant juos su bendrais visos plautuvės sistemos masės bei tūrio parametrais, priklausomai nuo plautuvės galingumo, arba naudoti tikslius statistinius sistemos elementų parametrus, sukūrus įrangos duomenų bazę.

Be gabaritinių sistemos parametrų, būtina įvertinti pagrindinius vandens, energijos, reagentų poreikius. Plautuvės debitas parenkamas atsižvelgiant į maksimalų jėgainių apkrovimą. Tačiau skaičiuojant minėtų medžiagų poreikį, būtų netikslinga vadovautis maksimalia išiga. Todėl skaičiavimuose poreikį susiesime su degalų suvartojimu

per autonomiškumo periodą arba ataskaitinį laikotarpį, per kurį vertinamos visos išlaidos, susijusios su papildomų medžiagų poreikiu. Vandens poreikis tiesiogiai priklauso nuo išmetamųjų dujų kiekio. Bendruoju atveju, esant maksimaliam jėginių apkrovimui, jis gali būti apskaičiuojamas  $50 \text{ m}^3/\text{h}/\text{MW}$  atvirojo tipo kontūriui ir  $30 \text{ m}^3/\text{h}/\text{MW}$  uždarojo tipo kontūriui. Atitinkamai siejant vandens sąnaudas su degalų išėiga, atvirojo tipo plautuvės sąnaudos –  $0,65 \text{ m}^3/\text{t}$  ir uždarojo tipo –  $0,43 \text{ m}^3/\text{t}$ . Energijos poreikis atvirojo tipo sistemai –  $0,007 \cdot kW \cdot MCR \text{ kW/h}$  (MCR variklio apkrovimas) ir uždarojo tipo –  $0,0025 \cdot kW \cdot MCR \text{ kW}$  (MAN 2015). NaOH poreikis atvirojo tipo sistemai yra  $0,07 \cdot \dot{m}_{fuel} \text{ kg}$ . Šlamo susidarymo kiekis apskaičiuojamas  $0,07 \text{ m}^3/\text{m}^3$  vandens.

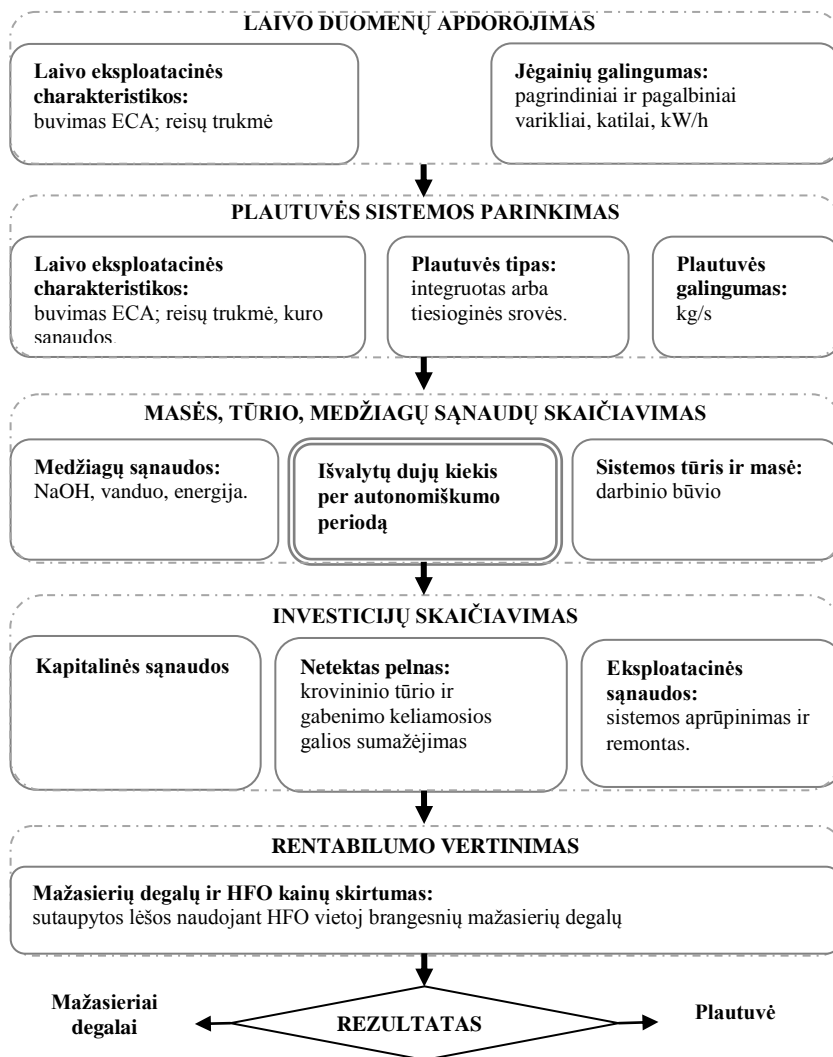
Pateikta plautuvės parinkimo koncepcija leidžia teigti, kad visi plautuvės sistemos parametrai tiesiogiai priklauso nuo plautuvės galingumo ir atitinkamai nuo laivo jėginių charakteristikų. Ši priklausomybė leidžia nustatyti plautuvės parametrus, kai žinoma tik variklio charakteristika. Atitinkamai nustčius plautuvės galingumą, identifikuojami ir visos sistemos masės bei gabaritų parametrai.

### 2.3. Plautuvės ekonominio efektyvumo vertinimas

Parinkus visus plautuvės sistemos elementus, atliekamas pirminis rentabilumo vertinimas, siekiant apytiksliai nustatyti investicijų atsiperkamumo laikotarpį. Šis tarpinis skaičiavimas atliekamas siekiant įvertinti plautuvės naudojimo efektyvumą konkretaus analizuojamo laivo atžvilgiu. Taigi dar prieš vertinimą laivo savininkas nurodo maksimalų investicijų atsiperkamumo laikotarpį, kurį viršijus galima rekomenduojamai pasirinkti alternatyvų sprendimą – naudoti mažesnius degalus. Plautuvės diegimo rentabilumas vertinamas kaip investicija į technologiją. Kaip žinoma, investicijos į plautuvę nėra nukreiptos pelnui gauti. Tačiau kaip ir bet kuri kita investicija,  $\text{SO}_x$  emisijos mažinimo technologijos diegimas siejamas su pinigų investavimu, siekiant gauti teigiamą efektą – mūsų atveju tai MARPOL reikalavimų atitikimas ir investavimo sąnaudų mažinimas, pasirenkant konkrečiam laivui optimalią technologiją. Nepaisant to, kad pelno ši investicija neatneš,

jos rentabilumas vertinamas kaip eksploatacinių sąnaudų taupymas naudojant pigesnius HFO degalus.

Parinkus plautuvės galingumą bei identifikavus visų medžiagų poreikį ir įkainius, atliekamas investicijos į plautuvę rentabilumo vertinimas. Mūsų atveju vertinimas atliekamas lyginant plautuvės ir mažasierių degalų naudojimą. Pažymėtina, kad įdiegus plautuvę teigiamas efektas pasireiškia šiek tiek vėliau, skaičiuojant nuo investavimo pradžios. Todėl efektyvumas bus vertinamas per ataskaitinį laikotarpį  $t$ , apimančią laiko intervalą nuo technologijos įdiegimo iki ataskaitinio laikotarpio pabaigos. Rekomenduojama taikyti ne trumpesnę nei 5 metai ir ne ilgesnę nei likutinis laivo eksploatacijos periodas ataskaitinį laikotarpį (Stopford 2009; Hubner 2008). Įdiegtos plautuvės pirminis rentabilumo vertinimas atliekamas toliau pateikta seka:



2.6 pav. Plautuvės rentabilumo pirminio vertinimo schema  
 Fig. 2.6. The scheme of scrubber profitability pre-assessment

Mūsų atveju ataskaitinio laikotarpio pradžia laikysime technologijos diegimo periodą (kapitalinės investicijos). Ataskaitinį laikotarpį suskirstome etapais ( $t_0, t_1, t_2 \dots t_n$ ), apskaičiuojame jų pagrindinius ekonominius rodiklius. Etapai identifikuojami, atsižvelgiant į technologijos diegimo investavimo ypatumus: diegimas; eksplotavimas; atsiperkamumas, eksplotavimo baigimas arba ataskaitinio laikotarpio pabaiga. Mūsų atveju pirmasis  $t_0$  – plautuvės diegimo etapas. Pirmajame etape pagrindinės išlaidos priskiriamos prie kapitalinių. Naudojant mažasierius degalus, kapitalinės išlaidos CAPEX (*Capital expenditures*) yra neženklios, todėl skaičiavimuose gali būti nevertinamos:

$$CAPEX_{fuel} \cong 0, \text{ €} \quad (2.2)$$

Plautuvės diegimo atveju CAPEX sudarys įrangos pirkimo, projektavimo darbai, sistemos diegimo išlaidos:

$$CAPEX_{scrub} = C_{equipment} + C_{design} + C_{installation} + C_{documentation}, \text{ €} \quad (2.3)$$

čia:  $C_{equipment}$  – įrangos pirkimo sąnaudos, €;  $C_{design}$  – projektavimo darbų sąnaudos, €;  $C_{installation}$  – įrangos diegimo sąnaudos, €;  $C_{documentation}$  – dokumentacijos ruošimo sąnaudos, €.

Antrajame eksplotavimo etape mažasieriai degalai dėl ženkliai didesnės savikainos padidina išlaidas degalams. Eksploatacinių išlaidų skirtumas, naudojant mažasierius degalus vietoj HFO, tiesiogiai priklauso nuo laivo buvimo ECA rajonuose. Šį skirtumą apskaičiuosime naudodami  $T_{ECA} \in [0 \dots 1,0]$ . Pavyzdžiui, jeigu laivas ECA rajone eksploatuojamas 50 % viso laiko, tuomet  $T_{ECA} = 0,5$ . Laivui, esančiam ECA rajonuose ne visą eksploatavimo laikotarpį, susidaro papildomų išlaidų, perjungiant degalus iš mažasierių į HFO ir atvirkščiai –  $C_{switching}$  (laiko švaistymas).  $C_{switching}$  taip pat verti-

nama atsižvelgiant į  $T_{ECA} \in [0 \dots 1,0]$ . Taigi mažasierių degalų eksploatacinės išlaidos apskaičiuojamos:

$$OPEX_{fuel} = G_{fuel}(C_{LSHFO} - C_{HFO}) * T_{ECA} + C_{switching} * (1 - T_{ECA}), \quad (2.4)$$

€/metus.

čia:  $G_{fuel}$  – metinės degalų sąnaudos, t/metus;  $C_{LSHFO}$  – mažasierių degalų kaina, €/t;  $C_{HFO}$  – HFO kaina, €/t;  $C_{switching}$  – degalų perjungimo iš mažasierių į HFO išlaidos, €/metus.

Plautuvės eksplotacines išlaidas sudaro reagentų ir papildomos energijos savikaina, aptarnavimo bei remonto kaina, dėl sumažėjusios keliamosios galios netektas pelnas:

$$OPEX_{scrub} = C_{scrub\ maint.} + C_{scrub\ NaOH} + C_{scrub\ FW} + C_{scrub\ En} + (m_g * C_{cargo} * nm), \quad (2.5)$$

€/metus.

čia:  $C_{scrub\ maint.}$  – plautuvės aptarnavimo išlaidos, €/metus;  $C_{scrub\ NaOH}$  – išlaidos reagentams, €/metus;  $C_{scrub\ FW}$  – vandens nugėlinimo išlaidos, €/metus;  $C_{scrub\ En}$  – papildomos energijos išlaidos, €/metus;  $m_g$  – plautuvės masė, t;  $C_{cargo}$  – vienos tonos krovinio gabenimo vieną jūrmylę kaina, €/t\*nm;  $nm$  – metinis reisų atstumas, nm/metus.

Trečiasis etapas – tai laikotarpis, kai plautuvės kapitalinės ir eksplotacinės išlaidos susilygina su mažasierių degalų eksploatacinėmis išlaidomis (degalų išlaidų skirtumas lyginant HFO ir mažasierius degalus). Toliau pasireikš investicijų į plautuvės diegimą pelningumas EBITDA, kuris išreiškiamas mažasierių ir HFO degalų savikainos skirtumu:

$$EBITDA_{scrub} = G_{fuel}(C_{LSHFO} - C_{HFO}) * T_{ECA} - C_{switching} * (1 - T_{ECA}), \quad (2.6)$$

€/metus.

Plautuvės atsiperkamumas taip pat tiesiogiai priklauso nuo degalų kainos skirtumo:

$$PBP = \frac{CAPEX_{scrub} + OPEX_{scrub}}{OPEX_{fuel}}, \text{ metų} \quad (2.7)$$

Ketvirtasis etapas – pelno gavimo periodas iki visiško laivo nusidėvėjimo. Pažymėtina, kad maksimalus plautuvės atsiperkamumo laikotarpis neturi viršyti likutinio laivo eksploataavimo laikotarpio:

$$PBP \leq T_{ship \text{ exp.}}, \text{ metų} \quad (2.8)$$

čia:  $T_{ship \text{ exp.}}$  – likutinis laivo eksploataavimo laikotarpis, metais.

Siekiant užtikrinti plautuvės įdiegimo rentabilumą, atsiperkamumo laikotarpis turi garantuoti tam tikrą eksploataavimo laikotarpį gaunamą pelną dėl naudojamos įrangos. Vertinant investicijų rentabilumą, rekomenduojama taikyti 5 metų ataskaitinį laikotarpį, kuris gali būti vertinamas kaip maksimaliai leistinas atsiperkamumo laikotarpis:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max } PBP \leq 5, \text{ metų.} \\ T_{ship \text{ exp.}} \geq \text{Max } PBP, \text{ metų.} \end{array} \right. \quad (2.9)$$

Taigi lyginamoji mažasierių degalų ir plautuvės rentabilumo analizė leidžia parinkti konkrečiam laivui optimalų variantą, siekiant įvykdyti MARPOL 73/78 reikalavimus.

Skaiciavimuose visas išlaidas ir pelną žymėsime kaip pinigų srautus  $f(t)$ , tenkančius laiko momentui  $t$ . Tais atvejais, kai naudosime kelių rūšių pinigų srautus, žymėjimą papildysime tam tikrais indeksais ( $f_{in}(t)$ ,  $f_{out}(t)$ ,  $f_{net}(t)$ ). Kiekviename etape pinigų srautus charakterizuoja:

- 1) įplaukos ( $f_{in}(t)$ ),
- 2) išmokos ( $f_{out}(t)$ ),
- 3) grynasis pinigų srautas ( $f_{net}(t)$ ),

- 4) diskontuotas pinigų srautas ( $f_{DCF}(t)$ ),
- 5) dabartinė grynoji vertė ( $NPV$ ),
- 6) paprastasis ir diskontuotasis atsiperkamumo laikotarpis ( $PBP$  ir  $DPBP$ ),
- 7) investicijų pelningumo rodiklis ( $ROI$ ).

Mūsų atveju:

$$f_{in}(t) = EBITDA_{scrub}, \text{ €} \quad (2.10)$$

$$f_{out}(t) = CAPEX_{scrub} + OPEX_{scrub}, \text{ €} \quad (2.11)$$

$$f_{net}(t) = f_{in}(t) + f_{out}(t), \text{ €} \quad (2.12)$$

Diskontuoti pinigų srautai naudojami siekiant įvertinti pinigų vertę konkrečiu laiko momentu. Kaip žinoma, laikui bėgant pinigai nuvertėja. Todėl, siekiant tiksliai įvertinti būsimą pelną, būtina diskontuoti pinigų srautus. Skaičiavimuose naudojama diskonto norma  $E$ :

$$\alpha(t) = \frac{1}{(1 - E)^{t-t^0}} \quad (2.13)$$

$$f_{DCF}(t) = \alpha(t) * f(t), \text{ €} \quad (2.14)$$

čia:  $E$  – diskonto norma (infliacijos intensyvumas), %/metus;  
 $\alpha(t)$  – diskontavimo koeficientas, tenkantis konkrečiam laiko periodui.

$NPV$  – visų įplaukų ir išmokų skirtumas konkrečiu laiko momentu. Toliau  $NPV$  vertinsime kaip bendrą pelną dėl konkrečios technologijos įdiegimo. Todėl technologija vertinama kaip rentabili, jeigu  $NPV$  yra teigiamas.

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{f_{net}(t)}{(1-E)^{t-t^0}}, \text{ €} \quad (2.15)$$

Įvertinus nuvertėjusių pinigų perkamąją galią, apskaičiuojamas diskontuotas atsiperkamumo laikotarpis. Jis visada bus ilgesnis nei nediskontuoto atsiperkamumo laikotarpio. Bendruoju atveju užtenka įvertinti PBP, tačiau DPBP rezultatas yra tikslesnis.

$$PBP = \frac{f_{out}(t)}{f_{in}(t)}, \text{ metų} \quad (2.16)$$

$$DPBP = \frac{f_{out}(t)}{f_{in}(t)} * \alpha(t), \text{ metų} \quad (2.17)$$

ROI – įplaukų ir išmokų santykis per tam tikrą laikotarpį:

$$ROI = \frac{f_{in}(t) * \alpha(t)}{f_{out}(t)} * 100, \% \quad (2.18)$$

Įvertinus technologijos diegimo investicijų specifiką, siūloma rentabilumo vertinimo metodologija leidžia įvertinti vieno ar kito varianto rentabilumą ir nustatyti pinigų srautų apimtį per ataskaitinį laikotarpį. Tačiau šį vertinimą rekomenduojama atlikti pirminiame etape, siekiant nustatyti, ar plautuvės atsiperkamumo laikotarpis tenkina analizuojamo laivo savininką. Toliau būtina atlikti išsamų technologinį plautuvės diegimo vertinimą. Tokio vertinimo rezultatas – tai būtini laivo pakeitimai, siekiant atstatyti pradinis laivo stovumo parametrus. Minėti pakeitimai turi būti išreikšti išlaidų ekvivalentu, o gautais rezultatais patikslintas rentabilumo vertinimas.

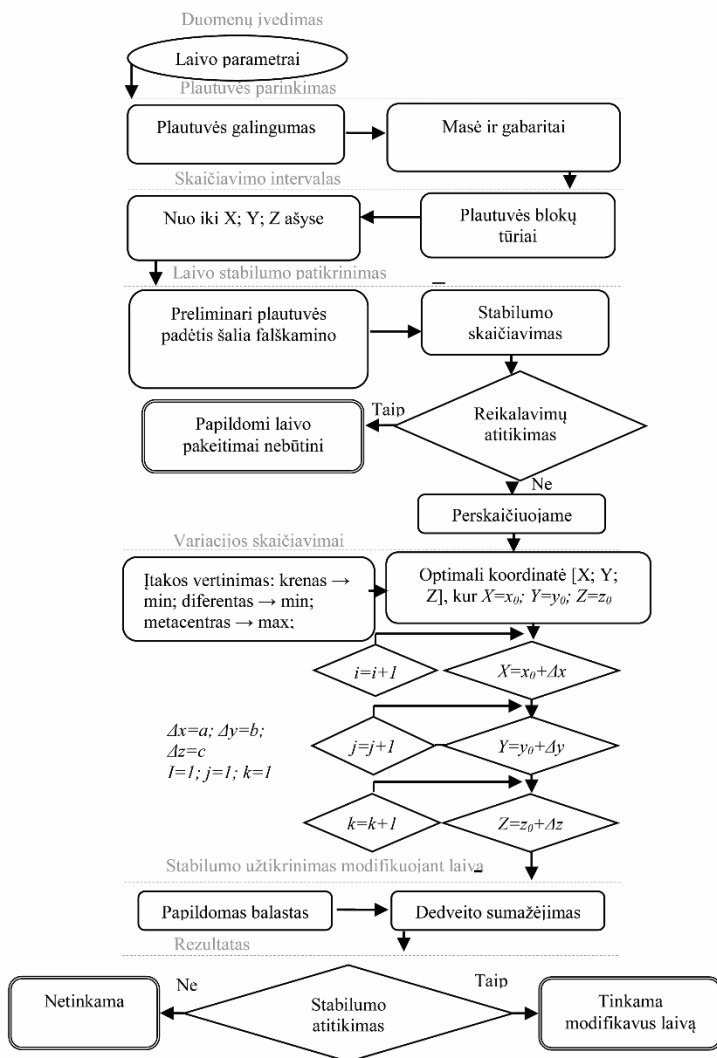
## 2.4. Plautuvės technologinio efektyvumo vertinimas

Nustačius tenkinantį investicijų į plautuvės sistemą atsiperkamumo laikotarpį, atliekamas technologinis vertinimas, siekiant rasti būtinus laivo pakeitimus modernizuoto laivo pradiniais parametrams atstatyti (grimzlė, stovumo charakteristikos ir t. t.).

Paprastai objekto matematinio modeliavimo pagrindas yra jo parametų optimizavimas. Tokį modeliavimą sudaro optimizavimo funkcija su tam tikrais limituojančiais veiksniais. Mūsų atveju įeinantys duomenys yra laivo ir plautuvės parametrai, reikalingi siekiant įvertinti plautuvės įtaką laivo charakteristikoms. Išeinantis duomuo yra laivo charakteristikų pokytis. Variaciniai skaičiavimai arba nepriklausomi optimizavimo funkcijos parametrai leidžia nustatyti funkcijos optimumo reikšmes.

Mūsų atveju pasitelkus optimizavimo funkciją nustatoma plautuvės sistemos padėtis laive, esant minimaliai įtakai laivo charakteristikoms. Akivaizdu, kad optimali padėtis yra laivo masės centras. Todėl skaičiavimus būtina apriboti limituojančiais veiksniais  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  ašyse, t. y. nustatyti ribas, kuriose įmanoma diegti įrangą. Pavyzdžiui, plautuvės blokas įrengiamas šalia laivo jėgainių išmetamojo trakto su tiesioginiu išėjimu į mašinų skyrių. Todėl vertikaloje  $Z$  ir horizontalioje  $X$  ašyje plautuvės padėties apribojimas priklauso nuo mašinų skyriaus ir esamo falškamino padėties. Įrangos padėtis skersai laivo  $Y$  ašyje tiesiogiai priklauso nuo galimybės perplanuoti laivo patalpas taip, kad masė iš abiejų laivo pusių būtų tolygi ir nesusidarytų kreno kampas. Įrangos patalpa, analogiškai kaip ir plautuvė, turi būti apribota mašinų skyriaus padėties. Tačiau įrengiama žemiau plautuvės. Todėl  $Z$  ašyje koordinatės bus apribotos ir plautuvės padėties. Siurbliai išdėstomi esamos siurblinės patalpoje. Todėl jų padėtis yra fiksuota. Akivaizdu, kad optimumo paieška atliekama nurodytame intervale, siekiant nustatyti plautuvės sistemos padėties koordinates su minimaliu neigiamu poveikiu laivo charakteristikoms.

Technologinis plautuvės sistemos diegimo efektyvumas vertinamas 2.6 paveiksle nurodyta seka, naudojant prieš tai parinktus plautuvės sistemos parametrus (2.3 poskyris).



2.7 pav. Plautuvės diegimo vertinimo algoritmas  
**Fig. 2.7.** The algorithm of assessment of scrubber system installation

Parenkame preliminarią plautuvės sistemos padėtį šalia esamo laivo falškamino ir įvertiname laivo stabilumą. Jeigu stabilumo kriterijai neviršija leistinų nuokrypių, plautuvės sistema gali būti diegiama nemodifikuojant laivo papildomai (neperskirstant krovinio, neimant papildomo balasto ir t. t.). Jei stabilumo reikalavimai netenkinami, būtina stabilumą atstatyti. Taikydami variacijos skaičiavimo metodą, parenkame plautuvės sistemos atskirų blokų padėtį laive su minimalia neigiama įtaka laivo stabilumui. Nustatę optimalią padėtį, apskaičiuojame būtinus laivo modifikavimo parametrus (balasto poreikis masei kompensuoti, krovinio masės sumažėjimas). Plautuvės sistema gali būti vertinama kaip dalis pakitusios laivo masės, kuri daro tiesioginę įtaką masės centro poslinkiui. Savo ruožtu pakitęs masės centras turi įtakos svarbiausiems laivo stabilumo parametrams, tokiems kaip metacentras, grimzlė, diferentas, krenas ir kt. Kaip minėta 2.1 poskyryje, plautuvės sistemą sudaro trys pagrindiniai blokai:

- ✓ 47 % masės – tai plautuvė su papildomo falškamino konstrukcija, į kurios masę proporcingai įskaičiuojama  $\frac{1}{2}$  dalies vamzdinių masės;
- ✓ 42 % masės – tai įrangos patalpa su atitvaromis, cirkuliacijos talpyklomis, siurbliais ir dalimi vamzdinių masės;
- ✓ 11 % – tai vandens tiekimo siurbliai su naudoto vandens valymo įrenginiu ir šlamo talpykla.

Būtent šių blokų padėtis vertinama, siekiant nustatyti koordinates su minimalia įtaka laivo stovumui. Kaip minėta, trečiasis siurblių blokas, kuris sudaro 11 % visos sistemos masės, išdėstomas esamų siurblių patalpoje žemiau vaterlinijos. Jo padėtis fiksuota ir apskaičiuojant variaciją nekinta. Pirmojo ir antrojo blokų padėtys keičiamos nustatant optimalią padėties koordinatę. Laivo stabilumo pokytis apskaičiuojamas taikant klasikinius stabilumo skaičiavimo metodus (IMO 2004; IMO 2005; IMO 2008; Rawson *et al.* 2005).

Akivaizdu, kad norint eksploatuoti bet kokį laivą jis turi atitikti saugaus eksploatavimo reikalavimus. Kitaip tariant, laivo su įdiegta plautuve stovumo parametrai neturi viršyti leistinų nuokrypių. Tuo atveju, jeigu įdiegtas plautuvės sistemą 2.2 lentelėje nurodyti parametrai bus viršyti, laivą reikės reklasifikuoti. Atitinkamai optimalios iš-

dėstymo koordinatės skaičiavimas atliekamas tikrinant stabilumo parametrų nuokrypius (IACS 2013):

**2.2 lentelė.** Leistini laivo stabilumo nuokrypiai

**Table 2.2.** Main acceptable tolerances of ship stability

Stabilumo parametrų nuokrypiai	Reikšmė
Nepakrauto laivo masė $m_{lightship}$	2 %
Masės centras $\delta X_{CG}$	1 % arba max 50 cm
$\delta Y_{CG}$	0,5 % arba max 5 cm
$\delta Z_{CG}$	1 % arba max 5 cm
Grimzlė $T_{MD}$	1 % arba max 5 cm
Metacentras $\overline{GM}_L$	1 % arba max 50 cm
$\overline{GM}$	1 % arba max 5 cm
Diferento kampas $\theta$	1 %
Kreno kampas $\varphi$	neleistinas

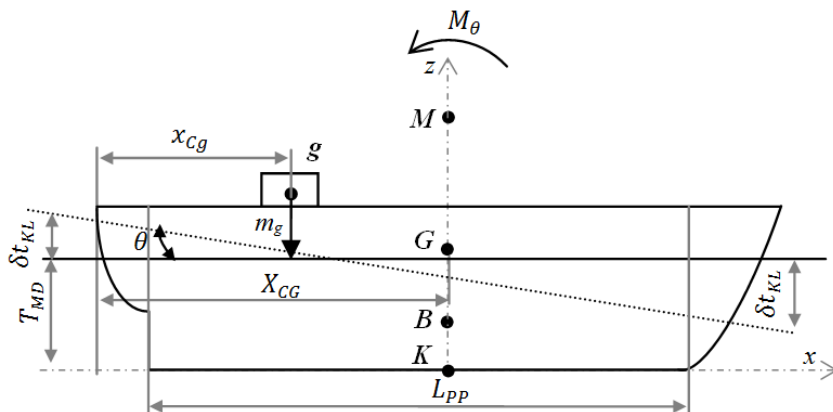
Projektuojant laivą arba rengiant jo modernizavimo projektą, atliekant stabilumo skaičiavimus, įvertinami visi geometriniai laivo parametrai. Atitinkamai skaičiavimai yra masyvūs ir priešprojektinėje plautuvės efektyvumo vertinimo stadijoje sunkiai pritaikomi. Todėl, siekiant supaprastinti stabilumo vertinimo metodiką, skaičiavimuose vietoj tikslių geometrinių laivo parametrų naudojami korpuso formos koeficientai (bendras laivo korpuso, vaterlinijos, midelšpanhauto pilnumo ir kiti).

Toliau pateikti skaičiavimai bus naudojami vertinant plautuvės įtaką laivo stovumui. Pirmasis laivo stabilumo parametras, kurio leistini nuokrypiai nurodyti 2.2 lentelėje, yra nepakrauto laivo masė:

$$m'_G = m_{lightship} + m_g, t \quad (2.19)$$

čia:  $m'_G$  – laivo masė su plautuve, t;  $m_{lightship}$  – nepakrauto laivo masė, t;  $m_g$  – plautuvės masė, t.

Kitas parametras yra laivo masės centras, kuriam įtakos turi instaliuotos plautuvės sistemos masė  $m_g$ . Kitaip tariant, laivo masės centras  $G$  pasislinks plautuvės masės centro  $g$  link:



**2.8 pav.** Laivo ir plautuvės sistemos masės centrai  
**Fig. 2.8.** Ship and scrubber system gravity centres

$G$  – pradinis laivo masės centras,  $g$  – plautuvės sistemos masės centras,  $B$  – plūdrumo masės centras,  $M$  – metacentras,  $K$  – kilio linija. Pradinis laivo masės centras  $G$  gali būti vertinamas kaip jėga, veikianti per plūdrumo masės centro tašką, t. y.  $X_{CB} = X_{CG}$ . Tuo tarpu plautuvės sistemos masės centras dažniausiai išdėstomas arčiau laivagalio. Todėl masės centras su plautuvės sistema atitinkamai pasislinks  $x_{CG}$ ,  $y_{CG}$ ,  $z_{CG}$  arčiau plautuvės. Pakitusio masės centro padėties nuokrypis  $\delta X_{CG}$ ,  $\delta Y_{CG}$ ,  $\delta Z_{CG}$  apskaičiuojamas taip:

$$\delta X_{CG} = \frac{m_g(x_{cg} - X_{CG})}{m_G + m_g}, \text{ m} \quad (2.20)$$

$$\delta Y_{CG} = \frac{m_g(y_{cg} - Y_{CG})}{m_G + m_g}, \text{ m} \quad (2.21)$$

$$\delta Z_{CG} = \frac{m_g(z_{CG} - Z_{CG})}{m_G + m_g}, m \quad (2.22)$$

Pasislinkusio masės centro koordinatės turi įtakos išilginiam  $\overline{GM}_L$  ir skersiniam  $\overline{GM}$  metacentriniam aukščiui:

$$\overline{GM}_L = R + Z_{CB} - Z_{CG}, m \quad (2.23)$$

$$\overline{GM} = r + Z_{CB} - Z_{CG}, m \quad (2.24)$$

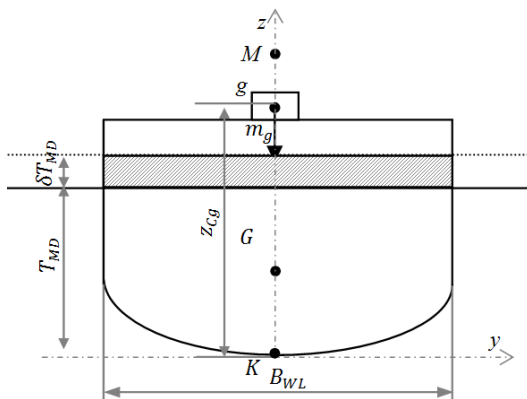
čia:  $R = \frac{0.08 \cdot L_{PP}^2}{T_{MD}}$  ir  $r = \frac{0.08 \cdot B_{WL}^2}{T_{MD}}$  – išilginis ir skersinis metacentriniai spinduliai, m;  $Z_{CB} = \frac{T}{1 + \frac{C_M}{C_{WP}}}$  – plūdrumo masės centras, m;  $C_M$  ir  $C_{WP}$  – midelšpanhauto ir vaterlinijos pilnumo koeficientai (Biran, Pulido 2014).

Atitinkamai metacentrinio aukščio nuokrypiai apskaičiuojami:

$$\delta \overline{GM}_L = \frac{m_g}{m_G + m_g} (T_{MD} + \frac{\delta T_{MD}}{2} - \overline{GM}_L - z_{CG}), m \quad (2.25)$$

$$\delta \overline{GM} = \frac{m_g}{m_G + m_g} (T_{MD} + \frac{\delta T_{MD}}{2} - \overline{GM} - z_{CG}), m \quad (2.26)$$

Kitas stabilumo parametras yra laivo grimzlė, kuri tiesiogiai priklauso nuo laivo masės pokyčio:



**2.9 pav.** Laivo grimzlė su įrengta plautuve  
**Fig. 2.9.** Draught of ship with scrubber

Laivo grimzlė charakterizuojama bendra vidutine korpuso grimzle, diferentu ir krenu. Bendras vidutinis grimzlės nuokrypis apskaičiuojamas:

$$\delta T_{MD} = \frac{m_g}{L_{PP} * B_{WL} * \rho * C_{WP}}, \text{ m} \quad (2.27)$$

čia:  $L_{PP}$  – laivo ilgis tarp statmenų, m;  $B_{WL}$  – laivo plotis projektinėje vaterlinijoje, m;  $\rho$  – vandens tankumas, 1,0 upėse ir 1,025 jūroje;  $C_B$  – bendras laivo korpuso pilnumo koeficientas.

Jeigu laivo grimzlė laivagalyje ir laivapriekyje nesutampa, tai pasireiškia diferentas. Diferentas atsiranda tik tuo atveju, jei pradinis laivo masės centras nesutampa su plautuvės sistemos masės centru. Būtina pažymėti, kad diferentas į laivapriekį yra neleistinas. Tuo tarpu į laivagalį – leistas, tačiau nepageidautinas. Diferentas charakterizuojamas išilginiu laivo posvyrio kampu, o jo nuokrypis apskaičiuojamas taip:

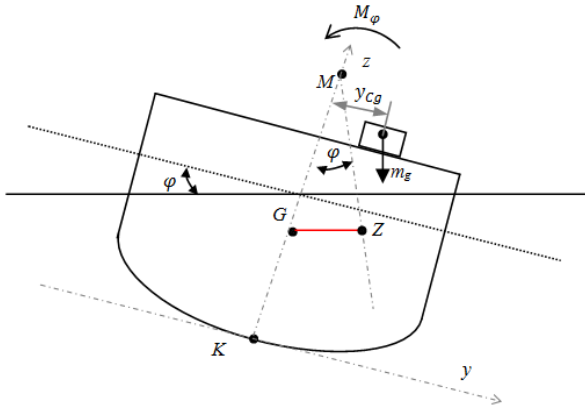
$$\delta\theta = 57.3 \cdot \operatorname{arctg} \frac{m_g(x_{CG} - X_{CG})}{(m_G + m_g)\overline{GM}_L} \quad (2.28)$$

Jeigu plautuvės sistema išdėstoma arčiau laivagalio –  $x_{CG} < X_{CG}$ , tai diferentas yra į laivagalį ir  $\delta t_{KL} < 0$ . Priešingu atveju, diferentas yra į laivagalį ir  $\delta t_{KL} > 0$ . Be posvyrio kampo, diferentas taip pat charakterizuojamas ir grimzlės nuokrypiu:

$$\delta t_{KL} = \frac{M_\theta}{M_{TM}}, \text{ m} \quad (2.29)$$

čia:  $M_\theta = m_g(x_{CG} - X_{CG})$  – diferento momentas su plautuve, t/m;  $M_{TM} = \frac{m_g \cdot \overline{GM}_L}{L_{PP}}$  – momento pokytis laivui nugrimzdus vieną metrą giliau, t/m/m.

Jeigu plautuvės sistema išdėstoma arčiau vieno ar kito borto ir  $x_{CG} \neq 0$ , tai pasireiškia krenas:



**2.10 pav.** Laivo krenas su instaliuota plautuve  
**Fig. 2.10.** The heel of ship with scrubber

Pažymėtina, kad krenas į kairinį ar dešinįjį bortą yra neleistinas. Tai reiškia, kad  $y_{CG}$  turi sutapti su  $Y_{CG}$  arba atitinkamai turi būti pers-

kirstyta laivo masė. Pavyzdžiui, jeigu plautuvės sistema išdėstoma kairiajame borte, į dešinią būtina perkelti analogiškos masės krovinį krenui kompensuoti. Kreno nuokrypis apskaičiuojamas:

$$\delta\varphi = 57,3 \cdot \frac{m_g \cdot y_{cg}}{m_G \cdot \overline{GM}}, \quad (2.30)$$

čia:  $\varphi$  – kreno kampas;  $y_{cg}$  – plautuvės sistemos masės centro atstumas nuo laivo masės centro skersai laivo, m.

Pagrindinis laivo stabilumo parametras yra atstojamasis petys  $\overline{GZ}$ , kuris tiesiogiai priklauso nuo papildomos masės, išdėstomos vertikaliajoje laivo padėtyje, grimzlės ir metacentrinio aukščio pokyčio.  $\overline{GZ}$  esant mažam posvyrio kampui apskaičiuojamas taip (Rawson *et al.* 2005):

$$\overline{GZ} = \overline{GM} * \sin\varphi, \text{ m} \quad (2.31)$$

Atstojamojo peties nuokrypis:

$$\delta\overline{GZ} = \delta\overline{GM} * \sin\delta\varphi, \text{ m} \quad (2.32)$$

Apibendrinant plautuvės diegimo efektyvumo vertinimo stabilumo kriterijai yra:

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta m_g \leq 0,02 m_{\text{lightship}}, \text{ t} \\ \delta X_{CG} \leq 0,01 X_{CG} \text{ ar } \delta X_{CG} \leq 0,5, \text{ m} \\ \delta Y_{CG} \leq 0,005 Y_{CG} \text{ ar } \delta Y_{CG} \leq 0,05, \text{ m} \\ \delta Z_{CG} \leq 0,01 Z_{CG} \text{ ar } \delta Z_{CG} \leq 0,05, \text{ m} \\ \delta T_{MD} \leq 0,01 T_{MD} \text{ ar } \delta T_{MD} \leq T_{MD} + 0,05, \text{ m} \\ \delta\theta \leq 0,01\theta \\ \delta\varphi \cong 0 \\ \delta\overline{GM}_L \leq 0,01 \overline{GM}_L \text{ ar } \delta\overline{GM}_L \leq 0,5, \text{ m} \\ \delta\overline{GM} \leq 0,01 \overline{GM} \text{ ar } \delta\overline{GM} \leq 0,05, \text{ m} \\ \delta\overline{GZ} \leq 0,05 \overline{GZ} \text{ ar } \delta\overline{GZ} \leq 0,05, \text{ m} \end{array} \right. \quad (2.33)$$

Išvardyti kriterijai tiesiogiai priklauso nuo bendros plautuvės sistemos masės ir išdėstymo laive. Pažymėtina, kad laivo grimzlė turi būti lygi pradinei. Todėl bet kuriuo atveju siektina atsisakyti dalies krovinio masės ir kompensuoti plautuvės sistemą.

Bendruoju atveju plautuvės išdėstymo optimizavimas yra iš anksto žinomas: kuo arčiau laivo masės centro. Tačiau dėl įrangos išdėstymo specifikos ir laisvų patalpų trūkumo laive optimizacijos funkcija negali būti visiškai formalizuota. Kitaip tariant, dalį sprendimų, neatsižvelgiant į skaičiavimo rezultatus, priima laivo savininkas. Pavyzdžiui, esant galimybei atsisakyti dalies krovinio arba provizijos konkrečioje laivo patalpoje, plautuvės sistema išdėstoma toje vietoje. Atitinkamai skaičiavimuose patalpų rezervai įvedami praplečiant arba susiaurinant sistemos blokų išdėstymo intervalą. Atsižvelgiant į tai, optimalių išdėstymo koordinacių paieška atliekama diferento ir kreno kampo, skersinio metacentrinio aukščio ir atstojamojo peties variacijos skaičiavimais.

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta\theta = 57,3 \cdot \arctg \frac{m_g(x_{CG} - X_{CG})}{(m_G + m_g)\overline{GM}_L}, \\ \delta\varphi = 57,3 \cdot \frac{m_g \cdot y_{CG}}{m_G \cdot \overline{GM}}, \\ \delta\overline{GM} = \frac{m_g}{m_G + m_g} (T_{MD} + \frac{\delta T_{MD}}{2} - \overline{GM} - z_{CG}), \text{ m} \\ \delta\overline{GZ} = \delta\overline{GM} * \sin\delta\varphi, \text{ m} \end{array} \right. \quad (2.34)$$

Atitinkamai optimizavimo kriterijai yra:

- ✓  $\delta X_{CG} \rightarrow \delta\theta \min$  užtikrinti tokį plautuvės sistemos išdėstymą išilgai laivo X ašies atžvilgiu, kad laivo diferento kampas būtų minimalus. Atitinkamai papildomo balasto arčiau laivapriekio ar laivagalio (priešingoje plautuvės išdėstymo pusėje), siekiant išlyginti laivą, X ašyje poreikis bus proporcingai mažesnis;
- ✓  $\delta Y_{CG} \rightarrow \delta\varphi \min$  užtikrinti tokį plautuvės sistemos išdėstymą skersai laivo Y ašies atžvilgiu, kad laivo kreno kampas būtų minimalus. Atitinkamai papildomo balasto ar masės atsikymo priešingo borto pusėje poreikis bus mažesnis;

- ✓  $\delta Z_{CG} \rightarrow \delta \overline{GM} min$  užtikrinti tokį plautuvės sistemos išdėstymą vertikaliai laivo Z ašies atžvilgiu, kad laivo metacentrinis aukštis būtų maksimalus;
- ✓  $\delta Y_{CG}$  ir  $\delta Z_{CG} \rightarrow \delta \overline{GZ} min$  atitinkamai užtikrinus optimalų išdėstymą X ir Y ašyse laivo stovumo charakteristika pakinta minimaliai;
- ✓ plautuvės sistemos ir būtino papildomo balasto masė kompensuojama atsisakius dalies krovinio.

Siūlomi metodologiniai pagrindai leidžia įvertinti plautuvės sistemos įtaką laivo stabilumui ir nustatyti optimalų blokų išdėstymą laive. Nustatčius optimalią plautuvės blokų išdėstymo vietą, apskaičiuojami būtini pakeitimai pradiniam laivo stovumui atstatyti: papildomas balastas plautuvės blokų svoriui kompensuoti ir laivo padėčiai horizontalėje išlyginti; esamo laivo dedveito sumažinimas proporcingai bendram sistemos ir papildomo balasto svoriui. Skaičiavimams supaprastinti rekomenduojama papildomą balastą išdėstyti priešingoje laivo pusėje arba numatyti tikslią koordinatę balastinėje talpykloje, kurioje yra tūrio rezervas, o jo vieta laive užtikrina laivo padėties išlyginimą. Gauti rezultatai išreiškiami nuostolių pavidalu, o jų pagrindu patikslinamas plautuvės diegimo rentabilumas, naudojant 2.3 skyriuje pateiktą algoritmą.

## 2.5. Antrojo skyriaus išvados

1. Plautuvės diegimo efektyvumui vertinti pasiūlyti metodologiniai pagrindai susideda iš trijų vertinimo etapų: preliminarus ekonominis vertinimas; technologinis vertinimas; patikslintas ekonominis vertinimas, atsižvelgiant į gautus technologinio vertinimo rezultatus.
2. Plautuvės efektyvumo vertinimas pagrįstas lyginamaisiais tyrimais, siekiant nustatyti plautuvės atsipirkimo laikotarpį lyginant su mažasierių degalų naudojimu;
3. Plautuvės vertinimo metodologija buvo papildyta technologiniu vertinimu. Remiantis gautais technologinio vertinimo rezultatais, buvo nustatyti būtini laivo patalpų išdėstymo ir pakrovimo plano pakeitimai, kurie įvertinti ekonominio vertinimo etape.



# 3

---

## Plautuvės efektyvumo vertinimo matematinis modeliavimas

Plautuvės sistemos diegimo efektyvumo vertinimo matematinis modeliavimas buvo kuriamas remiantis gautais laivuose instaliuotų plautuvių projektais. Tyrimų metu buvo susipažinta su skirtingų plautuvės įrangos gamintojų, tokių kaip *Wärtsilä Hamworthy Krystallon*, *Alfa Laval Aalborg*, *Couple Systems*, *Clean Marine*, parengtais plautuvės diegimo ir eksploataavimo projektais. Analizuojamos plautuvės sistemos buvo įdiegtos jau eksploatuojamuose skirtingų tipų laivuose – du projektai tanklaiviuose, du ro-ro ir penki ro-pax keltuose bei du – konteinervežiuose.

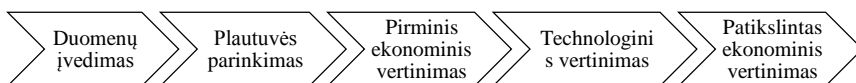
Rengiant plautuvės efektyvumo vertinimo matematinį modeliavimą, publikuoti šeši straipsniai: trys mokslo žurnaluose, įtrauktuose į *Thomson ISI* sąrašą (Panasiuk and Lebedevas 2014; Panasiuk *et al.* 2015; Panasiuk and Turkina 2015); vienas – mokslo žurnale, cituojama

mame *Inspec* duomenų bazėje (Panasiuk *et al.* 2014); vienas – recenzuojamame mokslinių darbų rinkinyje (Панасюк и Туркина 2015); vienas – recenzuojamame tarptautinio doktorantų seminaro mokslinių darbų rinkinyje (Panasiuk 2015).

### 3.1. Matematinio modeliavimo etapai

2 skyriuje aprašyti plautuvės diegimo efektyvumo vertinimo metodologiniai pagrindai realizuoti kompiuterine programa. Pirminiame kompiuterinės programos kūrimo etape visi skaičiavimai buvo atliekami *Microsoft Excel* programa, vėliau juos integruojant interneto tinklalapyje.

Plautuvės diegimo projektas daugeliu atvejų reikalauja nemažai laiko atliekant sudėtingus inžinerinius skaičiavimus. Pažymėtina, kad atliekant tokius skaičiavimus būtina naudoti daugelį konkretaus laivo geometrinų propulsinių ir kitų duomenų, kurie priešprojektinėje stadijoje gali būti neprieinami. Todėl technologijos pasirinkimo etape netikslinga skirti daug išteklių analizuojant variantą, kuris konkrečiam laivui gali būti neoptimalus. Atsiranda poreikis atlikti patikimą technologijos (plautuvės arba mažasierių degalų) diegimo efektyvumo vertinimą, kuris nereikalauja sudėtingų inžinerinių skaičiavimų. Tuo tikslu buvo atrinkta 16 skirtingų tipų laivuose įdiegtų plautuvių projektų, kurių duomenys naudoti kuriant statistinę kompiuterinės programos bazę. Efektyvumo vertinimas atliekamas šia tvarka:



#### 3.1 pav. Plautuvės diegimo efektyvumo vertinimo schema

**Fig. 3.1.** The scheme of efficiency assessment of scrubber installation

Duomenų įvedimas suskirstytas į atskiras dalis:

- ✓ Laivo duomenys, reikalingi plautuvės sistemai parinkti: plautuvės prijungimo tipas (tiesioginis arba integruotas); jėginių galingumas (kW); variklio taktų skaičius (2 arba 4); specifi-

nės kuro sąnaudos esant maksimaliai variklio apkrovai (g/kWh); buvimas ECA zonoje (% nuo reisų trukmės), specifinės ir metinės kuro sąnaudos (g/kWh ir t/metus), reisų trukmė (h/metus); laivo autonomiškumas (šlamo atidavimo dažnumas) (h).

- ✓ Duomenys pirminiam ekonominiam vertinimui: HFO ir mažasierių degalų kaina (€/t); NaOH kaina (€/t); degalų perjungimo kaina (€/metus); maksimalus pageidaujamas atsiperkimumo laikotarpis.
- ✓ Duomenys technologiniam vertinimui: laivo tipas pagal paskirtį (žvejybinis, krovininis ir t. t.) ir pagal plaukiojimo rajoną (upinis, jūrinis); laivo ilgis tarp statmenų (m); laivo plotis midelyje (m); nepakrauto laivo masė (t); dedveitas (t); pilnai pakrauto ir laivo su balastu grimzlė, masės centro koordinatės [X; Y; Z], metacentrinis aukštis, diferentas; skaičiavimo intervalas – mašininio skyriaus ir išmetamųjų dujų trakto padėtis laive (nuo – iki) X, Y, Z ašyse, siurblių skyriaus padėties koordinatės [X; Y; Z]; balasto talpyklų koordinatės priešingoje pusėje nei išdėstyta plautuvė laive [X; Y; Z].
- ✓ Duomenys patikslintam ekonominiam vertinimui: krovinio gabenimo kaina; likutinis laivo eksploatavimo periodas.

### DUOMENŲ ĮVEDIMAS/Bendri laivo duomenys

Laivo pavadinimas

Laivo tipas

Plaukiojimo rajonas

**DUOMENŲ ĮVEDIMAS**

Laivo aukštis, m

Laivo povandeninės dalies turis, m<sup>3</sup> V

Nepakrauto laivo svoris, t

Laivo krovinė talpa

Laivas

Fishing

Užje

LOA 100 LBP LVL

B 10

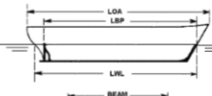
d<sub>0.5</sub>

R

Variklių skaičius, vnt

Pagindiniu

Pagabtinu



### DUOMENŲ ĮVEDIMAS/Technologiniam vertinimui

### DUOMENŲ ĮVEDIMAS/Intervalas

Mašininio skyriaus (engine room) padėtis laive X ašyje, m

Mašininio skyriaus (engine room) padėtis laive Y ašyje, m

Mašininio skyriaus (engine room)

Xes MIN MAX

Yes MIN MAX

Zone MIN MAX

### DUOMENŲ ĮVEDIMAS/Ekonominiam vertinimui

Buvimas ECA rajonuose, %

Reisų trukmė per metus, h

Apskaičiuotos kuro sąnaudos per metus, kg

Sunkiojo kuro kaina, \$/t

Mažasiojo kuro kaina, \$/t

Kuro perjungimo sąnaudos, \$/year

Krovinio gabenimo kaina, \$/t

Likutinis laivo eksploatacijos periodas, year

Maksimalus atsipirkimo laikotarpis, year

Laivo autonomiškumas (buvimas reise be atsargų papildymo) atitinka bunkeravimo laikotarpį, h

Banko patalpanos (jeigu iešos skirtos skruberio pirkimui bus laikomos banke), %

T<sub>ECA</sub>

T<sub>TRIP</sub>

G<sub>FUEL PER YEAR</sub>

TAS

I

Atgal
Toliau

**3.2 pav.** Duomenų įvedimo laukai kompiuterinėje programoje

**Fig. 3.2.** Data input in software

Duomenų įvedimui supaprastinti dalis įvedimo laukų pildomi pasirenkant reikiamą variantą (pavyzdžiui, laivo tipą, plaukiojimo rajoną ir t. t.). Pirminiam vertinimui dalis pildomų laukų, tokių kaip duomenys technologiniam vertinimui, gali būti nepildomi.

Plautuvės parinkimą sudaro::

- ✓ metinių kuro sąnaudų skaičiavimas (t/metus);

- ✓ plautuvės galingumo skaičiavimas (kg/s);
- ✓ sistemos elementų parinkimas pagal plautuvės galingumą;
- ✓ atskirų blokų tūrio ir masės identifikavimas ( $m^3$ , t) – technologiniam vertinimui;
- ✓ bendros sistemos masės identifikavimas – preliminariam ekonominiam vertinimui.

Metinės degalų sąnaudos apskaičiuojamos pagal variklio darbo režimus reiso metu. Kuriant universalų matematinį modelį, tinkantį skirtingos paskirties laivams, taikomas supaprastintas metinis degalų sąnaudų skaičiavimas:

$$G_{fyear} = t_{trip} \cdot G_{fuel}, \text{ t/metus} \quad (3.1)$$

$$G_{fuel} = P_{en} b_{en} \sum_{i=1}^n \bar{P}_e w_i, \text{ t/val.} \quad (3.2)$$

čia:  $G_{fyear}$  ir  $G_{fuel}$  – metinės ir valandinės degalų sąnaudos, t/metus ir t/val.;  $t_{trip}$  – reisų trukmė per metus, val./metus;  $P_{en}$  ir  $b_{en}$  – atitinkamai nominalus variklio galingumas ir specifinės degalų sąnaudos, kW ir g/kWh;  $\bar{P}_e$  – santykinis galingumas esant atitinkamam variklio darbo režimui, %,  $w_i$  – darbo režimo svertai.

Konkrečiam variklio darbo režimui (100 %, 75 %, 50 % ir 25 % apkrovos) svertai  $w_i$  parenkami tokia priklausomybe: 0,2 esant 100 % apkrovos; 0,5 esant 75 %; 0,15 esant 50 % ir 25 % (ISO 8178-1:2006). Atitinkamai  $G_{fcycle}$  gali būti išreiškiamos:

$$G_{fuel} = P_{en} b_{en} (1 \cdot 0,2 + 0,75 \cdot 0,5 + 0,15 \cdot 0,5 + 0,15 \cdot 0,25) = P_{en} b_{en} \cdot 0,6875 \cdot 10^{-6}, \text{ t/h.} \quad (3.3)$$

Atitinkamai:

$$G_{fyear} = t_{trip} \cdot P_{en} b_{en} \cdot 0,6875 \cdot 10^{-6} \quad (3.4)$$

Vadovaujantis įrangos gamintojų rekomendacijomis, plautuvės debitas parenkamas apskaičiavus bendrą jėgainių galingumą ir įvertinus išmetamųjų dujų kiekį esant maksimaliam apkrovimui (MRC 100 %) (žr. 2.2 poskyrį 2.1 formulę).

Siekiant atlikti pirminį ekonominį vertinimą, reikia žinoti bendrą visų elementų masę, kuri naudojama skaičiuojant krovinių keliamosios galios sumažėjimą. Siekiant atlikti technologinį vertinimą, reikia žinoti atskirų plautuvės sistemos blokų tūrį ir masę, kurie naudojami optimizuojant kiekvieno bloko išdėstymo koordinatę. Skaičiuojant naudojami įrangos gamintojų pateikiami statistiniai plautuvės sistemos elementų parametrai, atsižvelgiant į jos galingumą. Kompiuterinėje programoje visi duomenys saugomi lentelės pavidalu, automatiškai parenkant visus reikalingus parametrus pagal apskaičiuotą plautuvės galingumą (žr. duomenų fragmentą 3.1 ir 3.2 lentelėse).

### 3.1 lentelė. Plautuvės sistemos elementų svoriai (t)

**Table 3.1.** The mass of scrubber system elements (t)

Plautuvės debitas, kg/s	Elementų masė, t											
	Plautuvės blokas			Įrangos blokas			Siurblių blokas				Kita	Iš viso
	Plautuvė	Falskaminio korpusas	Dujų analizatorius	Cirkuliacijos modulis	Aušinimo modulis	Pertvaros	NaOH modulis	Valymo modulis	Šlamo talpykla	Vandens analizatorius	Vamzdynas, el. kabeliai	Bendra sistemos masė
<b>15</b>	1,3	2,6	0,0	1,4	0,5	1,7	0,0	0,3	0,4	0,0	2,0	10,8
<b>108</b>	5,3	10,5	0,1	5,7	2,1	7,0	0,1	1,1	1,8	0,2	8,0	44,0
<b>201</b>	8,9	17,6	0,2	9,6	3,5	11,8	0,2	1,8	3,0	0,3	13,5	73,9
<b>614</b>	23,7	46,9	0,7	25,5	9,3	31,3	0,4	4,9	8,0	0,7	35,6	196,7
<b>935</b>	34,7	68,7	1,0	37,3	13,6	45,8	0,6	7,2	11,8	1,1	52,2	288,0
<b>1013</b>	37,4	74,0	1,0	40,2	14,7	49,4	0,7	7,7	12,7	1,2	56,3	310,5
<b>128,2</b>	46,4	91,8	1,3	49,8	18,2	61,3	0,8	9,6	15,7	1,4	69,9	385,2

Plautuvės debitas, kg/s	Elementų masė, t											
	Plautuvės blokas			Įrangos blokas			Siurblių blokas				Kita	Iš viso
	Plautuvė	Falškamino korpusas	Dujų analizatorius	Cirkuliacijos modulis	Aušinimo modulis	Pertvaros	NaOH modulis	Valyimo modulis	Šlamo talpykla	Vandens analizatorius	Vamzdynas, el. kabeliai	Bendra sistemos masė
<b>149,2</b>	53,4	105,7	1,5	57,3	21,0	70,5	1,0	11,0	18,1	1,7	80,3	443,3
<b>160,8</b>	57,2	113,2	1,6	61,4	22,5	75,5	1,0	11,8	19,4	1,8	86,0	474,8
<b>174,9</b>	61,2	121,1	1,7	65,7	24,1	80,8	1,1	12,6	20,7	1,9	92,0	508,0
<b>200,0</b>	65,4	129,4	1,8	70,2	25,7	86,4	1,2	13,5	22,2	2,0	98,5	542,9

### 3.2 lentelė. Plautuvės sistemos atskirų blokų tūris ir masė (m<sup>3</sup>, t)

**Table 3.2.** The volume and mass of scrubber system blocks (m<sup>3</sup>, t)

Plautuvės debitas	Atskirų sistemos blokų tūris ir masė						
	Plautuvės blokas		Įrangos blokas		Siurblių blokas		
	kg/s	m <sup>3</sup>	t	m <sup>3</sup>	t	m <sup>3</sup>	t
<b>1,5</b>		2,92	4,74	2,42	4,45	0,37	1,60
<b>10,8</b>		30,88	19,31	25,58	18,15	3,95	6,53
<b>20,1</b>		67,03	32,43	55,53	30,48	8,58	10,97
<b>61,4</b>		284,50	86,36	235,70	81,17	36,44	29,20
<b>93,5</b>		495,51	126,44	410,52	118,85	63,46	42,76
<b>101,3</b>		552,52	136,28	457,75	128,10	70,77	46,08
<b>128,2</b>		758,49	169,07	628,39	158,92	97,15	57,17
<b>149,2</b>		934,54	194,58	774,24	182,90	119,70	65,80
<b>160,8</b>		1 032,00	208,42	854,98	195,91	132,18	70,48
<b>174,9</b>		1 143,03	223,00	946,97	209,62	146,40	75,41
<b>200,0</b>		1 256,68	238,30	1 041,13	224,00	160,96	80,59

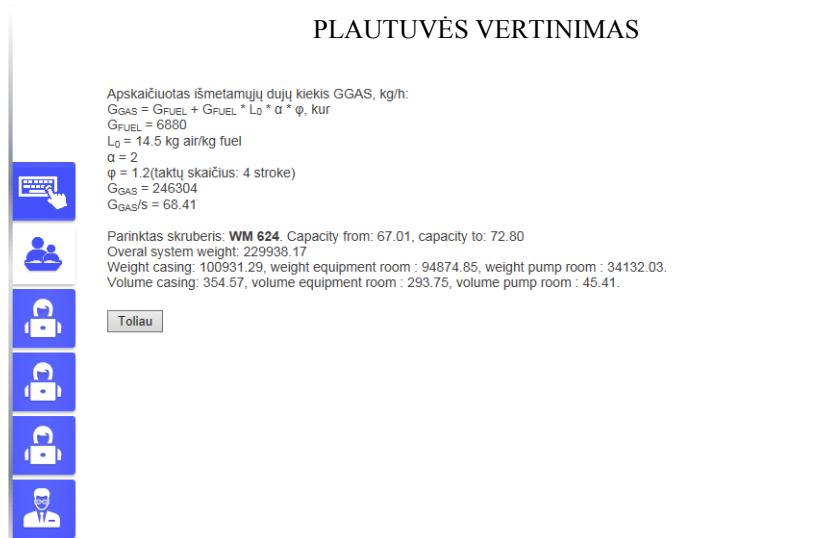
Išanalizavus skirtingų gamintojų siūlomos įrangos parametrus, buvo nustatyti neženklūs skirtumai tarp sistemų sudėties (elementai ir jų kiekis), masės ir tūrio. Todėl skaičiavimuose skirtingų gamintojų įrangos skirtumai nevertinami.

Kompiuterinėje programoje sukurta plautuvės sistemų duomenų bazė, kurioje saugomi visi elementų parametrai priklausomai nuo plautuvės galinumą. Atsižvelgiant į neženklus skirtumus tarp įrangos gamintojų, programoje naudojami *Wärtsilä*, *Aalborg* vidutiniai elementų parametrų duomenys. Prireikus kompiuterinė programa leidžia įvesti kelias įrangos parametrų duomenų bazines (atskirai kiekvieno įrangos gamintojo). Tokiu atveju programa atliks lyginamąją plautuvės sistemų analizę. Taip pat galima bus atlikti ir skirtingų gamintojų palyginimą. Kompiuterine programa plautuvės sistema bus parenkama automatiškai, naudojant prieš tai įvestus laivo ir jo jėgainės duomenis, apskaičiuojamas plautuvės debitas ir identifikuojami kiekvieno sistemos elemento parametrai:

**PLAUTUVĖS VERTINIMAS**

Apskaičiuotas išmetamųjų dujų kiekis GGAS, kg/h:  
 $GGAS = GFUEL + GFUEL * L_0 * \alpha * \varphi$ , kur  
 GFUEL = 6880  
 $L_0 = 14.5$  kg air/kg fuel  
 $\alpha = 2$   
 $\varphi = 1.2$  (taktų skaičius: 4 stroke)  
 GGAS = 246304  
 GGAS/s = 68.41

Parinktas skruberis: **WM 624**. Capacity from: 67.01, capacity to: 72.80  
 Overall system weight: 229938.17  
 Weight casing: 100931.29, weight equipment room : 94874.85, weight pump room : 34132.03.  
 Volume casing: 354.57, volume equipment room : 293.75, volume pump room : 45.41.



**3.3 pav.** Plautuvės sistemos parinkimas kompiuterine programa

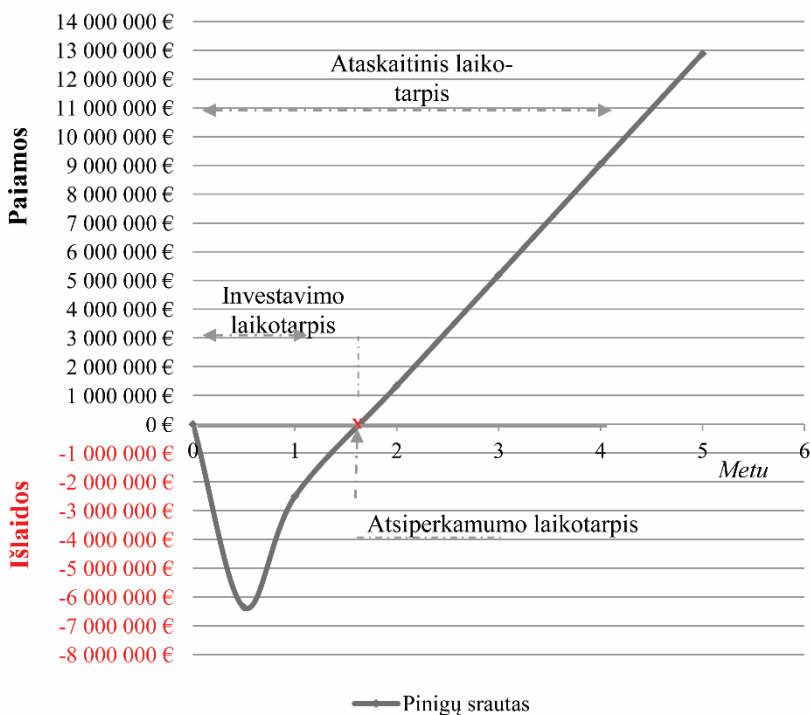
**Fig. 3.3.** The selection of scrubber system in software

Apskaičiavus plautuvės galinumą ir nustatčius visos sistemos parametrus, atliekamas pirminis ekonominis vertinimas. Vertinimas atliekamas siekiant nustatyti plautuvės atsiperkamumo laikotarpį ir įvertinti, ar apskaičiuotas atsiperkamumas tenkina konkretaus laivo savininko poreikius. Šiame etape nevertinamos išlaidos, atsiradusios dėl prarasto pelno, susijusio su papildomo balasto priėmimu (stovumui atkurti). Pirminio ekonominio vertinimo metų skaičiuojama:

- ✓ plautuvės sistemos kapitalinės, diegimo ir laivo prastovos, dokumentacijos rengimo bei laivo reklasifikavimo išlaidos;
- ✓ sistemos eksploatavimo išlaidos;
- ✓ mažasierių ir HFO degalų naudojimo išlaidų skirtumas;
- ✓ plautuvės atsiperkamumas, įvertinus degalų išlaidų skirtumą.

Prieš atliekant pirminį ekonominį vertinimą, būtina nustatyti maksimalų atsiperkamumo laikotarpį, kuris tenkintų laivo savininką. Įvertinus visas išlaidas, susijusias su plautuvės įdiegimu ir eksploatavimu, apskaičiuojama, per kokį laikotarpį sutaupytos lėšos, naudojant pigesnę HFO, viršys investicijas į plautuvę.

Kompiuterine programa apskaičiuojamos visos išlaidos ir pajamos (sutaupytos lėšos naudojant HFO) per ataskaitinio plautuvės diegimo efektyvumo vertinimo laikotarpį (žr. 2.3 poskyrį):



**3.4 pav.** Grafinis pinigų srautų vaizdavimas  
**Fig. 3.4.** Graphic representation of the cash flow

Įvertinus visas išlaidas ir pajamas, apskaičiuojamas pasirinktas plautuvės atsiperkamumo laikotarpis (žr. 2.3 poskyrį 2.7 formulę).

Tuo atveju, jeigu apskaičiuotas PBP neviršija nustatyto maksimalaus laikotarpio, plautuvės įdiegimas vertinamas kaip rentabilus ir atliekamas vertinimo detalizavimas. Tačiau nustačius ilgesnį PBP, laivo savininkui rekomenduojama nediegti plautuvės sistemos ir naudoti mažasierius degalus.

Įsitikinus, kad plautuvės įdiegimas konkrečiam laivui bus rentabilus, atliekamas technologinis vertinimas. Vertinimas atliekamas siekiant nustatyti pasirinktos plautuvės sistemos įtaką stovumui ir identifikuoti būtinus laivo pakeitimus. Technologinis vertinimas susideda iš:

- ✓ optimalios plautuvės sistemos blokų išdėstymo koordinatės paieškos nustatytame laivo korpuso intervale;
- ✓ stovumo vertinimo;
- ✓ būtinų laivo pakeitimų identifikavimo.

Optimalus plautuvės blokų išdėstymas apskaičiuojamas nustatytame laivo korpuso koordinatinių intervale. Plautuvės įdiegimo efektyvumo vertinimui supaprastinti kompiuterinėje programoje įdiegta skirtingos paskirties laivų geometrinių charakteristikų duomenų bazė: korpuso pilnumo koeficientai, metacentrinis aukštis ir t. t. Todėl atliekant skaičiavimus užtenka įvesti laivo ilgio, pločio, masės duomenis.

Optimalumo kriterijus vertinamas kaip minimalus laivo masės centro koordinatinių nuokrypis nuo pradinių reikšmių (žr. 2.4 poskyrį 2.20-2.22 formules).

Kompiuterinėje programoje įvestas skaičiavimo intervalas – laivo patalpos, kuriose įmanoma instaliuoti plautuvės sistemos blokus. Skaičiavimai atliekami naudojant rekomenduojamą 1 mm žingsnį arba nurodant norimą.

Nustačius optimalaus išdėstymo koordinates, atliekamas stovumo vertinimas. Laivo stovumas vertinamas X, Y, Z kryptimis, apskaičiuojant diferento bei kreno kampų ir metacentrinio aukščio pokytį (žr. 2.4 poskyrį 2.34 formules).

Nustačius stovumo charakteristikų viršijimą, apskaičiuojamas būtinasis papildomas balastas laivo posvyriui kompensuoti:

$$\begin{cases} m_g x_{Cg} = |m_b(x_{Cb})|, \text{ tm} \\ m_g y_{Cg} = |m_b(y_{Cb})|, \text{ tm} \\ m_g z_{Cg} = |m_b(z_{Cb})|, \text{ tm} \end{cases} \quad (3.5)$$

čia:  $m_b$  – papildomo balasto masė, t;  $x_{Cb}$ ,  $y_{Cb}$ ,  $z_{Cb}$  – patalpos koordinatės (priešingoje pusėje nei išdėstyta plautuvės sistema), kurioje įmanoma išdėstyti papildomą balastą, m.

Nustačius būtinus laivo pakeitimus ir įvertinus dėl laivo krovinių keliamosios galios sumažėjimo patirtus nuostolius, tikslinamas plautuvės įdiegimo atsiperkamumas (3.1.6 formulė).

Pateikiant vertinimo rezultatus, kompiuterine programa gaunami:

- ✓ pagrindiniai gabaritiniai plautuvės sistemos blokų matmenys (masė, tūris);
- ✓ sistemos blokų išdėstymo koordinatės;
- ✓ papildomo balasto poreikis (t);
- ✓ atsiperkamumo laikotarpis (metų).

## 3.2. Matematinio modelio adaptavimas

Kompiuterinėje programoje naudojama plautuvės sistemos duomenų bazė sukurta *Wärtsilä* įrangos gamintojo duomenų pagrindu. Sistemos gabaritai ir išdėstymo specifiška buvo tikslinama 11 įrangos projektuotojų parengtų projektų pagrindu.

Programos praktinis taikymas atliktas įvertinus Lietuvos laivyno modernizavimo galimybę laivuose įdiegti plautuvės sistemą. Laivų duomenų bazė kompiuterinėje programoje pritaikyta Lietuvos laivynui ir atitinka esamų laivų paskirtį. Tačiau prireikus duomenų bazė praplečiama, papildant geometrinius laivų parametrus kompiuterinėje programoje. Atitinkamai kompiuterinę programą galima naudoti neapsiribojant Lietuvos laivyno vertinimu.

### 3.2.1. Lietuvos laivyno apžvalga

Per paskutinį dvidešimtmetį Lietuvos laivynas sumažėjo nuo 308 laivų 1995 m. iki 107 laivų 2015 m. (žr. 3.3 lentelę). Atitinkamai per šį laikotarpį sumažėjo ir laivyno tonažas: nuo 647 000 iki 426 000 bruto tonų (BT) (Lietuvos saugios laivybos administracija 2015).

**3.3 lentelė.** Lietuvos laivyno mažėjimas**Table 3.3.** Decrease of the Lithuanian fleet

Metai / įregistruotų laivų skaičius								
1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014	2015
308	249	175	141	121	113	110	108	106

**3.4 lentelė.** 2015 m. Lietuvoje įregistruotų laivų sąrašas**Table 3.4.** Number of vessels registered in the Lithuania in 2015

Laivo paskirtis	Skaičius	Bendrasis tonažas (bruto tonos, BT)
Žvejybos	46	53 202
Krovininiai	26	128 986
Transportinis refrižeratoriai	9	28 664
Ro-ro keltas / ro-pax keltai	8	190 880
Vilkikai	11	3 690
Spec. paskirties	6	1 977
Naftos tanklaivis	1	2 021

Lietuvos laivynas pradėjo mažėti 1995–2000 m., kai laivybės verslą iš valstybės perėmė privatūs valdytojai. Dalis laivų buvo perduota arba įregistruota šalyse, kuriose mokamas mažesni pelno mokesčiai. Laivyno mažėjimui ženklų įtaką turėjo paskutinio dešimtmečio ekonominė krizė, kuri laivybės sektorių labiausiai paveikė 2010–2011 metais. Vien tik per 2011 metus Lietuvoje buvo išregistruota net 20 laivų. Nyksta žvejybos ir prekybos laivynai.

Žvejybos laivyno mažėjimas iš dalies yra susijęs su Europos Sąjungos išmokomis už laivų utilizavimą. Dalis laivų savininkų savo laivus ne modernizavo, o atidavė metalo laužui. Šiandienos situacija, kai Baltijos jūroje eksploatuojami laivai turi atitikti SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo reikalavimus, gali padidinti Lietuvos laivyno utilizavimo in-

tensyvumą. Nuo Lietuvos vėliavos atsieta ir dalis okeaninės žvejybos laivų. Didžiųjų žvejybos laivų savininkai savo laivus registruoja ne Lietuvoje, o mažesnių mokesčių šalyse. Jei dėl įsigaliojusių direktyvų dalis laivyno persiskirstys iš ECA rajonų, tai neatsiejamai turės įtakos tam, kad laivai su Lietuvos vėliava bus perregistruojami kitose šalyse.

Be pastebimo laivų skaičiaus ir tonažo mažėjimo, Lietuvos laivynas pamažu sensta, ir šiandien vidutinis laivų amžius yra 20–22 metai (Marine traffic 2015).

**3.5 lentelė.** Vidutinis Lietuvos laivų amžius 2015 m.

**Table 3.5.** The average age of the Lithuanian fleet in 2015

Laivo paskirtis	Vidutinis amžius
Žvejybos	30
Spec. paskirties	28
Transportinis refrižeratoriai	22
Vilkikai	21
Krovininiai	20
Ro-ro keltas / ro-pax keltai	13

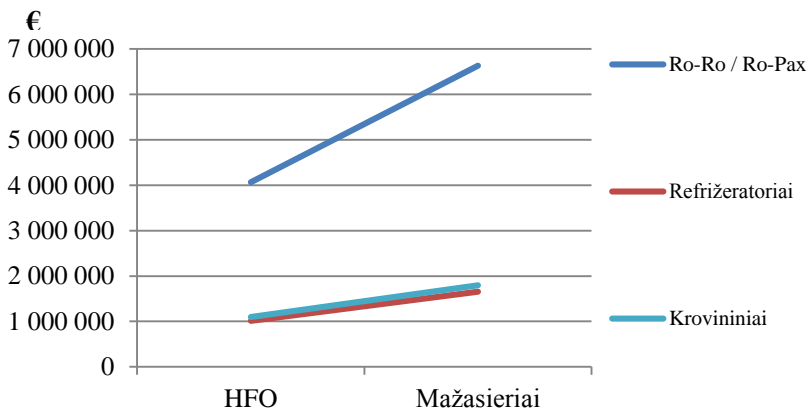
Senesnių laivų eksploatavimas neatsiejamas nuo didesnių eksploatavimo sąnaudų. Be to, tokio laivo modernizavimas instaliuojant plautuvę tampa ne toks rentabilus dėl sutrumpėjusio liekamojo eksploatavimo laikotarpio. Pagal įrangos gamintojų rekomendacijas, vidutinis laivo amžius neturi viršyti 25 metų, siekiant užtikrinti plautuvės įdiegimo atsiperkamumą (Wärtsilä 2013; DNV 2012).

Laivyno, kurio didžioji dalis laivų yra senesni nei 20 m., modernizavimas, siekiant vykdyti SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo reikalavimus, yra problematiškas. Todėl netinkamas SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo technologijos pasirinkimas gali turėti įtakos laivų utilizavimo intensyvumui arba laivų eksploatavimo rajono keitimui.

### 3.2.2. Lietuvos laivyno modernizavimo vertinimas

Siekiant pritaikyti kompiuterinę programą, Lietuvos laivynas buvo padalintas į laivų grupes pagal paskirtį: žvejybos; krovininiai; transportiniai refrižeratoriai; ro-ro ir ro-pax keltai; vilkikai; spec. paskirties. Pažymėtina, kad žvejybos, vilkikai bei spec. paskirties laivai naudoja švaresnį MDO, o ne HFO. Todėl paminėti laivai nevertinami analizuojant plautuvių įdiegimo rentabilumą. Atlikus laivyno analizę, buvo nustatyta, kad, priklausomai nuo laivo paskirties, plautuvės įdiegimas nevienodai paveiks laivų rentabilumą, kuris tiesiogiai priklauso nuo laivo krovininės keliamosios galios. Plautuvės sistemos debitas tiesiogiai priklauso nuo laivo jėgainės galingumo. Pavyzdžiui, krovininiams laivams, esantiems sąlyginai didelės krovininės talpos (DWT), reikia nedidelio galingumo jėgainės. Tuo tarpu žvejybos laivai, atvirksčiai, būdami sąlyginai didelės krovininės talpos (DWT), turi galingas jėgaines. Todėl plautuvės sistemos įtaka žvejybos laivams yra ženkliai didesnė nei sausakrūviams. Mažesniai žvejybos laivai reikės galingesnės ir atitinkamai sunkesnės plautuvės sistemos nei, pavyzdžiui, sausakrūviui laivui. Atitinkamai didžiausia plautuvės sistemos įtaka yra žvejybos, spec. paskirties ir sausakrūviams laivams. Todėl šių tipų laivuose įdiegti plautuvės sistemą bus sudėtingiau nei, pavyzdžiui, keltuose, refrižeratoriuose ar konteinervežiuose.

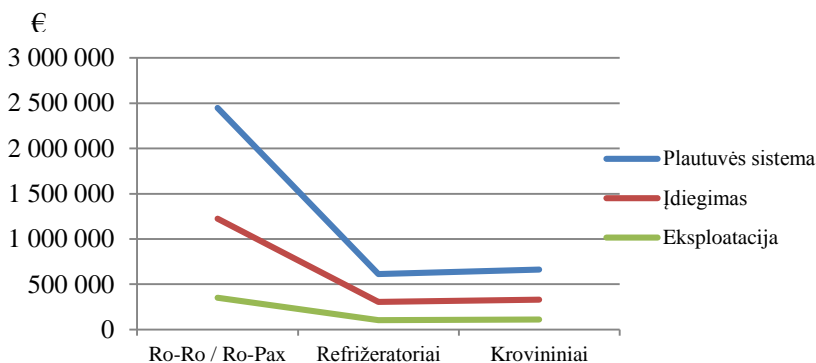
Ženklius ir eksploatacinių išlaidų skirtumai. Atsižvelgiant į dabartinio laikotarpio mažasierių ir HFO degalų kainų skirtumą, Lietuvos laivyno pervedimas naudoti mažasierius degalus gali padidinti sumines laivų eksploatacines išlaidas iki 55 mln. €, arba iki 38 % kiekvienam laivui.



**3.8 pav.** Išlaidų palyginimas naudojant HFO ir mažasierius degalus  
**Fig. 3.8.** HFO and low sulphur fuel costs comparisson

Atitinkamai keltuose, kurie per metus sunaudoja didesnę degalų kiekį, plautuvės įdiegimas bus efektyvesnis. Tuo tarpu spec. paskirties laivuose išlaidos išauga neženkliai, todėl investicijos į plautuvę gali neatsipirkti.

Lietuvos laivyno modernizavimas, laivuose įdiegiant plautuvės sistemą, kainuotų iki 88 mln. €. Atsižvelgiant į tai, kad laivynas, nors nėra didelis (106 laivų), bet sąlyginai senas (20–30 m.), tokios investicijos yra ženklios. Vidutiniškai vienam laivui prireiks nuo 0,5 iki 4,5 mln. € plautuvės sistemai nusipirkti ir įdiegti. Pažymėtina, kad, be šių sąnaudų, plautuvės metinės eksploatacinės sąnaudos siekia nuo 100 000 iki 500 000 €:



**3.9 pav.** Plautuvės įdiegimo išlaidos priklausomai nuo laivo paskirties

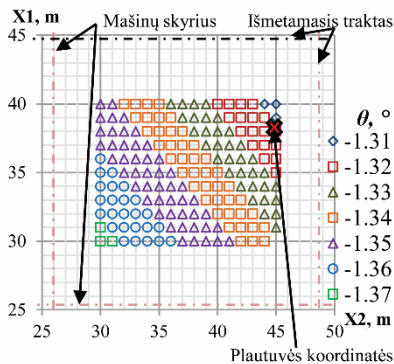
**Fig. 3.9.** Costs of scrubber installation depending on ship type

Atliktas tyrimas rodo, kad tik dalį Lietuvos laivyno laivų tikslinga modernizuoti, įdiegiant plautuves. Pagrindinė to priežastis – laivų amžius ir dydis. Likusiai daliai laivų rekomenduojama naudoti mažasierius degalus. Tačiau atsižvelgiant į laivų amžių ir nepakankamą eksploatavimo intensyvumą (neišnaudojamas metinis laivų eksploatavimo rezervas dėl užsakymų trūkumo), galima daryti prielaidą, kad dalis senesnių ir rečiau eksploatuojamų laivų pakeis eksploatavimo rajoną, išeidami iš ECA zonų, arba bus utilizuoti. Todėl tikėtina, kad 2015–2020 m. galimas ženklus Lietuvos laivyno sumažėjimas.

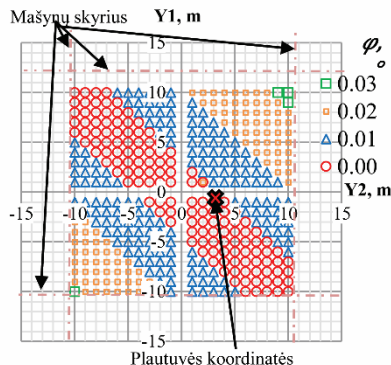
### 3.2.3. Plautuvės diegimo efektyvumo vertinimas ro-pax kelte

Pasiūlytos kompiuterinės programos taikymas pateikiamas ro-pax kelto (DFDS) pavyzdžiu. Pradiniu laivo duomenų pagrindu buvo parinkta 41 kg/s galingumo 245 t masės ir 778 m<sup>3</sup> tūrio plautuvės sistema. Atlikus pirminį ekonominį vertinimą, buvo apskaičiuotas 1,55 metų atsiperkamojo laikotarpis, kuris tenkina rekomenduojamą iki 5 metų (žr. 2 skyrių).

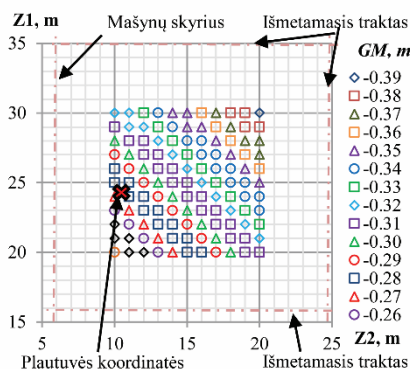
Optimalaus išdėstymo koordinatės buvo nustatytos variacijos skaičiavimo metodu. Atlikus skaičiavimus, buvo gauti tokie rezultatai:



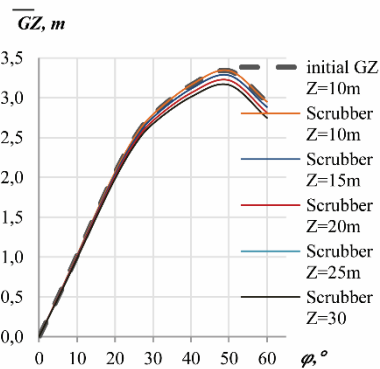
3.10 pav. Diferento nuokrypiai  
 Fig. 3.10 The deviation of trimming angle



3.11 pav. Kreno nuokrypiai  
 Fig. 3.11. The deviation of heeling angle



3.12 pav. Metacentro nuokrypiai  
 Fig. 3.12. The deviation of metacentric height

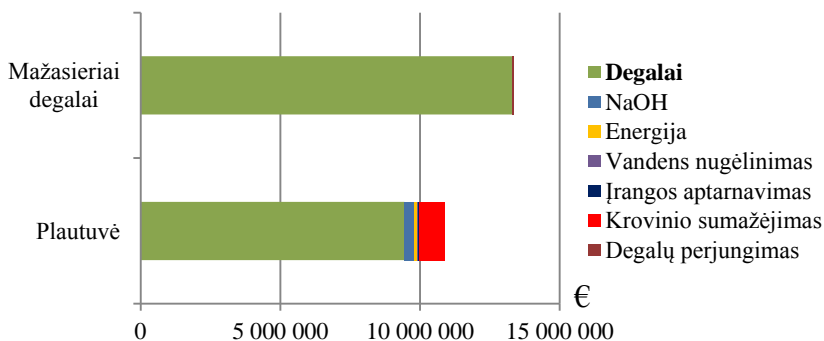


3.13 pav. Atstojamojo peties nuokrypiai  
 Fig. 3.13. The deviation of righting arm

Skaičiavimo metu buvo identifikuojamos plautuvės sistemos išdėstymo koordinatės, esant minimaliam masės centro koordinatžių nuokrypiui nuo pradinių matmenų. Skaičiavimai buvo atliekami nustatytoose intervaluose, kurie rasti atsižvelgiant į analizuojamo laivo mašinų skyrius ir išmetamojo trakto padėtį laive: X ašyje nuo 30 iki

45 m; Y – nuo –10 iki 10 m; Z – nuo 10 iki 30 m. Gautus duomenis palyginus su parengtu plautuvės diegimo projektu, buvo nustatyta, kad sistemos išdėstymo koordinatė (pažymėta ✕) patenka į gautų rezultatų lauką. Visiškai sutapti koordinatės negali, nes sistemos bloko padėtis tikslinama atsižvelgiant į laivo savininkui priimtina patalpų keitimą. Atsižvelgiant į diferento kampo nuokrypį X ašyje, sistemos blokai gali būti išdėstyti 5 x 5 m ploto intervale (nuo 35 iki 40 m išilgai laivo). Y ašies atžvilgiu, nenaudojant papildomo balasto priešingame laivo borte, sistemos blokai gali būti išdėstyti 2 x 3 m plote (nuo 0 iki 3 m abiejuose laivo bortuose). Z ašyje sistemos blokai išdėstomi nuo 10 iki 25 m aukštyje. Atsižvelgiant į tai, kad bendra sistemos masė sudaro 2,63 % nepakrauto laivo masės, o tai viršija leistiną  $\leq 2$  % nuokrypį, sistemos masei kompensuoti būtina atsisakyti 244 t krovinių. Susidaręs diferentas, atsiradęs dėl sistemos išdėstymo arčiau laivagalio, kompensuojamas imant papildomai 120 t balasto 85 m atstumu nuo sistemos išdėstymo koordinatės išilgai laivo, arčiau laivapriekio. Todėl bendras krovinių keliamosios galios sumažėjimas yra 364 t.

Įvertinus patirtus nuostolius dėl sumažėjusios krovinių keliamosios galios, buvo atliktas patikslintas ekonominis vertinimas. Skaičiavimams naudojama 2015-05-15 dienos degalų kaina – HFO 322 €/t ir mažasierių degalų kaina – 557 €/t; degalų kainų skirtumas  $\Delta C_{fuel} = 235 €/t$ , arba 73 %. Išlaidų palyginimas pateiktas 3.14 paveiksle:



3.14 pav. Metinių eksplotacinių išlaidų palyginimas

Fig. 3.14. The comparison of an annual operational costs

Didžiausios išlaidos, diegiant plautuvę, tenka atskaitinio laikotarpio pradžiai (įrangos pirkimas ir diegimas). Tačiau įvertinus ženklias sutaupytas lėšas, naudojant pigesnius HFO degalus, plautuvė atsiperka jau antrais eksploatavimo metais. Toliau pasireiškia plautuvės naudojimo pelningumas (2–5 metais). Taigi net ir esant pastoviai šiandienos degalų kainai, plautuvės įdiegimas užtikrins pelną daugiau nei trejus atskaitinio laikotarpio metus. Mažasierių degalų ir HFO kainų skirtumas turi tiesioginę įtaką investicijų efektyvumo rodikliams. Vertinant 2015-05-15 kainų skirtumą, įplaukos per atskaitinį laikotarpį sudarys 130 % išlaidų. Plautuvės atsiperkamumas tiesiogiai priklauso nuo degalų kainos svyravimo. Todėl skaičiavimus būtina tikslinti atsižvelgiant į rinkos situaciją.

### 3.4. Trečiojo skyriaus išvados

1. Pasiūlyta plautuvės diegimo efektyvumo vertinimo metodologija.
2. Pasiūlyta metodologija realizuota kompiuterinės programos pavidalu.
3. Surinkta plautuvės sistemos ir laivo parametrų duomenų bazė.

4. Sukurtoje kompiuterinėje programoje surinkta duomenų bazė leidžia esant ribotam laivo duomenų kiekiui nustatyti plautuvės įdiegimo įtaką laivui ir investicijų atsiperkamumui;
5. Kompiuterinė programa adaptuota įvertinus Lietuvos laivyno modernizacijos efektyvumą.



# 4

---

## Plautuvės technologijos eksperimentiniai tyrimai eksploatavimo sąlygomis

4 skyriuje aprašyti plautuvės technologijos eksploatacinių parametrų ir charakteristikų tyrimų rezultatai realiomis eksploatavimo sąlygomis (laivui esant reise). Tokio tipo tyrimai, plautuvei dirbant realiomis eksploatavimo sąlygomis, literatūroje aprašyti nepakankamai. Daugelyje publikacijų aprašomi įrangos gamintojų pateikiami plautuvės sistemos veikimo principai ir projektinis dujų valymo efektyvumas. Tai pagrindžia atliekamo eksperimentinio tyrimo aktualumą. Tyrimų tikslą sudaro:

1. Išanalizuoti plautuvės sistemos išdėstymą laive, vertinant jos įtaką laivo stovumui, esamų sistemų funkcionavimui, patalpų ir dedveito pakitimui.
2. Patvirtinti sistemos išdėstymo principus.

3. Tiesioginiais dujų emisijos matavimais įvertinti ekologinį plautuvės technologijos efektyvumą CO, CH, NO<sub>x</sub>, S, SO<sub>x</sub> atžvilgiu.

Plautuvės sistemos išmetamųjų dujų valymo efektyvumas buvo vertintas atliekant eksperimentinius tyrimus *Victoria Seaways* ro-pax keltė (DFDS 2014). Matavimai buvo atliekami dviem plautuvės darbo režimais: uždarame ir atviraime kontūruose. Dujų valymo efektyvumas buvo vertinamas realiomis įrangos eksploatavimo sąlygoms reiso metu. Tyrimas atliktas 2014 m. vasario 7–10 d. laivui plaukiojant iš Klaipėdos į Kyli ir atgal iš Kylio į Klaipėdą. 7–9 d. štormo metu dėl saugumo išmetamųjų dujų koncentracija už plautuvės nebuvo matuojama, tačiau buvo fiksuojami sistemos valdymo pulto rodmenys. 9–10 d. buvo atliekami dujų koncentracijos matavimai prieš valymą plautuvėje ir po jo, lygiagrečiai buvo fiksuojami ir valdymo pulto rodmenys. Atliekant matavimus, buvo užtikrinamas pastovus variklių darbo režimas esant skirtingoms apkrovoms: 50, 60 ir 70 % MCR (maksimalus nuolatinis didžiausios galios reitingas). Atskirai buvo matuojami A ir B pagrindinių variklių išmetamųjų dujų parametrai esant atitinkamiems variklio darbo režimams.

Atlikto eksperimento rezultatai pristatyti doktorantų seminare „International PhD Seminar on Maritime Science“ Kalmaro jūreivystės akademijoje Švedijoje.

Analizuojamos plautuvės sistemos paleidimas eksploatuoti užtruko (įdiegta 2014 m. vasario mėn.) dėl priešlaikinio sistemos įdiegimo dar iki MARPOL reikalavimų įsigaliojimo 2015 m. sausio 1 d. Visus 2014 metus sistema buvo testuojama ir derinama. Paleidžiant sistemą, buvo susidurta su šiomis esminėmis problemomis:

- ✓ užbortinio vandens ėmimo filtrų laidumo nepankamumas;
- ✓ techninio vandens paruošimo sistemos nepakankamas pajėgumas;
- ✓ įrengimų patalpos nesandarumas.

Visi minėti klausimai buvo išspręsti, tačiau jie ženkliai pailgino numatytą dviejų mėnesių sistemos diegimo ir paleidimo laikotarpį. Iš esamos patirties galima teigti, kad tokio tipo sistemos vidutinis paleidimo laikotarpis yra iki šešių mėnesių Tuo tarpu iš anksto pagaminus plautuvės sistemos elementus ceche, laivo prastova dėl remonto užtrun-

ka nuo 2 iki 4 savaičių. Likusį laiką įrangos gamintojai atlieka darbą laivui esant reise ir netrukdo jo įprasto darbo.

#### 4.1. Eksperimento objektas

Eksperimento metu buvo analizuojama įdiegtos plautuvės sąveika su esamomis laivo sistemomis ir įtaka laivo saugaus eksploatavimo charakteristikoms. Tyrimo metu buvo išskirti trys pagrindiniai objektai:

- ✓ laivas;
- ✓ pagrindiniai varikliai (A ir B);
- ✓ plautuvės sistema.

##### 4.1.1. Laivo techninė charakteristika

Tiriama plautuvės sistema įdiegta keleiviniame keltė *Victoria Seaways*.



**4.1 pav.** Analizuojamas laivas

**Fig. 4.1.** The analysed ship

Techniniai analizuojamo laivo duomenys:

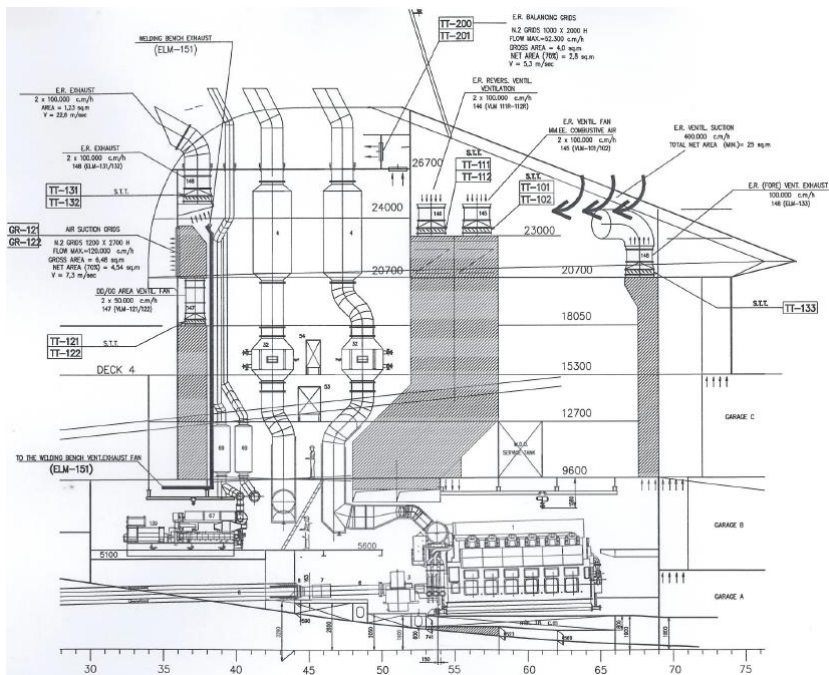
- ✓ IMO numeris – 9350721
- ✓ laivo tipas – ro-pax;
- ✓ klasė – RINA;
- ✓ vėliava – Lietuvos;
- ✓ pastatymo metai – 2009;
- ✓ statytojas – Nuovi Canterie Apuani, Italija
- ✓ laivo savininkas – DFDS Seaways, Danija;
- ✓ laivo operatorius – DFDS Seaways, Lietuva;
- ✓ ilgis – 199,14 m;

- ✓ plotis – 26,6 m;
- ✓ grimzlė – 6,4 m;
- ✓ bruto tonažas – 25 518;
- ✓ dedveitas – 8 500 t;
- ✓ greitis – 23,5 mazgų;
- ✓ krovinių talpa – 3063 l/m;
- ✓ keleivių vietų skaičius – 515 – 399 vietos kajutėse ir 116 sėdimųjų vietų salone;
- ✓ reisas – Klaipėda–Kylis, Kylis–Klaipėda;
- ✓ reiso trukmė į vieną pusę – 21 val.;
- ✓ reiso atstumas – 735 km;
- ✓ eksploataavimo intensyvumas – 318 d/metus, vidutiniškai 19,9 val/parą (Iš Klaipėdos į Kylių reisas 20,5 val., pakrovimas 5 val.; iš Kylio į Klaipėdą reisas 22 val., pakrovimas 4 val.)

#### 4.1.2. Laivo eigos variklių techninė charakteristika

Analizuojamame laive yra trys varikliai: du pagrindiniai ir vienas pagalbinis. Pagalbinis variklis yra varomas MDO, todėl jo išmetamasis traktas nesujungtas su plautuvės sistema. Tyrimuose vertinami A ir B pagrindiniai varikliai:

- ✓ variklių tipas – 2x Wärtsilä 12V46;
- ✓ taktų skaičius – 4;
- ✓ galingumas – 2x12 MW;
- ✓ maksimalus išmetamųjų dujų kiekis – 2x21,4 kg/s;
- ✓ specif. kuro sąnaudos – 176 kg/MWh.



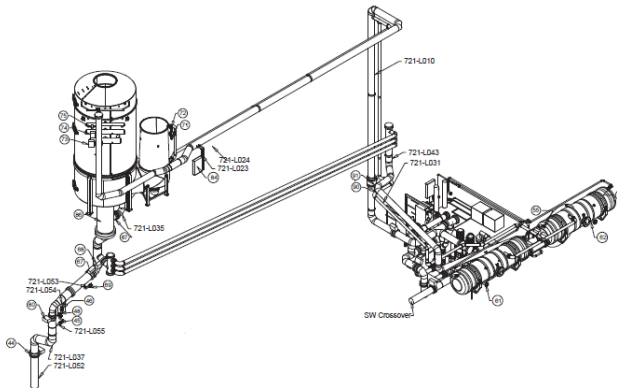
4.2 pav. Variklių ir išmetamojo trakto išdėstymo schema prieš diegimą  
 Fig 4.2. The scheme of engines and exhausts location before installation

#### 4.1.3. Plautuvės sistemos techninė charakteristika

Laive įdiegta integruota plautuvės sistema, kuri sujungia dviejų pagrindinių (A ir B) variklių išmetamųjų dujų vamzdyną ir dujas išvalo bendroje sistemoje.

- ✓ Plautuvės prijungimas prie variklių išmetamojo trakto – integruotas.
- ✓ Plautuvės tipas – mišrus (uždaras kontūras uoste, atviras jūroje).
- ✓ Maksimalus dujų debitas – 43,05 kg/s.
- ✓ Išmetamųjų dujų temperatūra – 380° C.
- ✓ CO<sub>2</sub> koncentracija išmetamosiose dujose – 6,1 %.
- ✓ Sudžių koncentracija išmetamosiose dujose – 0,5 kg/MWh.
- ✓ Projektinis variklių apkrovimas – 100 % MCR.
- ✓ Maksimalus HFO sieringumas – 1 %.

- ✓ Jūrinio vandens šarmingumas – 1 500  $\mu\text{mol/l}$ .
- ✓  $\text{SO}_x$  valymo efektyvumas – 0,1 % sieros koncentracijos ekvivalentas HFO.
- ✓ Energijos poreikis – atviraime kontūre 359 kW; uždaraime kontūre 258.
- ✓ Geometriniai parametrai:
  - ✓ plautuvės ilgis – 7,9 m;
  - ✓ plautuvės aukštis – 10,9 m;
  - ✓ plautuvės skersmuo – 4,7 m;
  - ✓ plautuvės tūris – 404,7  $\text{m}^3$ ;
  - ✓ plautuvės masė (konstrukcijos) – 23,2 t;
  - ✓ plautuvės masė (darbinė) – 33,5 t;
  - ✓ bendroji sistemos masė (darbinė) – 230 t.



**4.3 pav.** Plautuvės sistema

**Fig. 4.3.** Scrubber system

Testuojama plautuvės sistema susideda iš:

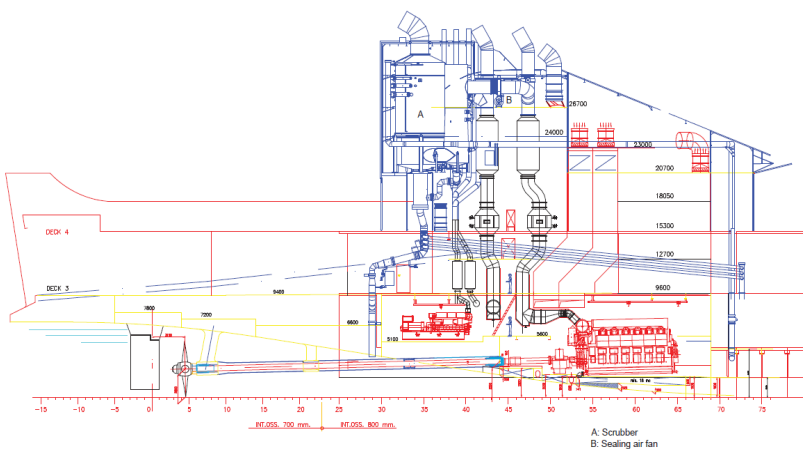
- ✓ išmetamųjų dujų valymo sistemos (plautuvės) su paplatinto falškamino korpusu;
- ✓ išmetamųjų dujų trakto sujungimo ir nukreipimo į plautuvę sistemos;
- ✓ ventiliacijos sistemos;

- ✓ vandens tiekimo sistemų;
- ✓ NaOH sistemos;
- ✓ nuotekų, vandens valymo ir šlamo saugojimo sistemų;

## 4.2. Plautuvės sistemos išdėstymo laive patikslinimas

Plautuvės sistemos blokų išdėstymas laive:

- ✓ plautuvės falškamino korpusas esamo falškamino konstrukcijoje: plautuvė; išmetamojo trakto kolektorius;
- ✓ plautuvės įrangos patalpa trečiame denyje, dešiniame borte: 2 cirkuliacijos talpyklos ir siurbiai; 2 aušintuvai ir siurbiai; valymo modulis; vandens analizatorius; 2 NaOH tekimo siurbiai ir modulis;
- ✓ siurblių patalpa 1 denyje: 2 užbortinio vandens siurbiai.



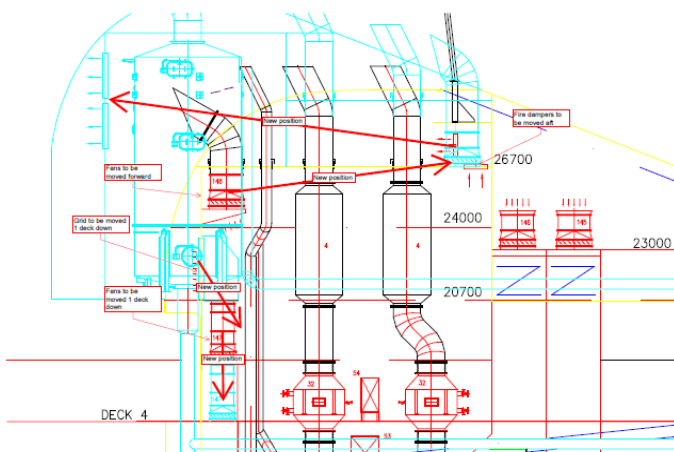
**4.4 pav.** Plautuvės sistemos išdėstymas laive (išilgai ir skersai laivo)  
**Fig. 4.4.** The location of scrubber system (longitudinal and transverse)

Analizuojamame plautuvės projekte kiekvieno elemento išdėstymo vietos buvo parenkamos atsižvelgiant į esamą plotų rezervą. Projekto rengimo stadijoje paminėtas išdėstymo koordinacių parinkimas yra primumas ir plačiai taikomas. Tačiau kalbant apie priešprojektinį plautuvės elementų įrengimo vietų numatymą, išsami visų laivo patalpų analizė yra neefektyvi. Priešprojektinė stadija yra skirta plautuvės technologijos tinkamumui įvertinti, atsižvelgiant į konkretaus laivo charakteristikas. Todėl vertinimas turėtų būti supaprastintas, užtikrinus operatyvų rezultatų gavimą. Atsižvelgiant į tai, plautuvės efektyvumo vertinimo metodologijoje įvedamos sistemos elementų išdėstymo intervalo ribos. Šios ribos nustatomos atsižvelgiant į atliktą plautuvės projektą, kuriame pateikiami pagrindiniai kiekvieno elemento įrengimo principai. Analizuojant įdiegtos plautuvės projektą, buvo patikslinti galimi įrangos išdėstymo laive intervalai, kurie tiesiogiai sutampa su mašinų skyriaus ir išmetamojo trakto padėtimi laive. Todėl sukurtoje metodologijoje vietoj tikslių laivo plano brėžinių įvedamos minėtų patalpų koordinatės (intervalas nuo skyriaus pradžios iki pabaigos X, Y, Z kryptimis).

Plautuves rekomenduojama įdiegti šalia esamo išmetamųjų dujų trakto, o siurblius ir kitą smulkia vandens paėmimo bei valymo įrangą – siurblių skyriuje. Tačiau įrangos patalpa gali būti išdėstoma ne vienoje vertikaloje plokštumoje su plautuvės bloku. Analizuojamame projekte buvo numatyti du galimi įrangos patalpos išdėstymo variantai: tiesiai po plautuve, užimant autotransporto gabenimo vietą; patraukus įrangos patalpą arčiau dešiniojo borto ir lygiomis dalimis užimant krovinio gabenimo ir degalų talpykos plotą. Pirmuoju atveju įtaka laivo stovumui yra mažesnė, tačiau savininkas, atsižvelgęs į galimą negautą pelną, atsiskęs didesnės dalies kroviniams skirto ploto, nusprendė patalpą įrengti pagal antrąjį variantą. Remiantis tyrimo rezultatais buvo nustatyta, kad įrangos patalpa turi didesnę išdėstymo intervalą. Todėl optimizuojant bendrą sistemos įtaką laivo stovumui, nuspręsta, kad šis blokas turi didžiausią įtaką variaciniams skaičiavimų rezultatams. Taigi kompensuojant aukštai virš laivo vaterlinijos iškeltos plautuvės masę, įrangos patalpa turėtų būti išdėstoma arčiau laivo masės centro. Analogiškai ir plautuvės įranga išdėstoma arčiau vieno iš laivo bortų, o įrangos patalpa – priešingoje laivo pusėje.

Diegiant plautuvės sistemą, laive buvo atlikti tam tikri laivo patalpų išdėstymo pakeitimai, siekiant išlaisvinti vietą įrangai.

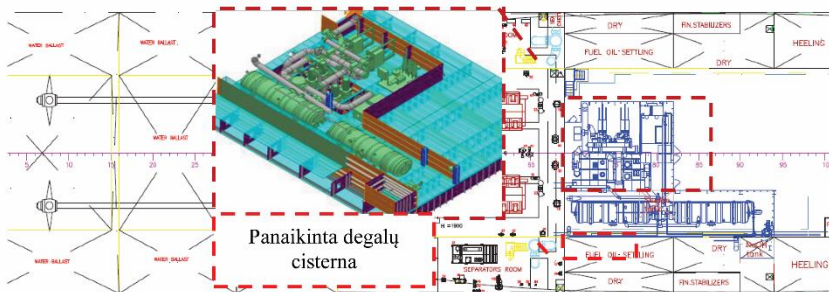
Plautuvės blokas išdėstytas 25 m aukštyje 20,7 m atstumu nuo laivagalio (30 španhautos), ventiliacijos šachtos vietoje, kuri perkelta 2,7 m atstumu arčiau laivapriekio – nuo 24 m į 26,7 m (35 španhautos). Esama ventiliacijos šachta su ventiliatoriumi nuleidžiama į žemesnį denį 1,6 m atstumu – nuo 19,6 m į 18,0 m. Ventiliacijos grotelės taip pat nuleidžiamos 5,4 m žemiau – nuo 20,7 m į 15,3 m. Plautuvei atremti laive buvo įrengti papildomi pamatai, sustiprinant laivo korpuso konstrukciją, ir paplatintas esamas išmetamųjų dujų trakto falškaminas. Esamas išmetamojo trakto vamzdynas buvo pailgintas, atsižvelgiant į paplatinto falškamino gabaritus. Išmetamųjų dujų valymo sistema sujungta su variklių išmetamuoju traktu.



**4.5 pav.** Esamų laivo elementų išdėstymo pakeitimai falškamino srityje  
**Fig. 4.5.** Re-location of the existing ship elements in exhausts casing area

Minėti pakeitimai nustatomi projektavimo stadijoje. Siūlomoje metodologijoje juos numatyti netikslinga. Tačiau atsižvelgiant į plautuvės gabaritus ir masę, metodologija leidžia numatyti papildomo ploto laivo falškamino poreikį ir masę, kuri bus išdėstyta paplatinto falškamino patalpoje.

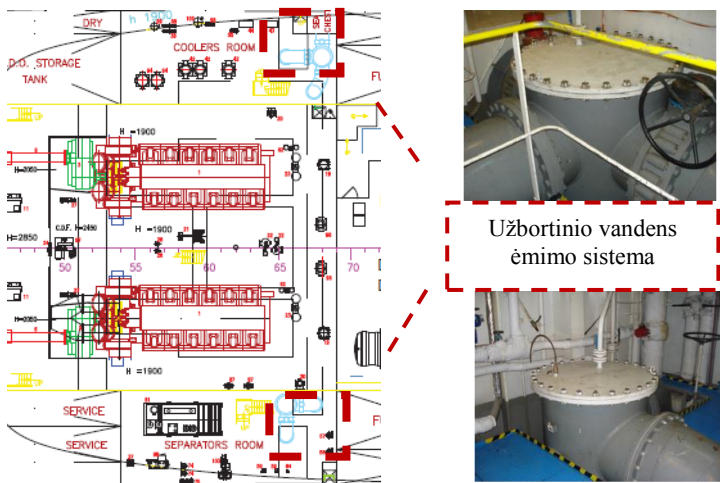
Įrangos patalpa išdėstyta 3 kroviniame (autotransporto) denyje 9,6 m aukštyje po plautuve 28 m atstumu išilgai laivo, arčiau laivapriekio (40 španhautos). Todėl siekiant įrengti šią patalpą buvo atsakyta 114,4 m<sup>2</sup> ploto. Įrangos patalpa išdėstoma arčiau dešiniojo borto. Siekiant kompensuoti susidariusį kreną, atitinkamai dešiniajame borte atsakyta 120 t degalų cisternos. Norint užtikrinti saugų įrangos eksploatavimą, plautuvės įrangos patalpoje įrengiamas papildomas ventiliacijos vamzdynas, kuris sujungiamas su esama laivo ventiliacijos sistema.



**4.6 pav.** Esamų laivo elementų išdėstymo pakeitimai 3 denio srityje  
**Fig. 4.6.** Re-location of the existing ship elements in 3 deck area

Analogiškai plautuvės bloko išdėstymui, būtini įrangos patalpos pakeitimai sukurtose metodologijoje nenumatomi. Tačiau atsižvelgiant į šio bloko elementų parametrus, metodologijoje pateikiamas patalpos plotas ir papildoma elementų masė, kuri išdėstoma minėtoje patalpoje.

Jūrinio vandens tiekimo siurbiai sujungiami su esama užbortinio vandens tiekimo sistema, esančia 1 denyje 53,6 m atstumu nuo laivagalio išilgai laivo (37 španhautos). Esami užbortinio vandens filtrai padidinti, užtikrinant atitinkamai didesnę filtrų laidumą. Šlamo talpykla išdėstyta dvigubame dugne mašinų skyriuje.



**4.7 pav.** Esamų laivo elementų išdėstymo pakeitimai 1 denio srityje  
**Fig. 4.7.** Re-location of the existing ship elements in 1 deck area

Sukurtoje metodologijoje siurbiai išdėstomi esamame siurblių skyriuje. Todėl šio bloko koordinatės nekinta, o skaičiavimuose vertinama tik papildoma elementų masė, išdėstyta siurblių skyriuje. Pažymėtina, kad siurbiai, kurių masė sąlyginai yra nedidelė, išdėstomi žemiau laivo vaterlinijos, todėl jų padėtis ir masė neturi didelės įtakos laivo stovumui.

Sistemų sujungimo vamzdynai išdėstomi tarp minėtų trijų blokų: plautuvės, įrangos patalpos ir siurblių. Todėl vamzdynų masė gali būti paskirstoma proporcingai tarp paminėtų blokų, o išdėstymo koordinatės atitinkamai sutampa su blokų koordinatėmis.

### 4.3. Ekologinių rodiklių matavimo tyrimų metodologija

Gauti matavimų duomenys buvo apdorojami matematinės statistikos metodais (vidutinis kvadratų metodas), naudojant *Microsoft Excel* programą.

**4.1 lentelė.** Matavimo prietaisų charakteristika  
**Table 4.1.** The characteristic of measurement device

Matavimo prietaisas	Matavimų diapozonas	Tikslumas
<b>TESTO 350</b>		
CO	0...500 ppm	±5 %
CO <sub>2</sub>	0...50 %	±0,3 %
NO	0...300 ppm	±5 %
NO <sub>2</sub>	0...500 ppm	±5 %
SO <sub>2</sub>	0...5 000 ppm	±5 %
O <sub>2</sub>	0...25 %	±0,2 %
<b>HGA</b>		
NO	0...300 ppm	±5 %
CO <sub>2</sub>	0...50 %	±0,3 %
HC	0...500 ppm	±5 %
<b>MAHA</b>		
Dujų skaidrumas K	0...10 m <sup>-1</sup>	±0,05 m <sup>-1</sup>

Plautuvės sistemos eksperimentiniai tyrimai atlikti bendradarbiaujant su Oro taršos iš laivų tyrimų laboratorijos tyrėjais.

Eksperto metu atlikti šie tyrimai:

- ✓ išmetamųjų dujų valymo efektyvumo vertinimas, matuojant kenksmingų dalelių emisiją prieš plautuvę ir už jos (neišvalytų ir išvalytų dujų sudėtis);

- ✓ išmetamųjų dujų valymo efektyvumo vertinimas bei rezultatų palyginamas plautuvės sistemą, eksploatuojant uždareme ir atviraime kontūruose;
- ✓ išmetamųjų dujų valymo efektyvumas, esant ekstremalioms (štormas) eksploatavimo sąlygoms;
- ✓ išmetamųjų dujų valymo efektyvumas, esant skirtingiems pagrindinių variklių darbo režimams (50, 60, 70 % apkrovos);
- ✓ medžiagų balansas, esant skirtingiems variklio darbo režimams, ir plautuvės sistema, eksploatuojant atviraime ir uždareme kontūruose;

Tyrimuose naudota tokia laboratorinė įranga:

- ✓ dūmų analizatoriai: TESTO 350 (SO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>), HGA (NO, CO<sub>2</sub>, HC); MAHA (dūmų laidumas);
- ✓ plautuvės sistemos valdymo pultas, fiksuojantis medžiagų balanso ir dujų valymo efektyvumo parametrus.

#### 4.3.1. Eksperimento atlikimo etapai

Eksperimentiniai tyrimai buvo atliekami etapais:

- ✓ Atskirai matuojant A ir B variklių išmetamųjų dujų koncentraciją prieš plautuvę HGA ir MAHA matavimo įranga, lygiagrečiai fiksuojami plautuvės valdymo pulto rodmenys 2 taške ir 3 taške matuojant išmetamųjų dujų koncentraciją už plautuvės TESTO 350 įranga.
- ✓ Analogiški matavimai atliekami esant 50, 60 ir 70 % variklių apkrovai.
- ✓ Atlikus matavimus esant įvairiems (visiems) variklio režimams 1 taške, HGA ir MAHA įranga perkeliama prie 3 taško už plautuvės. Štorminėmis oro sąlygomis atliekami matavimai 1 taške ir fiksuojami duomenys 2 taške.

Plautuvės sistemos efektyvumas buvo vertinamas dviem bandomaisiais režimais: uždareme (uosto teritorijoje) ir atviraime kontūre (atviroje jūroje). Išmetamųjų dujų emisijos matavimai buvo atliekami naudojant 4.8 pav. vaizduojamą įrangą:



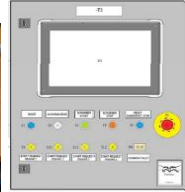
TESTO 350



HGA



MAHA



Valdymo pultas

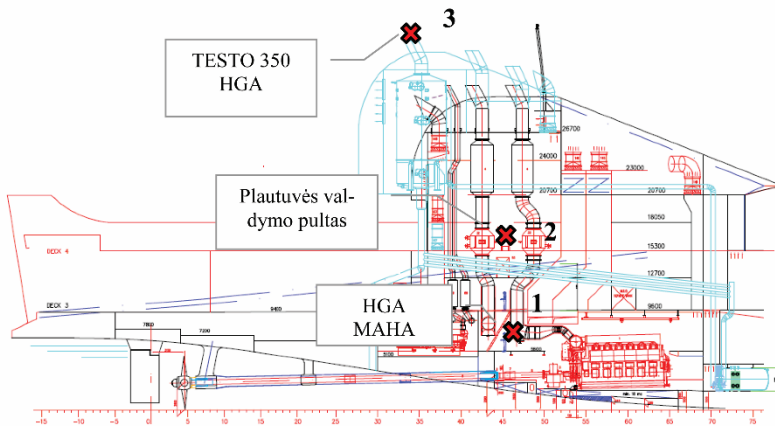
**4.8 pav.** Atliekamų matavimų įranga  
**Fig. 4.8.** Measurements devices

Pavaizduota įranga naudota matuojant išmetamųjų dujų emisiją skirtingose išmetamojo trakto vietose, kaip nurodyta 4.2 lentelėje:

**4.2 lentelė.** Atliekami matavimai  
**Table 4.2.** Measurements

Matavimo prietaisas	Išmetamasis traktas		Valdymo pultas
	už plautuvės	už variklių	
TESTO 350	✓	-	-
HGA	✓	✓	-
MAHA	✓	✓	-
Foto ir vizualinis fiksavimas	-	-	✓

Matavimo įranga laive išdėstyta taip, kaip parodyta 4.9 pav.:



**4.9 pav.** Matavimo įrangos išdėstymo schema: 1 – variklių išmetamasis traktas mašinų skyriuje; 2 – plautuvės valdymo pultas; 3 – plautuvės išmetamųjų dujų vamzdis

**Fig. 4.9.** The scheme of distribution of measuring devices onboard: 1 – engine exhausts in engine room; 2 – scrubber control panel; 3 – scrubber exhaust gas pipe

1 taške mašinų skyriuje variklių išmetamajame trakte štuceriu buvo pritvirtinti matavimo įrangos MAHA ir HGA zondai:

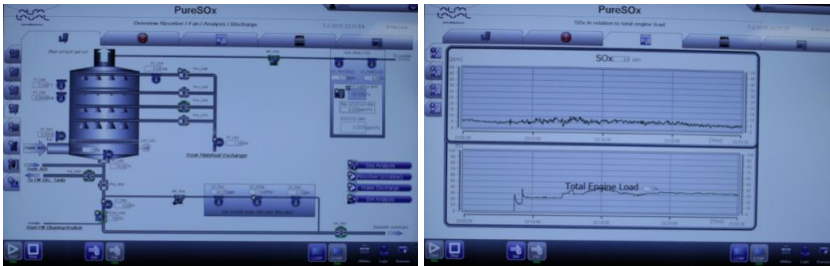


**4.10 pav.** MAHA ir HGA matavimo įrangos zondų tvirtinimas laive

**Fig. 4.10.** MAHA ir HGA measuring device distribution onboard

A ir B variklių matavimai buvo atliekami atskirai. Matavimo prietaisais buvo fiksuojami HC, CO<sub>2</sub>, NO (HGA) santykinis kiekis išmetamosiose dujose ir dujų skaidrumas (MAHA) iškart už variklio. TESTO 350 prietaiso panaudoti nepavyko dėl pernelyg didelio zondo skersmens. A ir B variklių matavimai buvo atliekami užtikrinus vienodus variklio darbo režimus: 50, 60 ir 70 % MCR.

Lygiagrečiai su matavimais 1 taške, 2 taške, esančiame 3 denyje, buvo nuolat fotografuojami ir fiksuojami plautuvės valdymo pulto rodmens.



**4.11 pav.** Plautuvės valdymo pultas

**Fig. 4.11.** Scrubber control panel

Valdymo pulte fiksuojami plautuvės darbo kontūras (uždarasis, atvirasis), degalų sąnaudos, išmetamųjų dujų slėgis, NaOH sąnaudos, vandens srautas, siurblių apkrovimas, išmetamųjų dujų ir vandens temperatūra, variklio apkrovimas (% MCR), SO<sub>x</sub> valymo efektyvumas (ppm), SO<sub>x</sub>/CO<sub>2</sub> santykis.

3 taške ant falškamino konstrukcijos, prie plautuvės išmetamojo vamzdžio, buvo pritvirtintas TESTO 350 matavimo įrangos zondas, kuriuo buvo matuojama CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> temperatūra. Užtikrinus analogiškus variklio darbo režimus, 3 taške buvo naudoti HGA ir MAHA prietaisai.



**4.12 pav.** TESTO 350 matavimo įrenginys plautuvės išmetamajame trakte

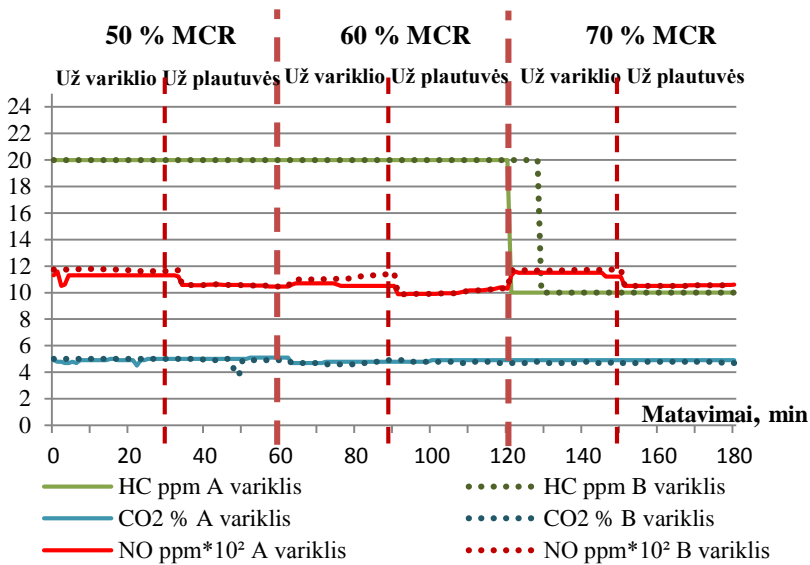
**Fig. 4.12.** TESTO 350 measuring device in the scrubber exhaust gas pipe

Esminių skirtumų tarp išmetamųjų dujų valymo efektyvumo minėtų plautuvės sistemos veikimo režimų atvejais nebuvo pastebėta.  $\text{SO}_2$  emisijos mažinimas iki reikalaujamo kiekio užtikrinamas abiejų režimų atvejais. Esminiai skirtumai – tai medžiagų balansas, kuris buvo fiksuojamas plautuvės sistemos valdymo pulte.

#### 4.4. Eksperimento rezultatų apdorojimas

Siekiant nustatyti plautuvės sistemos dujų valymo efektyvumą, MAHA, HGA ir TESTO 350 įranga buvo išmatuota pagrindinių laivo variklių išmetamųjų dujų emisija prieš plautuvę ir už jos. Gauti dujų emisijos pokyčio rezultatai buvo eksportuojami iš įrangos duomenų bazės ir apdorojami naudojant *Microsoft Excel* programinį paketą. Gauti rezultatai pateikiami grafikų pavidalu, lyginant emisijos pokytį prieš plautuvę ir už jos, esant skirtingoms variklio apkrovoms.

HGA įranga buvo matuojama dujų emisija prieš plautuvę ir už jos 1 ir 3 taškuose, nustatytas dujų valymo efektyvumas HC,  $\text{CO}_2$  ir NO atžvilgiu.

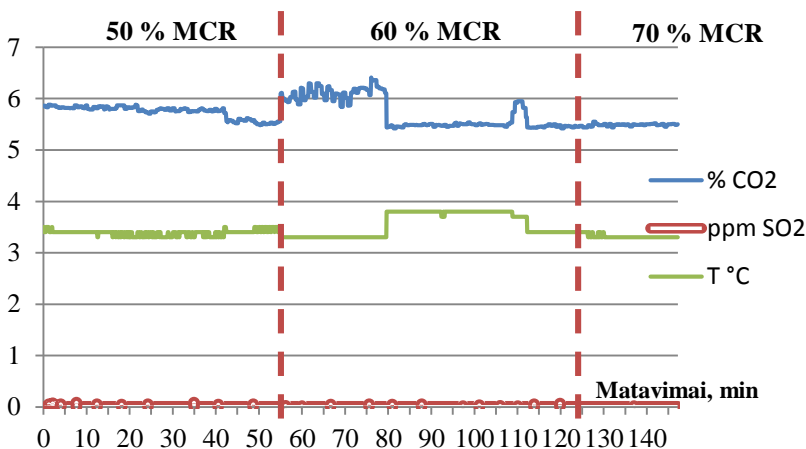


**4.13 pav.** HGA matavimo rezultatai  
**Fig. 4.13.** HGA measurment result

TESTO 350 įranga buvo naudota matuojant dujų emisiją už plautuvės. Dėl matavimo zondo matmenų (pernelyg didelis zondo skersmuo) nebuvo galimybės prijungti įrangą prie išmetamojo trakto, esančio už variklių. Todėl išmetamųjų dujų valymo efektyvumas buvo nustatomas apskaičiavus išmetamųjų dujų SO<sub>x</sub> koncentraciją, atsižvelgiant į naudojamo kuro sieringumą. Matavimo rezultatai sutapo su plautuvės sistemos valdymo pulto rodmenimis, kurie užfiksavo 0–1 ppm SO<sub>x</sub> koncentraciją esant skirtingoms variklio apkrovoms. Tai patvirtina matavimų adekvatumą ir plautuvės sistemos valymo efektyvumą.

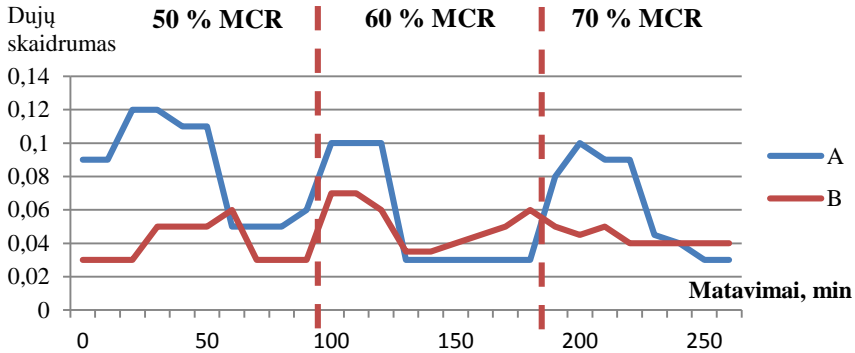
Matuojant išmetamąsias dujas 3 taške už plautuvės TESTO 350 matavimo įranga, buvo patvirtintas stabilus SO<sub>x</sub> emisijos mažėjimas – iki 99–100 %. Nustatytas parametras atitinka plautuvės gamylinį kalibravimą. Pereinamaisiais režimais nuo 50 iki 60 ir nuo 60 iki 70 % variklio apkrovos buvo nustatyti momentiniai CO<sub>2</sub> ir temperatūros šuoliai, tačiau SO<sub>x</sub> rodikliai buvo pastovūs ir neviršijo leistinų

nuokrypių. Todėl net ir esant staigiam apkrovos pokyčiui plautuvės sistema užtikrino reikalingą valymo kokybę:



**4.14 pav.** TESTO 350 matavimo rezultatai  
**Fig. 4.14.** TESTO 350 measurment result

Išmetamųjų dujų skaidrumas buvo matuojamas 1 ir 3 taškuose. Tačiau 3 taške buvo nustatytas dujų drėgnumas, kuris neleido išmatuoti kietųjų dalelių santykinio kiekio. Smulkiadispersiai naudoto vandens likučiai išmetamosiose dujose, pagal įrangos rodmenis, buvo vertinami kaip dalelės, kurios mažina dujų skaidrumą. Todėl apdorojant rezultatus 1 taške buvo nustatytas didesnis dujų skaidrumas nei 3 taške už plautuvės. Analizuojant dujų skaidrumą 1 taške, priklausomai nuo variklio apkrovos, buvo gauti tokie rezultatai:



**4.15 pav.** MAHA matavimo rezultatai, dujų skaidrumas pagal SAEJ1667  
**Fig. 4.15.** MAHA measurement result, smoke density according to SAEJ1667

Atliktas išmetamųjų dujų skaidrumo, arba šviesos laidumo, tyrimas įrodė, kad dėl pakitusio dujų drėgnumo įprastos matavimo įrangos zondas užsikemša. Norint išmatuoti padidėjusio drėgnumo išmetamąsias dujas už plautuvės, būtina naudoti papildomus filtras, kurie absorbuotų perteklinę drėgmę.

Matuojant išmetamųjų dujų emisiją, buvo patvirtintas plautuvės sistemos  $SO_x$  valymo efektyvumas, kuris užtikrina atitinkamą dujų kokybę esant skirtingoms variklių apkrovoms.

#### 4.5. Ketvirtojo skyriaus išvados

1. Išanalizuota įdiegtos plautuvės sistema, jos veikimo principai ir išdėstymas laive. Patikslinti plautuvės blokų išdėstymo intervalai.
2. Atliktas laivo pagrindinių variklių išmetamųjų dujų koncentracijos matavimų eksperimentinis tyrimas.
3. Palyginti dujų koncentracijos matavimo duomenų skirtumai prieš plautuvę ir už jos, lygiagrečiai fiksuojant plautuvės sistemos valdymo pulto rodmenis.

4. Patvirtintas plautuvės sistemos išmetamųjų dujų valymo efektyvumas: nustatytas  $\text{SO}_x$  99 %,  $\text{NO}_x$  iki 12 % emisijos sumažėjimas laivo išmetamosiose dujose.



---

## Bendrosios išvados

1. Sukurta laivų jėgainių išmetamųjų dujų SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo technologijų pritaikymo lyginamojo rentabilumo bei technologinių racionalaus įdiegimo skirtingų tipų laivuose vertinimo metodologija, kurią praktiniam panaudojimui realizuoja kompiuterinis programinis kompleksas:

1.1 Identifikuoti ir išdėstyti pagal svarbą SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo technologijų pritaikymo rentabilumui turintys įtakos faktoriai: laivo eksploatacijos intensyvumas, buvimas ECA, laivo tipas, gabaritai, amžius, jėgainių energetiniai parametrai bei tipas ir kt. Ištirtas plautuvės ir mažasierių degalų alternatyvaus panaudojimo racionalumas.

1.2 Atliktų variacinių matematinių modeliavimo pagrindu suformuoti plautuvės sistemos mazgų racionalaus išdėstymo laive principai, siekiant minimizuoti neigiamą sistemos išdėstymo įtaką laivo stovumui bei eksploatacinėms charakteristikoms.

1.3 Sudarytas ir ištirtas SO<sub>x</sub> emisijos mažinimo technologijų įdiegimo laivuose investicijų planas visam technologijų gyvavimo ciklui:

- ✓ įdiegimo etapas: plautuvė – įrangos pirkimo, projektavimo darbai, sistemos diegimo išlaidos; mažasieriai degalai – neženklūs kapitalinės išlaidos papildomai degalų talpyklai įdiegti;
- ✓ eksploatacijos etapas: plautuvė – reagentų ir papildomos energijos savikaina, priežiūros bei remonto kaina, dėl sumažėjusios keliamosios galios netektas pelnas; mažasieriai degalai – ženklus eksploatacijos išlaidų padidėjimas dėl brangesnių degalų panaudojimo.

2. Sukurtos plautuvės sistemos racionalaus išdėstymo laive metodologijos adekvatumas patvirtintas tikrinamojo modeliavimo pagrindu analizuojant 18 įvykdytų plautuvės diegimo projektų eksploatuojamuose laivuose (Alfa Loyal Aalborg – Victoria Seaways, Wärtsilä – Containership VII ir kt.):

2.1 Suformuota plautuvės sistemos agregatų ir mazgų parametrų informacinė elektroninė duomenų bazė, vadovaujantis pirmaujančių įrangos gamintojų rekomendacijomis (Alfa Laval Aalborg, Wärtsilä Hamworthy Krystallon, Clean Marine, Couple Systems, DuPont BELCO Clean Air Technologies, Green Tech Marine, MAN ir kt.).

2.2 Naudojantis programiniu kompleksu atlikti įvykdytų projektų patikrinamieji skaičiavimai. Gauti rezultatai patvirtina sukurtos metodologijos praktinių uždavinių sprendimo adekvatumą:

- ✓ ro-ro / ro-pax keltuose (iš viso laivyne 8 vnt.), kurie visą eksploatavimo laiką kursuoja ECA ir suvartoja didelį degalų kiekį, plautuvė atsiperka jau per 2 m. nuo sistemos įdiegimo;
- ✓ krovininiai keltai (iš viso laivyne 26 vnt.) tik dalį laiko praleidžia ECA, todėl plautuvės sistema eksploatuojama ne visu pajėgumu, o tai pailgina atsiperkamumo laiką iki 4–6 m.

4. Paruošti, suplanuoti ir įvykdyti eksperimentiniai plautuvės sistemos išmetamųjų dujų valymo tyrimai realiomis DFDS Seaways ro-pax keltų eksploatacijos sąlygomis:

4.1 Nustatytas 99 % SO<sub>x</sub> emisijos sumažėjimas, esant plačiam laivo jėginių darbo režimų diapazonui bei skirtingoms eksploatacijos sąlygoms, tarp jų ir štormo.

4.2 Patvirtintas plautuvės NO<sub>x</sub> emisijos mažinimo efektyvumas iki 10 %.

5. Sukurta metodologija ir jos pagrindu realizuotas kompiuterinės programos kompleksas, atsižvelgiant į aprobavimo adekvatumą bei kompleksinį pobūdį, rekomenduojami praktiniam panaudojimui Lietuvos jūrų transporto subjektams (Susisiekimo ministerijos padaliniais, Lietuvos saugios laivybos administracijai, laivybos kompanijoms ir kt.), siekiant racionaliai bei efektyviai pasiruošti vykdyti tarptautinius MARPOL 73/78 VI priedo reikalavimus.



---

## Literatūra ir šaltiniai

ABS. 2013. Exhaust Gas Scrubber Systems. 64 p.

Acciaro M. 2014. Alternative fuels for shipping: Prices and Availability. Kuhne Logistics University. 39 p.

AMAP. 2011. The Impact of Black Carbon on Arctic Climate, AMAP Technical Report No. 4 (2011). Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway. 70 p.

AEA Technology. 2010. Guernsey annual greenhouse gas bulletin. 12 p.

Asariotis, R.; Benamara, H. 2012. Maritime transport and the climate change challenge. 320 p.

Baltoji knyga. 2011. Bendros Europos transporto erdvės kūrimo planas. Konkurencingos efektyviu išteklių naudojimu grindžiamos transporto sistemos kūrimas. Europos Komisija. 47 p.

Becagli, S.; Sferlazzo, D. M.; Pace, G.; Sarra, A.; Bommarito, C.; Calzolari, G.; Ghedini, C.; Lucarelli, F.; Meloni, D.; Monteleone, F.; Severi, M.; Traversi, R.; Udisti, R. 2012. Evidence for ships emissions in the Central Mediterranean

- Sea from aerosol chemical analyses at the island of Lampedusa, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, (11) 29: 915–947 p.
- Berkhout, A. J. C.; Swart, D. P. J.; van der Hoff, G. R. 2012. Sulphur dioxide emissions of oceangoing vessels measured remotely with Lidar, Report. 63 p.
- Bosch, P.; Coenen, P.; Fridell, E. 2009, Cost Benefit Analysis to Support the Impact Assessment accompanying the revision of Directive 1999/32/EC on the Sulphur Content of certain Liquid Fuels. Report. 169 p.
- Buhaug, O.; Corbett, J. J.; Endresen, O.; Eyring, V.; Faber, J.; Hanayama, S.; Lee, D. S.; Lindstad, H.; Mjelde, A.; Pålsson, C.; Wanquing, W.; Winebrake, J.J.; Yoshida, K. 2009. Second IMO GHG Study 2009, International Maritime Organization, London, United Kingdom. 240 p.
- Brynolf, S., Magnusson, M., Fridell, E., Andersson, K. 2014. Compliance possibilities for the future ECA regulations through the use of abatement technologies or change of fuels. *Transport and Environment*, Volume 28, 6–18 p.
- Bunkerworld. 2015. Marine fuel price. Retrieved from <http://www.bunkerworld.com/>.
- Campling, P.; van den Bossche; K., Duerinck, J. 2010. Market-based instruments for reducing air pollution Lot 2: Assessment of Policy Options to reduce Air Pollution from Shipping, Final Report for the European Commission's DG Environment. 168 p.
- Campling, P.; Janssen, L.; Vanherle, K. 2012. Specific evaluation of emissions from shipping including assessment for the establishment of possible new emission control areas in European Seas, VITO, Mol, Belgium. 80 p.
- Chiffi, C.; Fiorello, D.; Schrooten, L. 2007. Exploring non road Transport Emissions in Europe Development of a Reference System on Emissions Factors for Rail, Maritime and Air Transport. Final Report, Seville, Spain. 88 p.
- Cofala, J.; Amann, M.; Heyes, C. 2007. Analysis of Policy Measures to Reduce Ship Emissions in the Context of the Revision of the National Emissions Ceilings Directive Final Report. 74 p.
- Cotteleer, A.; van der Tak, C. 2011a. Emissions 2009: Netherlands Continental Shelf, Port Areas and OSPAR Region II, Final report, Wageningen, the Netherlands. 68 p.
- Cotteleer, A.; van der Tak, C. 2011b. Marin's Emission Inventory for North Sea Shipping 2009: Validation against ENTEC's Inventory and Extension with Port Emissions. Final report, Wageningen, the Netherlands. 38 p.

Cotteleer, A.; Hulskotte J. H. J. 2012. Emissions 2010: Netherlands Continental Shelf, Port Areas and OSPAR Region II. Final report, Wageningen, the Netherlands. 86 p.

Corbett, J. J.; Wlnebrake, J. J. 2012. Emissions Tradeoffs among Alternative Marine Fuels: Fuel Cycle Analysis of Residual Oil, Marine Gas Oil, and Marine Diesel Oil. *Journal of the Air & Waste Management Association*, (58:4): 538–542 p.

Cullinane, K.; Bergqvist, R. 2014. Emission Control Areas and Their Impact on Maritime Transport, *Transport Research Part D*, 28D, 1-5 p.

Danish EPA. 2012. Economic impact assessment of a nitrogen emission control area at the North Sea, Ministry of Environment, Denmark. 108 p.

De Ceuster G.; van Herbruggen B.; Logghe S., Ivanova O.; Carlier K. 2007. REMOVE 2. Service contract for the further development and application of the REMOVE transport model – Lot 3, Final report part 4: Maritime model and policy runs, European Commission, DG ENV, Brussels, Belgium. 276 p.

De Meyer, P.; Maes, F.; Volckaert, A. 2008. Emissions from international shipping in the Belgian part of the North Sea and the Belgian seaports, *Atmospheric Environment* (42/1), 196–206 p.

Deniz, C.; Durmuşoğlu, Y. 2008. Estimating shipping emissions in the region of the Sea of Marmara, Turkey, *Science of the Total Environment* (390), 255–261 p.

DNV. 2009. Low sulphure fuel, properties and associated challenges. Rorway. 12 p.

DNV. 2012. Shipping 2020, Det Norske Veritas, Høvik, Norway. 68 p.

Dore, A. J.; Vieno, M.; Tang, Y. S.; Dragosits, U.; Dosio, A.; Weston, K. J.; Sutton, M. A.; McCreddin, A. 2007. Modelling the atmospheric transport and deposition of sulphur and nitrogen over the United Kingdom and assessment of the influence of SO<sub>2</sub> emissions from international shipping, *Atmospheric Environment*, (41): 2355–2367 p.

DieselNet. Emission standards: IMO Marine engine regulations. Retrieved from <https://www.dieselnet.com/standards/inter/imo.php>.

DFDS SEAWAYS. 2014. Scrubber conversion project (company documentation).

EC. 2005. Directive 2005/33/EC of the European Parliament and of the Council of 6 July 2005, Off. J. Eur. Union L 191/59. 22 p.

EC. 2012. Green growth opportunities in the EU shipbuilding sector. Final repor. 152 p.

- EGCSA. 2014. Technical information, advice and opinion on issues and challenges related to emissions reduction and marine exhaust gas cleaning systems. Retrieved from <http://www.egcsa.com/>.
- Europos Komisija. 2014. Jūrų stebėjimas. Kartu su valstybėmis narėmis rūpin-tis saugesnėmis jūromis ir vandenynais. Pranešimas spaudai. 3 p.
- EMSA. 2010. The 0.1% sulphur in fuel requirement as from 1 January 2015 in SECAs – An assessment of available impact studies and alternative means of compliance. Technical report. 30 p.
- EMSA. 2013. Scrubbing technology. Discussion paper. 12 p.
- ENTEC. 2010. Study to review assessments undertaken of the revised MARPOL annex VI regulations. Final repor. 87 p.
- EPA. 2008. Report on the environment. 366 p.
- Faber, J.; Markowska, A.; Nelissen, D. 2009. Technical support for European action to reducing Greenhouse Gas Emissions from international maritime transport, CE-Delft, Delft, the Netherlands. 352 p.
- Faber, J.; Nelissen, D.; Han, G.; Wang, H.; Tsimplis, M. 2012. Regulated slow steaming in maritime transport – an assessment of options, costs and benefits, CE-Delft, Delft, the Netherlands, February 2012, 117 p.
- Fridell, E.; Steen, E.; Peterson, K. 2008. Primary particles in ship emissions, *Atmospheric Environment*, 42(6): 1160–1168 p.
- German Shipowners Association. 2010. Reducing the sulphur content of shipping fuels further to 0.1 % in the North Sea and Baltic Sea in 2015: Con-sequens for shipping in this area, performed by Institute of Shipping Econo-mics and Logistics. Final report. 85 p.
- Glosten. 2011. Ship Operations cooperative program, exhaust gas cleaning systems selection guide. US. 154 p.
- GL and MAN. 2011. Costs and benefits of LNG as ship fuel for container vessels. Key results from jodint study. 12 p.
- Green ship of the future. 2012. Open private-public partnership. Retrieved from <http://www.greenship.org/omos/>.
- Hammingh, P.; Holland, M. R.; Geilenkirchen, G. P.; Jonson, J. E.; Maas, R. J. M. 2012, Assessment of the environmental impacts and health benefits of a nitrogen emission control area in the North Sea. PBL Netherlands Envi-ronmental Assessment Agency, The Hague/Bilthoven. 108 p.

- Hellebust, S.; Allanic, A.; O'Connor, I. P.; Jourdan, C.; Healy, D.; Sodeau, J. R. 2010. Sources of ambient concentrations and chemical composition of PM<sub>2.5-0.1</sub> in Cork Harbour, Ireland, *Atmospheric Research*, 95: 136–149 p.
- HELCOM. 2010. Ecosystem health of the Baltic Sea 2003–2007. Initial holistic assessment. 68 p.
- Hubner, D. 2008. Guide to COST-BENEFIT ANALYSIS of investment projects. Structural Funds, Cohesion Fund and Instrument for Pre-Accession, 259 p.
- IMO. 2004. International Convention for Safety of Life at Sea (SOLAS). 409 p.
- IMO. 2005. International Convention on Load Lines, Consolidated edition. 243 p.
- IMO. 2008. International Code on Intact Stability. 384 p.
- IMO. 2009. Prevention of air pollution from ships. 289 p.
- IMO. 2012. Sharing maritime knowledge. International Shipping Facts and Figures – Information Resources on Trade, Safety, Security, Environment. 47 p.
- IACS. 2013. Requirements concerning strength of ships. International Association of Classification Societies USA. 304 p.
- ISO 8178-1:2006. Reciprocating internal combustion engines. 124 p.
- Isakson, J.; Persson, T. A.; Lindgren, E. S. 2001. Identification and assessment of ship emissions and their effects in the harbour of Goteborg, Sweden, *Atmospheric Environment*, 35 (3): 3659–3666 p.
- ITMMA. 2010. Analysis of the consequences of low sulphur fuel requirements. Final report. 83 p.
- Jalkanen, J.-P.; Brink, A.; Kalli, J. 2009a. A modelling system for the exhaust emissions of marine traffic and its application in the Baltic Sea area, *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, (9/4): 15339–15373 p.
- Jalkanen, J.; Kalli, J.; Stipa, T. 2009b. The price of sulphur reductions in the Baltic Sea and North Sea shipping. Baltic Sea Region Programme 2007–2013, BSRInoShip.
- Jalkanen, J.-P.; Johansson, L.; Kukkonen, J. 2012. Extension of an assessment model of ship traffic exhaust emissions for particulate matter and carbon monoxide. *Atmospheric Chemistry and Physics*., 12(5): 2641–2659 p.
- Kjølholt, J.; Aakre, S.; Jurgensen, C.; Lauridsen, J. 2012. Assessment of possible impacts of scrubber water discharges on the marine environment. Environmental Project No. 1431, 2012. Danish Environmental Protection Agency. 92 p.

- Kalli, J.; Karvonen, T.; Makkonen, T. 2009. Sulphur content in ships bunker fuel in 2015. A study on the impacts of the new IMO regulations on transportation costs. Report, 38 p.
- Kalli, J. 2013. Cost efficiency estimations of abatement techniques. Baltic Sea Region Programme 2007–2013, BSRInoShip. 107 p.
- Kruse, C. 2012. Challenges for shipping industry, Could new fuels and scrubbers be the answer. Stena. 22 p.
- Kennan, K. 2014. Flue Gas Desulfurization: Removal of SO<sub>x</sub> from Exhaust Flue Gases in Ships and Industries. *International Journal of Applied Engineering Research*, Volume 9, Number 18, 3875-3892 p.
- Lack, A. D.; Thuesen, J.; Elliot, R. 2012. Investigation of appropriate control measures (abatement technologies) to reduce Black Carbon emissions from international shipping – Study Report [online]. 118 p.
- Lloyd's Register. 2012. Understanding exhaust gas treatment systems. UK, 55 p.
- Lietuvos saugios laivybos administracija. 2015. Retrieved from <http://www.msa.lt/lt/titulinis.html>.
- MAN. 2013. Emission project guide, 86 p.
- MAN. 2014. Emission project guide for MARPOL Annex VI regulation, 2<sup>nd</sup> edition. German, 88 p.
- Marine traffic. 2015. Retrieved from <https://www.marinetraffic.com/>.
- Marmer, E.; Langmann, B. 2005. Impact of ship emissions on the Mediterranean summertime pollution and climate: A regional model study, *Atmospheric Environment*, (39): 4659–4669 p.
- Marmer, E.; Dentener, F.; Aardenne, J. V. 2009. What can we learn about ship emission inventories from measurements of air pollutants over the Mediterranean Sea? *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, (9/2): 7155–7211 p.
- MARPOL 73/78. 2008. Regulation for the prevention of air pollution from ship. Revised Annex VI to International Convention MARPOL 73/78, IMO. London. 32 p.
- Marine Engineering Practice Series. 2000. Exhaust Emissions from Combustion Machinery. Wright, 3 (20). 246 p.
- MEPC. 2009. Guidelines for exhaust gas cleaning system. Resolution MEPC, 184 (59): 24 p.

Miola, A.; Ciuffo, B.; Giovine, E.; Marra, M. 2010. Regulating air emissions from ships: the state of the art on methodologies, technologies and policy options, Luxembourg: Publications Office of the European Union. 68 p.

Miola, A.; Ciuffo, B. 2011. Estimating air emissions from ships: meta-analysis of modelling approaches and available data sources, *Atmospheric Environment*, (45): 2242–2251 p.

MINTC. 2009. Environmental Guidelines for the Transport Sector until 2010. 40 p.

Mollenhouer, K.; Tschoke, H. 2010. Handbook of diesel engines. Germany. 636 p.

NABU. 2015. Scrubbers – An economic and ecological assessment. Final report. 45 p.

Nikopoulou, Z. 2008. Reduction of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> in an emission market – a snapshot of prospects and benefits for ships in the northern European SECA area. Technical report. Chlammers University of Technology. 37 p.

Pandolfi, M.; Gonzalez-Castanedo, Y.; Alastuey, A.; Rosa, J.; Mantilla, E.; Campa, A. S.; Querol, X.; Pey, J.; Amato, F.; Moreno, T. 2011. Source apportionment of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> at multiple sites in the strait of Gibraltar by PMF: impact of shipping emissions. *Environmental Science and Pollution Research*, (18): 260–269 p.

Paxian, A.; Eyring, V.; Beer, W. 2010. Present Day and Future Global Inventories Including Polar Routes, *Environ. Sci. Technol.*, (44/4): 1333–1339 p.

Querol, X.; Alastuey, A.; Lopez-Soler, A.; Mantilla, E.; Plana, F. 1996. Mineralogy of atmospheric particulates around a large coal-fired power station, *Atmospheric Environment*, (30): 3557–3572 p.

Rawson, K. J.; Tupper E. C. 2005. Basic Ship Theory (5th Edition). Volumes 1, 2. Longman Scientific & Technical. 400 p.

Rozmarinowska, M. 2012. Implications of new regulation regarding sulphur content in ship's fuel on maritime transport sector within Baltic Sea Region. TransBaltic. 34 p.

Schembari, C.; Cavalli, F.; Cuccia, E.; Hjorth, J.; Calzolari, G.; Pérez, N.; Pey, J.; Prati, P.; Raes, F. 2012. Impact of a European directive on ship emissions on air quality in Mediterranean harbours, *Atmospheric Environment*, (61): 661–669 p.

SAEJ1667. 1999. In – use smoke test procedure. United States environmental protection agency. 2 p.

Schrooten, L.; De Vlieger, I.; Int Panis, L. 2009. Emissions of maritime transport: a European reference system, *The Science of the total environment*, (408/2): 318–323 p.

- Skaugen. 2010. Innovative Maritime Solutions. Business review 2010. 26 p.
- Stavarakaki, A.; De Jonge, E.; Hugi. 2005. Service Contract on Ship Emissions: Assignment, Abatement and Market-based Instruments, Task 1 – Preliminary Assignment of Ship Emissions to European Countries', Report for European Commission by Entec UK Limited. 88 p.
- Schinas, O.; Stefanokos, C. 2014. Selecting technologies towards compliance with MARPOL Annex VI: The perspective of operators. *Transport and environment*. Volume 28. 28–40 p.
- Stopford, M. 2009. Maritime Economics. Routledge; 3 edition (February 6, 2009), 840 p.
- Smailys, V.; Strazdauskiene, R.; Giedgaudas, A. 2007. Different Methods of Evaluating Air Pollution from Sea Ferry in Klaipėda Port. *Environmental Research, Engineering and Management*, 2007. No. 4(42): 13–24 p.
- Smailys, V.; Strazdauskiene, R.; Bereisiene, K. 2009. Evaluation of a Possibility to Identify Port Pollutants Trace in Klaipėda City Air Pollution Monitoring Stations. *Environmental Research, Engineering and Management*, 2009, No. 4(50): 66–75 p.
- Smailys, V.; Strazdauskienė, R.; Bereišienė, K. 2012. Laivų aplinkos apsauga. Klaipėdos universiteto leidykla. 264 p.
- Swedish Maritime Administration. 2009. Consequences of the IMO's new marine fuel sulphur regulations, performed by The Swedish Maritime Administration. 85 p.
- SKEMA. 2010. Impact study of the future requirements of annex VI of the MARPOL convention on short sea shipping. Periodic study. 60 p.
- Tai, H.; Dung-Ying Lin, D. 2013. Comparing the unit emissions of daily frequency and slow steaming strategies on trunk route deployment in international container shipping. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 21, 26–31 p.
- Tzannatos, E. 2010a. 'Ship emissions and their externalities for Greece', *Atmospheric Environment*, (44): 2194–2202 p.
- Tzannatos, E. 2010b. Ship emissions and their externalities for the port of Piraeus Greece, *Atmospheric Environment*, (44): 400–407 p.
- Velders, G. J. M.; Snijder, A.; Hoogerbrugge, R. 2011. Recent decreases in observed atmospheric concentrations of SO<sub>2</sub> in the Netherlands in line with emission reductions, *Atmospheric Environment*, (45): 5647–5651 p.
- Vestreng, V.; Mareckova, K.; Kakareka, S.; Malchykhina, A.; Kukharchyk, T. 2007. Inventory Review 2007, Emission Data reported to LRTAP Convention

and NEC Directive, MSC-W Technical Report 1/07, The Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway. 108 p.

Viana, M.; Kuhlbusch, T. A. J.; Querol, X.; Alastuey, A.; Harrison, R. M.; Hopke, P. K.; Winiwarter, W.; Vallius, M.; Szidat, S.; Prévôt, A. S. H.; Hueglin, C.; Bloemen, H.; Wählin, P.; Vecchi, R.; Miranda, A. I.; Kasper-Giebl, A.; Maenhaut, W.; Hitenberger, R. 2008. Source apportionment of particulate matter in Europe: a review of methods and results', *Journal of Aerosol Science*, (39): 827–849 p.

Wagner, F.; Amann, M.; Bertok, I.; Cofala, J.; Heyes, C.; Klimont, Z.; Rafaj, P.; Schöpp, W. 2010. Baseline Emission Projections and Further Cost-effective Reductions of Air Pollution Impacts in Europe – A 2010 Perspective, International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). 31 p.

Walter, J.; Wagner, J. 2012. Choosing exhaust scrubber systems. Maritimes Cluster Northern Germany, 37 p.

Wärtsilä. 2010. Exhaust gas scrubber installed on-board MT “SUULA”, Public Test Report. Finland. 30 p.

Wärtsilä. 2011. Scrubber installation guide. Finland. 62 p.

Wärtsilä. 2012. Marine pollution. Finland. 196 p.

Wärtsilä. 2013. Exhaustgas cleaning. SO<sub>x</sub> scrubber technology. Public report. Finland. 8 p.

Wärtsilä. 2014. Exhaustgas cleaning. How to choose the correct scrubber? Public report. Finland. 8 p.

Wic, C. 2010. Reducing medium-speed engine emissions, *Journal of Marine Engineering & Technology*, (9:2): 37–44 p.

Whall, C.; Cooper, D.; Archer, K. 2002. Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community. Final report for European Commission by ENTEC UK Limited, London. 2241-2251 p.

Whall, C.; Scarbrough, T.; Stavrakaki, A. 2010. Defra UK Ship Emissions Inventory. Final report November 2010. Entec UK Limited, London. 19 p.

Winther, M. 2008. New national emission inventory for navigation in Denmark, *Atmospheric Environment*, (42): 4632–4655 p.

Yang, Z.; Zhang, D.; Caglayan, O.; Jenkinson, I.; Bonsall, S.; Wang, J.; Huang, M.; Yan, X. 2012. Selection of techniques for reducing shipping NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> emissions. *Transportation Research, Part D: Transport and Environment*, Volume 17, I, 478–486 p.



---

# Autorės publikacijos disertacijos tema

## **Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose**

Panasiuk, I.; Lebedevas, S. 2014. The assessment of possibilities of Lithuanian fleet to comply with new environmental requirements. *Transport* 29(1): 50–58. ISSN 1648-4142.

Panasiuk, I., Lebedevas, S., Česnauskis, M. 2014. Selection of exhaust scrubber: Concept for optimal solution. *Environmental Research, Engineering and Management* 70 (4): 40-45. ISSN: 1392-1649.

Panasiuk, I.; Turkina, L. 2015. The evaluation of investments efficiency in SO<sub>x</sub> reduction technology. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 40(2015): 87-96. doi:10.1016/j.trd.2015.08.004.

## **Straipsniai kituose recenzuojamuose leidiniuose**

Panasiuk, I. 2012a. Laivo išmetamųjų dujų toksiškumo mažinimo problematika. *Mokslas – Lietuvos ateitis 2012*: 366–369. ISSN 2029-2341.

- Panasiuk, I. 2012b. Ekologiniai iššūkiai laivyboje. *Technologijos mokslo darbai Vakarų Lietuvoje 2012*: 71–74. ISSN 1822-4652.
- Panasiuk, I. 2012c. Prediction of creation of mathematical model to calculate the possibilities of energy production in the reduce system of exhaust gas of ship diesel engines. *Transport Means – 2012*: 124–127. ISSN 1822-296.
- Panasiuk, I. 2013a. Laivo išmetamųjų dujų toksiškumo mažinimo metodų lyginamoji analizė. *Mokslas – Lietuvos ateitis 2013*: 312–315. ISSN 2029-7157.
- Panasiuk I. 2013b. Methodology of the assessment of using low sulphur fuel or scrubbers to comply with SO<sub>x</sub> requirements. *Transport Means – 2013*: 124-127. ISSN 1822-296.
- Panasiuk, I., Lebedevas, S. 2013. The comparison of technologies to reduce the toxicity of ship exhaust gas. *TransBaltica – 2013*: 153–158. ISSN 2029-2376.
- Disertacijos medžiagos pristatymas Technologinių naujovių bei gamybos / paslaugų plėtros tendencijos AB Vakarų laivų gamyklos organizuotame seminare pagal Laivų įrenginių ir aparatūros montavimo bei remonto technologijų kompetencijų tobulinimo programą (2014-08-22), Klaipėda.
- Panasiuk, I. 2015. The assessment of technologycal feasibility and economic efficiency of SO<sub>x</sub> scrubber installation. *International PhD Seminar on Maritime Science*.
- Панасюк, И. П.; Тукрина Л. А. 2015. Оценка эффективности инвестиций в технологию снижения SO<sub>x</sub> эмиссии. Сборник научных трудов. УДК 378.147

---

# Summary

## Research Problem

Annex VI of MARPOL 73/78 which will entered into force in a short time sets limits on sulphur oxides ( $\text{SO}_x$ ) from ship exhausts: to 0.1% by 2015 in ECA and globally to 0.5% by 2020. Annex VI contains provisions allowing for special  $\text{SO}_x$  ECA to be established with more stringent controls on sulphur emissions. The existing ECA include the Baltic Sea, the North Sea, the North American, including most of US and Canadian coast and the US Caribbean, including Puerto Rico and the US Virgin Islands (IMO 2008). ECA regulations are now enforced across many countries and there are further designated zones under discussion. In the medium and long term it can be expected that most of global trading centers will be pass through ECA (Asariotis and Benamara, 2012). Therefore, an increasing number of scientists are exploring mentioned issues in their researches. Most of researches contain

analysis of environmental impact of ship exhaust and ways to reduce harmful emission (Caiazzo *et al.* 2012, Fridell 2008, Kannan 2014, Lack *et al.* 2012). According to Annex VI of MARPOL 73/78 the regulations will be applicable not only to new building but also to existing ships. According to most researchers (Brynolf *et al.* 2014 Fridell *et al.* 2008 Kjølholt *et al.* 2012 Kruse, C. 2012 Schinas and Stefanokos 2014, Tai and Dung-Ying Lin 2013) SO<sub>x</sub> restrictions will bring considerable financial and technological challenges especially for modernization of existing ships. That is why there is a need to analyze SO<sub>x</sub> emission reduction technology installation economic and technological impact on existing fleet. Some aspects of problematic of technology installation are analyzed. However the method of the evaluation of investments efficiency described insufficient.

To ensure compliance with mentioned requirements shipowners may choose one of the most appropriate technologies: fit an exhaust gas cleaning system or use any other technological method to reduce SO<sub>x</sub> emissions (IMO 2008). Presently, the most realistic technology to reduce SO<sub>x</sub> of ship exhausts is:

- ✓ Low sulphur fuel: according to marine fuel standards (ISO 8217) intermediate fuel oil IFO contains <3.5% SO<sub>x</sub>; marine diesel oil MDO <1.0% SO<sub>x</sub>; low sulphur MGO <0.1%. In our case, the restriction in ECA is equal 0.1%. Thus, only low sulphur MGO will be analyzed (ISO 8217:2012);
- ✓ Liquefied natural gas (LNG);
- ✓ Scrubber.

Each of mentioned technology has advantages and disadvantages. SO<sub>x</sub> reduction technologies are a common and proven technology on land. That is why the cost of SO<sub>x</sub> reduction at sea generally being lower because the easiest and least expensive measures have already been taken on land in most EU countries (Kageson 1999). On the average the costs of typical measures of ships SO<sub>x</sub> emission reduction is from 0.52 to 4.52 \$/kg (Wang and Corbett 2007). Speaking about capital costs of scrubber installation for the particular ship, the costs of technology introduction is from 1 to 5 million \$. It is noteworthy that the costs of each technology can vary greatly depending on the specific of ship operating (being in ECA, amount of fuel consumption). Despite the fact that mentioned technologies are well known, there is not enough practical

knowledge of its economic efficiency. The cost-effectiveness of different technologies (LNG, LSMGO, scrubbers) was studied by many scientists and equipment manufacturers (Schinas and Stefanokos 2014, Tai and Dung-Ying Lin 2013, Walter and Wagner 2012, Wang and Corbett 2007, Wärtsilä 2010 and 2013, Yang *et al.* 2012). There are several ways to achieve the compliance with SO<sub>x</sub> requirements and many articles contain a comparison of advantages and disadvantages of technologies of SO<sub>x</sub> reduction (Brynolf *et al.* 2014, Glosten 2011, Kruse 2012). Also, authors investigate economic issues SO<sub>x</sub> scrubber installation but there are still not enough recommendations of assessment of technology installation efficiency (Schinas *et al.* 2014, Tai 2013, Walter 2012, Yang *et al.* 2012). However, there is still a lack of information about the investments aspects of life cycle of technology introduction (cost elements, specific of return of investments, billing period and etc.). Issues of technology efficiency are investigated only by calculating payback period without specifying the method of calculation. For this reason, the research analyzes the method of assessment of scrubber installation efficiency in comparison with using of LSMGO.

No matter which technology will be selected by the shipowner the additional expenses (capital and operating costs, loss of profits due to the reduce of cargo capacity) cannot be excluded. However, it should be noted that each of mentioned technology has certain specific of the investments. Thus, in accordance with the data presented in Table 1, the use of LSMGO requires comparatively low capital costs. However, the operating costs are considerably higher because of LSMGO price. Thereby, despite the fact that capital investments are insignificant, LSMGO technology is expensive in the medium and long term. In turn, LNG includes both the initial cost of the conversion, and the additional costs to cover the differential costs of IFO and LNG. The scrubber installation involves significant capital costs, but under certain conditions it may be more cost-effective solution in the medium and long term (Asariotis *et al.* 2012, DNV 2012).

It should be noted, that the received effect of the technology introduction should be comparable to evaluate the efficiency of investments. In other words, the result (reduction of SO<sub>x</sub> emissions) from the introduction of one of mentioned technologies should match the result obtained by introducing of another. The possibility of applying the men-

tioned technologies on existing ships is analyzed. Therefore, we proceed from the assumption that compared technologies should be applicable for existing ship retrofit. However, the technology of LNG due to significant modifications of ship (engines replacing, specially designed systems, larger fuel tanks, gas sensors and etc.) in most cases does not apply to the ship which is already in operating. Moreover, this technology ensures compliance with the requirements of MARPOL 73/78 not only in case of SO<sub>x</sub>, but also NO<sub>x</sub>, PM, CO<sub>2</sub>. In turn, technologies of LSMGO or scrubber largely focused on SO<sub>x</sub> reduction with insignificant effect on NO<sub>x</sub> emission, and therefore cannot be comparable with LNG. The possibility to comply with the requirements of MARPOL 73/78 on SO<sub>x</sub> limits will be taking into account to ensure the comparability of technology. Therefore, the technology of LNG will not be analyzed. The evaluation of the investment efficiency will be done through the comparison of two technologies: LSMGO and scrubber.

There are two types of scrubbers: wet and dry. Wet scrubbers are more acceptable for ships because of the lower price and smaller dimensions of units. That is why only wet scrubbers will be analyzed. Currently, the wet SO<sub>x</sub> scrubbers reached an industrial scale and there are a number of manufacturers offering their equipment including such companies as Alfa Laval Aalborg, Clean Marine, Couple Systems, DuPont BELCO Clean Air Technologies, Green Tech Marine, MAN Diesel and Turbo, Marine Exhaust Solutions, Wärtsilä Hamworthy Krystalon. There are three main types of wet scrubbers which are offered by manufacturers: the open loop which uses only sea water; the close loop which uses fresh water mixed with caustic soda; the hybrid which has both benefits of open and closed loop (ABS 2013, DNV 2012). The open loop scrubber system is rather simple and cheaper than close loop. However, it cannot be operating in area with restricted water outlet criteria like Baltic Sea. In turn of hybrid system, there are no significant weight and dimensional characteristics differences between close loop and hybrid system. Mentioned types of wet scrubber are comparable with some difference in price (open loop scrubbers are 20% cheaper than close loop) which is taken into account when calculating capital cost of scrubber installation. As an example, the estimation of close loop scrubber installation efficiency is presented.

## **Relevancy of the Thesis**

The problematics of installation of sulphur oxides (SO<sub>x</sub>) scrubber becomes much relevant for today due to the new Annex VI of MARPOL 73/78 requirements, which sets 0.1% SO<sub>x</sub> limits by 2015 in Emission Control Area (ECA) and globally to 0.5% in 2020. The research in this field becomes more significant for shipowners. SO<sub>x</sub> scrubber is most promising alternative because of lower operating costs and suitability to existing ships. Despite the fact that exhausts gas scrubbing is a common and proven technology on land, the conditions on ships differ significantly and still there are not enough practical knowledge of installation of mentioned equipment. In addition, speaking about existing ships there are some limitation factors of SO<sub>x</sub> scrubber installation onboard which will be discussed. Taking into account the size and mass of the SO<sub>x</sub> scrubber, it can be assumed that the recalculation of ship stability will be required for most ships. Therefore, the most important task for equipment designers is selection of scrubber system location with the minimum impact on ship stability and identification of necessary changes (deadweight, additional space and etc.) in accordance with ship safety requirements. For this reason, the research was carried-out in order to create the algorithm of ship stability assessment and selection of optimal scrubber location onboard.

## **Research Object**

The object of research covers technologies of air pollution from ship propulsion reduction.

## **Aim of the Thesis**

The thesis is aimed at creation of assessment methodology of SO<sub>x</sub> emission reduction technology selection according to particular ship parameters. On the basis of the results of numerical modeling, the thesis focuses on working out a methodology for assessment of technological feasibility and economic efficiency of selected technology to comply with MARPOL 73/78 requirements.

## Goals of the Thesis

For accomplishing the aim of the thesis, the following goals have to be considered:

1. To analyze SO<sub>x</sub> emissions reduction technology which are suitable for ships;
2. To develop the methodology framework for SO<sub>x</sub> emission reduction technology selection (economic and technological aspects);
3. To clarify the location of scrubber's system location onboard and SO<sub>x</sub> emission reduction efficiency by experimental studies in operating conditions;
4. To assess the modernization impact of Lithuanian fleet competitiveness by using developed methodological framework.

## Research Methodology

The thesis is based on analytical, experimental and numerical modeling methods. Experimental studies of scrubber system were carried out on DFDS ferry Viktoria Seaways on operating conditions. The efficiency of emission reduction was carried out by using exhausts measuring equipment: Testo 350; HGA; MAHA. The software was developed to assess Lithuanian fleet possibilities to comply with MARPOL 73/78 Annex VI requirements.

## Scientific Novelty and Significance

The process of thesis development has covered the following new data on the science of transport engineering:

1. Influencing factors of selection of SO<sub>x</sub> emission reduction technology have been comprehensively investigated
2. Methodological foundations of efficiency and cost-effectiveness evaluation of SO<sub>x</sub> emission reduction techno-

- logies have been developed, which implemented in software;
3. The experiment of scrubber system location and exhausts cleaning efficiency on operating mode have been carried out;
  4. The created software has been revised on the basis of experimental studies.

### **Practical Value of the Obtained Results**

The methodological framework of SO<sub>x</sub> emission reduction technologies efficiency and cost-effectiveness assessment have been developed and implemented in software. The influence of modernization on competitiveness of Lithuanian fleet has been analyzed by using created software.

Created software allows assessing the price of modernization of particular ship and entire fleet. Analysis of Lithuanian fleet modernization showed that only 34% (ferries, bulk carriers) of total fleet are suitable for scrubber installation.

### **Defended Statements**

1. Ship propulsion SO<sub>x</sub> emission reduction technologies assessment methodology of technological solutions on board and comparative cost-effectiveness evaluation of different type of ships have been designed. Mentioned methodology is suitable to identify optimal solution for Lithuania fleet modernization;
2. Scrubber system location onboard selection methodology have been created on the basis of 18 projects of installed scrubbers on existing ships;
3. The direct location of each element of scrubber system and exhausts cleaning efficiency have been clarified by the examination of scrubber on operating mode.

## Approval of Findings

11 articles focusing on the subject of the discussed dissertation are published: two article - in the Thomson ISI register (Panasiuk and Lebedevas 2014, Panasiuk and Turkina 2015); one article – in the journal quoted by Inspec data base (Panasiuk *et. al* 2014); three articles - in conference material and scientific papers in Thomson ISI data base (Panasiuk 2012a, Panasiuk 2013a, Panasiuk and Lebedevas 2013); one article – in the scientific customize works (Панасюк и Туркина 2015); three articles – in material reviewed during international conferences (Panasiuk 2012b, Panasiuk 2012c, Panasiuk 2013b); one article - during an international PhD seminar (Panasiuk 2015) .

8 presentations on the subject have been given in conferences and seminars at national and international level:

- International Conference „*Mokslas – Lietuvos ateitis*“2012 and 2013. Vilnius, Lithuania;
- International Conference „*Technologijos mokslo darbai Vakarų Lietuvoje*“ 2012. Klaipėda, Lithuania;
- International Conference „*Transport Means*“ 2012 and 2013. Klaipėda, Lithuania;
- International Conference „*Transbaltika*“ 2013 Vilnius, Lithuania;
- International Seminar „*Technologinių naujovių bei gamybos/paslaugų plėtros tendencijos*“ 2014, Klaipėda, Lithuania.
- International Seminar „International PhD Seminar in Maritime Science” 2015. Kalmar, Sweden.

## Structure of the Thesis

The dissertation consist introduction, 4 chapters: the overview of problematics of air pollution from ship propulsion; the methodological framework of scrubber installation assessment; the mathematical modeling of scrubber efficiency assessment; the experimental research of the scrubber system in operating conditions. Conclusions, references, the author’s publications on the dissertation topic and annexes are presented at the end of the thesis.

The total scope 196 pages, excluding annexes. Text is added 39 numbered equations, 48 figures and 12 tables. 119 references have been used for writing the thesis.

## 1. The Overview of Problematics of Air Pollution from Ship Propulsion

The implementation issues of SO<sub>x</sub> scrubber are relevant for today as scrubber technology is the most realistic alternative to comply with new regulations of MARPOL 73/78 which sets certain limits on SO<sub>x</sub> emissions from ship exhaust to 0.1% by 2015 in ECA and globally to 0.5% in 2020 (MARPOL 73/78 2008). ECA regulations are now enforced across many countries and there are further designated zones under discussion. Therefore, an increasing number of scientists are exploring mentioned issues in their researches. However, most of researches contain analysis of environmental impact of ship exhaust and ways to reduce harmful emission (Caiazzo *et al.* 2012, Fridell 2008, Kannan 2014, Lack *et al.* 2012). In the medium and long term, it can be expected that most of global trading centers will be pass through ECA zones. It is noteworthy that the regulations will be applicable not only to new building but also to existing ships. It is obvious that SO<sub>x</sub> restrictions will bring considerable financial and technological challenges especially for modernization of existing ships. Certainly, new SO<sub>x</sub> requirements will affect overall world fleet as well as new building and existing. However, the modernization of ship is more complicated than designing a new one. The researches of scrubber installation problematics are gaining importance as the compliance with emission limits becomes more challenging. There are several ways to achieve the compliance with SO<sub>x</sub> requirements and many articles contain a comparison of advantages and disadvantages of technologies of SO<sub>x</sub> reduction (Brynolf *et al.* 2014; Glosten 2011; Kruse 2012). Also, authors investigate methods of SO<sub>x</sub> scrubber selection but there are still not enough recommendations suitable for pre-design phase of technology selection (Schinas *et al.* 2014; Tai 2013; Walter 2012; Yang *et al.* 2012). Issues of changed ship stability are investigated only for a particular ship at the equipment design phase. In turn, the estimating methodology of SO<sub>x</sub> scrubber effect on ship described insufficiently. For this reason, the research analyzes the assessment of scrubber installation impact on the ship stability.

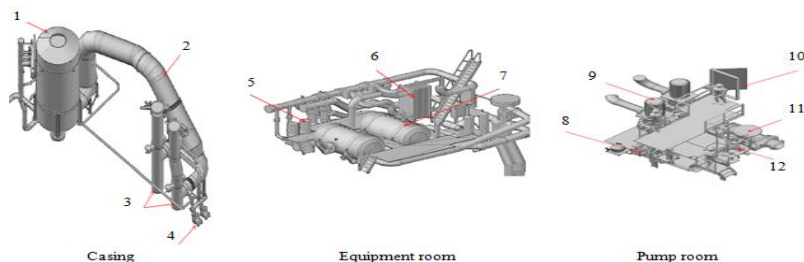
In order to understand the problematics of SO<sub>x</sub> scrubber installation, it is necessary to analyze the specificity of installation of the entire system (Lloyd 2012; Wärtsilä 2010; Wärtsilä 2013; MEPC 2009; Mari-

ne Engineering Practice Series 2000). Generally, SO<sub>x</sub> scrubber is a device installed in ship exhaust system after the engine or boiler that treats the exhaust gas with a variety of substances including sea water, chemically treated fresh water or dry substances, so as to remove most of the SO<sub>x</sub> emission. The installation of scrubber is complicated because of the significant weight of equipment and location high above waterline.

There are two types of scrubbers: wet and dry. Wet scrubbers are more acceptable for ships because of the lower price and smaller dimensions of units. There are three main types of wet scrubbers which are offered by manufacturers: the open loop which uses only sea water; the close loop which uses fresh water mixed with caustic soda; the hybrid which has both benefits of open and closed loop (ABS 2013, DNV 2012). The open loop scrubber system is rather simple and cheaper than close loop. However, it cannot be operating in area with restricted water outlet criteria like Baltic Sea. In turn of hybrid system, there are no significant weight and dimensional characteristics differences between close loop and hybrid system. Mentioned types of wet scrubber are comparable then assessing the technological feasibility of scrubber installation. For this reason, the research will consider only on hybrid type of scrubber.

The working principle of mentioned hybrid scrubbers of different equipment manufacturers is almost the same and usually consists of three main blocks:

- ✓ casing with scrubber unit inside and exhaust manifold which are connected with existing exhaust pipes;
- ✓ equipment room with circulation tanks and pumps for water mixing with NaOH;
- ✓ pump room with pumping, NaOH and sludge storage equipment.



**Fig. 1.** The scrubber system elements: 1 – scrubber; 2 – exhaust manifold; 3 – existing exhaust pipe; 4 – sealing air fan; 5 – circulation pump; 6 – cooler; 7 – circulation tank; 8 – NaOH equipment; 9 – sea water pump; 10 – waterlight door; 11 – sea strainer; 12 – sludge equipment (DFDS 2014)

Regardless of the design features of the ship, a new casing should be added to the aft part of the existing casing and scrubber should be located inside the new casing as close as possible to the existing exhaust gas pipe. A new equipment room should be located at deck directly under scrubber unit. Circulation pump, tanks and cooler should be located in the equipment room. The new equipment room should be in open connection to the scrubber in the casing structure by stairs way. A new pump room should be located below the equipment room in short connection with existing sea chest. Sea water cooling/feed pump, cleaning unit, NaOH pumps sludge transfer and storage tanks are located in the new pump room. It is obvious that the whole system should be located with open access with existing engine room, new pump room and equipment room. So, regardless of place planning onboard, the location of scrubber system will directly depend on the location of engines and the exhaust system.

The most significant elements of overall system on weight and dimensional characteristics are scrubber unit with casing and circulation tanks. The scrubber unit should be located as close as possible to the existing exhaust pipes to ensure efficient reduction of  $\text{SO}_x$  emission of

exhaust gas and minimize the length of manifold pipes. The circulation tanks should be located as close as possible to the scrubber to ensure an efficient flow of mixed NaOH water into the scrubber and minimize the energy consumption for circulation pump operating. It is also necessary to note that these elements should be placed as close as possible to each other, which means that in most cases the gravity center of scrubber unit and circulation tanks will be located above or close to the waterline. As the scrubber and circulation tanks are quite heavy and volumetric elements in comparison with the entire system, its location on board should be considered at the pre-design phase. To ensure the compliance with ship safety requirements the center of gravity of the scrubber system should be located as close as possible to the ship center of gravity. This will ensure the minimum impact on the ship stability. However, taking into account the specifics of ship space planning and location of engine room, usually it is impossible to ensure the location of scrubber system close to the ship gravity center. Therefore, it is necessary to calculate the optimum possible location of the scrubber system with the minimum impact on the characteristics of ship after modernization. Taking into account significant capital costs of scrubber equipment, the mentioned changes of ship characteristics can increase costs and make the choice of scrubber technology unprofitable.

## **2. The Methodological Framework of Scrubber Installation Assessment**

The analysis of researches allows to state that no matter which technology will be selected by the shipowner the additional expenses and technological solutions cannot be excluded. Issues of changed ship stability are investigated only for a particular ship at the equipment design phase. In turn, the estimating methodology of SO<sub>x</sub> scrubber effect on ship described insufficiently. Also there are missed some important costs elements of investments calculations as cargo reduction, time waste during installation and etc. For this reason, the research analyzes the assessment of technological feasibility and economic efficiency of scrubber installation. Mentioned assessment will be done in accordance with following sequence (see Fig. 1):

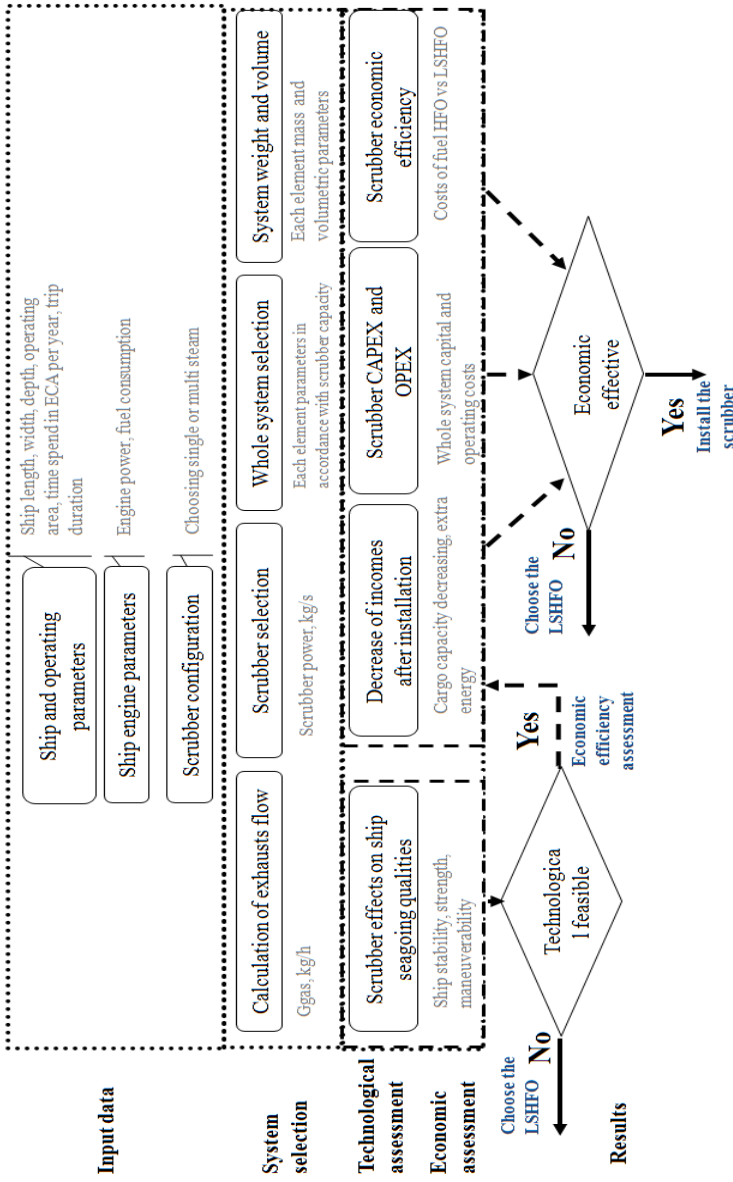


Fig. 1. The methodology of assessment of technological feasibility and economic efficiency of scrubber installation

The installation of scrubber is complicated because of the significant mass of equipment and location high above waterline (Lloyd 2012; Wärtsilä 2010; Wärtsilä 2013; MEPC 2009; Marine Engineering Practice Series 2000). There are two types of scrubbers: wet and dry. Wet scrubbers are more acceptable for ships because of the lower price and smaller dimensions of units. That is only wet scrubbers will be analyzed. There are three main types of wet scrubbers which are offered by manufacturers: the open loop which uses only sea water; the close loop which uses fresh water mixed with caustic soda; the hybrid which has both benefits of open and closed loop (ABS 2013; DNV 2012). Despite the rather simple and cheaper, the open loop scrubber cannot be operating in area with restricted water outlet criteria like Baltic Sea. In turn, there are no significant differences in mass and dimensional characteristics between close loop and hybrid system. Mentioned types of wet scrubber are comparable then assessing the technological feasibility of scrubber installation. For this reason, the research will be considered only on close loop type of scrubber. The working principle of mentioned close loop scrubbers of different equipment manufacturers is almost the same. It means that scrubbers are approximately the same in size and mass, in pumping capacities, caustic soda solution and etc. That is why the differences between the manufacturers are not taken into account. Regardless of the manufacturers, wet scrubber usually consists three main block of equipment (see an example of Aalborg close loop scrubber on ferry of shipping company DFDS. Fig. 1).

Regardless of the design features of the ship a new casing should be added to the aft part of the existing casing and scrubber should be located inside the new casing as close as possible to the existing exhaust gas pipe. A new equipment room should be located at deck directly under scrubber unit. Circulation pump, tanks and cooler should be located in the equipment room. The new equipment room should be in open connection to the scrubber in the casing structure by stairs way. A new pump room should be located below the equipment room in short connection with existing sea chest. Sea water cooling/feed pump, cleaning unit, NaOH pumps sludge transfer and storage tanks are located in the new pump room. It is obvious that the whole system should be located so as to provide access from existing engine room to the new pump room, from there access to equipment room and directly to

scrubber unit. So regardless of place planning onboard the location of scrubber system will directly depend on the location of engines and the exhaust system. The most significant elements of overall system for weight and dimensional characteristics are scrubber unit with casing and circulation tanks. The scrubber unit should be located as close as possible to the existing exhaust pipes to ensure efficient reduction of  $\text{SO}_x$  emission of exhaust gas and minimize the length of manifold pipes. The circulation tanks should be located as close as possible to the scrubber to ensure an efficient flow of mixed NaOH water into the scrubber and minimize the energy consumption for circulation pump operating. It is also necessary note that these elements should be placed as close as possible to each other, which means that in most cases the gravity center of scrubber unit and circulation tanks will be located above or close to the waterline. Therefore it is necessary to calculate the optimum possible location of the scrubber system with the least impact on the characteristics of ship after modernization.

## 2.1. Technological Assessment

The exhaust gas flow per combustion unit power is the main parameters when choosing the required capacity of scrubber for particular ship. Depending on combustion units characteristics the maximum exhaust gas flow can be calculated as follows:

$$\dot{m}_{gas} = \dot{m}_{fuel} + \dot{m}_{fuel} \cdot L_0 \cdot \alpha \cdot \beta, \text{ kg/s} \quad (1)$$

where:  $\dot{m}_{gas}$  – exhaust gas flow, kg/s;  $\dot{m}_{fuel} = P_{emax} \cdot b_{emax}$  – nominal fuel consumption, kg/s;  $L_0$  – stoichiometric air-fuel constant, accepted 14.5 kg air/kg fuel;  $\alpha$  – real coefficient of air excess;  $\beta$  – air mass flow ratio, can be accepted approximate value 1.45 for 2-stroke and 1.1 for 4-stroke engine (Mollenhauer *et al.* 2010).

The size and mass of scrubber can be determined as dependence between combustion units power and scrubber capacity. The scrubber unit weight is primarily affected by its capacity or in other words on exhaust gas mass flow.

Selection of optimal location of each element of scrubber system can be considered as compliance with ship safety requirement or ensu-

ring the minimum possible deviations of mentioned parameters listed below:

**Table 1.** Main acceptable tolerances (IACS 2013)

<b>Limiting parameters</b>	<b>Value</b>
<b>Lightship weight <math>m_{lightship}</math></b>	2%
<b>Center of gravity <math>\delta X_{CG}</math></b>	1% or max 50 cm
<b><math>\delta Y_{CG}</math></b>	0.5% or max 5 cm
<b><math>\delta Z_{CG}</math></b>	1% or max 5 cm
<b>Draught <math>T_{MD}</math></b>	1% or max 5 cm
<b>Metacentric height <math>\overline{GM}_L</math></b>	1% or max 50 cm
<b><math>GM</math></b>	1% or max 5 cm
<b>Trimming angle <math>\theta</math></b>	1%
<b>Heeling angle <math>\varphi</math></b>	Not allowed

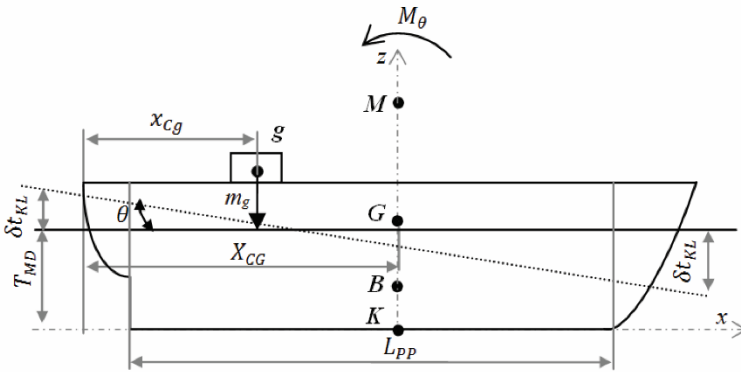
Thereby, an optimal location of each element of scrubber system will be calculated by the method of selection of location with the minimum deviation of mentioned ship parameters (see Table 1). The following calculations will be used in the assessment of compliance with requirements in Table 1. In accordance with acceptable tolerance 1<sup>st</sup> limiting factor of scrubber installation is its overall mass. Consequently, there is a need to recalculate changed ship's mass:

$$m'_G = m_G + m_g, t \quad (2)$$

where:  $m'_G$  – ship mass with scrubber, t;  $m_G = m_{lightship} + m_{DWT}$  – total ship mass, t;  $m_g$  – scrubber mass, t.

The displacement in all loading conditions should not exceed 2%. It means that the weight of scrubber system should not exceed 2% of ship light weight and similarly for the other limiting factors.

Next limitation is the changed center of gravity which is affected by additional mass of scrubber system  $m_s$ . In other words, the additional  $m_s$  shifts the center of ships gravity towards scrubber location:



**Fig. 2.** Trim of ship with scrubber

G is initial ship's centre of gravity, g is gravity centers of scrubber equipment, B is buoyancy gravity centre, M is metacentre, K is keel line. Initial G can be represented as force acting through buoyancy centre of gravity  $X_{CB}$  and  $X_{CB} = X_{CG}$ . In turn, the gravity center of scrubber g is usually remote to the aft ship closer to the engine room and changed gravity centre of ship will be moved to the side of scrubber location  $x_{cg}$ ,  $y_{cg}$ ,  $z_{cg}$ . The distance from initial to changed ship gravity centre  $\delta X_{CB}$ ,  $\delta Y_{CB}$ ,  $\delta Z_{CB}$  can be calculated as follows:

$$\delta X_{CG} = \frac{m_g(x_{cg}-X_{CG})}{m_G+m_g}, m \tag{3}$$

$$\delta Y_{CG} = \frac{m_g(y_{cg}-Y_{CG})}{m_G+m_g}, m \tag{4}$$

$$\delta Z_{CG} = \frac{m_g(z_{cg}-Z_{CG})}{m_G+m_g}, m \tag{5}$$

Changed gravity centers of ship will affect longitudinal  $\overline{GM}_L$  and transverse  $\overline{GM}$  metacentric height which can be calculated as follows:

$$\overline{GM}_L = R + Z_{CB} - Z_{CG}, m \tag{6}$$

$$\overline{GM} = r + Z_{CB} - Z_{CG}, m \tag{7}$$

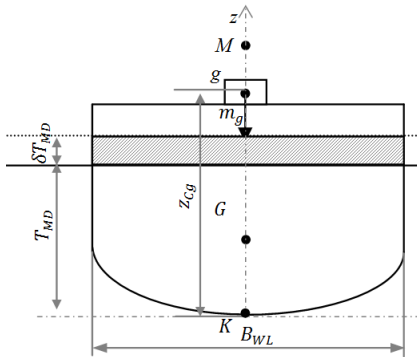
where:  $R = \frac{0.08 \cdot L_{PP}^2}{T_{MD}}$  and  $r = \frac{0.08 \cdot B_{WL}^2}{T_{MD}}$  – longitudinal and transverse metacentric radius, m;  $Z_{CB} = \frac{T}{1 + \frac{C_B}{C_{WP}}}$  – buoyancy gravity centre, m;  $C_B$  and  $C_{WP}$  – block and water plane area coefficient (Biran and Pulido 2014).

Respectively, differences between initial and changed metacentric height  $\delta \overline{GM}_L$  and  $\delta \overline{GM}$  can be calculated as follows:

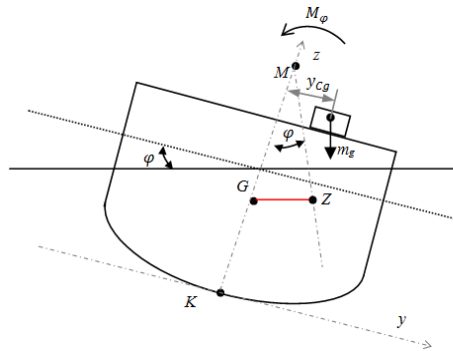
$$\delta \overline{GM}_L = \frac{m_g}{m_G + m_g} \left( T_{MD} + \frac{\delta T_{MD}}{2} - \overline{GM}_L - z_{Cg} \right), m \quad (8)$$

$$\delta \overline{GM} = \frac{m_g}{m_G + m_g} \left( T_{MD} + \frac{\delta T_{MD}}{2} - \overline{GM} - z_{Cg} \right), m \quad (9)$$

Next limitation is changed draught of ship (see Fig. 3 and Fig. 4):



**Fig. 3.** Draught of ship with scrubber



**Fig. 4.** The heel of ship with scrubber

The draught is characterized by changed mean draught, trim and heel angles. It is directly affected by additional mass onboard and difference of changed draught  $\delta T_{MD}$  can be calculated as follows:

$$\delta T_{MD} = \frac{m_g}{L_{PP} \cdot B_{WL} \cdot \rho \cdot C_{WP}}, m \quad (10)$$

where:  $L_{PP}$  – ship length between perpendicular, m;  $B_{WL}$  – maximum molded breadth at design water line, m;  $\rho$  – water density, 1.0 for river and 1.025 for sea;  $C_{WP}$  – water plane area coefficient.

If draught at the aft and fore ship on ZOX axis not match then appears the trim. In turn of trim, it appears only if the center of changed gravity with scrubber equipment  $x_{cg}$  will be not direct in the vertical line of ship's gravity centre  $X_{CG}$  (see Fig. 3). It should be noted, that the trim to fore ship is not allowed. Unlike, the trim to aft is allowed, but usually undesirable. In turn, difference of changed angle of trim  $\theta$  can be calculated as follows:

$$\delta\theta = 57.3 \cdot \arctg \frac{m_g(x_{cg} - X_{CG})}{(m_G + m_g)\overline{GM}_L}, \quad (11)$$

If scrubber system is located closer to aft ship and  $x_{cg} < X_{CG}$  then trim is to aft ship and  $\delta t_{KL} < 0$  otherwise the trim is to fore ship and  $\delta t_{KL} > 0$ . The changed trim can be calculated as:

$$\delta t_{KL} = \frac{M_\theta}{M_{TM}}, m \quad (12)$$

where:  $M_\theta = m_g(x_{CG} - X_{CG})$  – the moment to trim with scrubber onboard, t/m;  $M_{TM} = \frac{m_g \cdot \overline{GM}_L}{L_{PP}}$  – moment to change trim by one meter, t/m/m.

If scrubber system is located not direct at the center of the ship then appears a heel (see Fig. 5). It should be noted that a heel at starboard or portside is not allowed. It means that  $y_s$  should match with  $y_{G_0}$  or it is necessary to ensure the movement of the available weight onboard (replacement of scrubber system element in place of bunker tank and etc.). The difference of changed angle of heel  $\varphi$  can be calculated as follows:

$$\delta\varphi = 57,3 \cdot \frac{m_g \cdot y_{cg}}{m_G \cdot \overline{GM}}, \quad (13)$$

where:  $\varphi$  – angle of heel;  $y_{CG}$  – distance of transverse centre of gravity of scrubber system on ZOY.

The key indicator of ship stability is righting arm  $\overline{GZ}$  which directly depends on metacentric height (see Fig. 9).  $\overline{GZ}$  is a perpendicular distance between the centre of gravity  $G$  and the buoyancy force vectors. As is known the ship righting arm  $\overline{GZ}$  with small angle inclination and difference of changed  $\delta\overline{GZ}$  can be calculated as follows (Rawson *et al.* 2005):

$$\overline{GZ} = \overline{GM} * \sin\varphi, m \quad (14)$$

$$\delta\overline{GZ} = \delta\overline{GM} * \sin\delta\varphi, m \quad (15)$$

After the calculations we get a range of impact of the whole system on the ship characteristics depending on the location of each element. In turn, the shipowner will be able to choose the location of each element in the range obtained by using the proposed algorithm. Thereby, the criteria of optimal location for each block of scrubber system are follows:

- $X_{CG}$  with  $\delta\theta \rightarrow \min$   
 $\delta X_{CG}$  affected the trim (draft at aft and fore ship not match) and changing of gravity center should be minimal, but if it is impossible the trim can be compensated by extra ballast on the opposite side of ship; deadweight reduction or extra ballast in opposite side of ship;
- $Y_{CG}$  with  $\delta\varphi \rightarrow \min$   
 $\delta Y_{CG}$  of changed gravity center should be  $\approx 0$ , but if it is impossible the heel can be compensated by moving each block of scrubber system to opposite direction (for example if scrubber with casing is on starboard side then equipment room can be moved to portside);
- $Z_{CG}$  with  $\delta\overline{GM} \rightarrow \min$   
 $\delta Z_{CG}$  of changed gravity center should be minimal, but if it is impossible the changing of metacentric height can be compensated by extra ballast below the water line deadweight reduction or extra ballast in opposite side of ship;

- $Y_{CG}$  and  $Z_{CG}$  with  $\delta\overline{GZ} \rightarrow \min$   
 $Y_{CG}$  and  $Z_{CG}$  changing should be compensate by reduce or extra ballast to ensure minimal  $\delta\overline{GZ}$ ;
- Scrubber system mass and extra ballast should be compensated by reducing of ship deadweight.

The proposed algorithm allows estimating effect on ship stability and compensating deviations due to the coordinates of location of each block of system. The place where scrubber system will comply with safety requirements (see Table 1) or will have the minimal impact on the ship characteristics will be considered as optimal.

## 2.2. Economic Assessment

Investments in technology, like any other investments activities should be directed to ensure the implementation of the most effective forms of capital investments. Investments efficiency in technology will be evaluated during the billing period  $t$ , covering the time interval from the technology introduction to the completion of use. In our case, the beginning of the billing period is determined by the date of introduction of technology (scrubber or LSMGO). The completion of use the technology is established in accordance with the possible operational period of ship. Billing period is divided into stages ( $t_0, t_1, t_2 \dots t_n$ ) and main economic indicators are defined. In accordance with investments specific of each technology, the stages are defined as follows: introduction of technology; operating; return on investment; completion.

The first stage is period of technology introduction  $t_0$ . In the first stage the main are capital costs. In the case of LSMGO, the capital costs are insignificant and not taken into account in calculations. In case of scrubber, CAPEX consist costs of equipment, design, installation and documentation:

$$CAPEX_{scrub} = C_{equipment} + C_{design} + C_{installation} + C_{documentation}, \$ \quad (16)$$

where:  $C_{equipment}$  – cost of scrubber equipment, \$;  $C_{design}$  – costs of scrubber design, \$;  $C_{installation}$  – cost of scrubber installation including costs of crew and the lost profits since the vessel will be out of operation during installation (2–4 weeks), \$;  $C_{documentation}$  – documentation costs, \$.

In case of LSMGO OPEX, significant costs of fuel will be present during the operating stage and will increased the operating costs of ship:

$$OPEX_{fuel} = G_{fuel}(C_{LSMGO} - C_{IFO}) * T_{ECA} + (C_{switching} * (1 - T_{ECA})), \$/year. \quad (17)$$

where:  $G_{fuel}$  – annual fuel consumption, t/year;  $C_{LSHFO}$  – the price of LSMGO, \$/t;  $C_{HFO}$  – the price of IFO, \$/t;  $C_{switching}$  – cost of fuel switching from LSMGO to IFO depending on time in ECA  $T_{ECA}$ , \$/year.

In the case of scrubber, OPEX will consist costs of maintenance, reagents, water cleaning, additional energy and losses due to the loss of ship cargo capacity:

$$OPEX_{scrub} = C_{scrub\ maint.} + C_{scrub\ NaOH} + C_{scrub\ FW} + C_{scrub\ En} + (m_{scrub} * c_{cargo} * nm), \$/year. \quad (18)$$

where:  $C_{scrub\ maint.}$  – costs of scrubber maintenance), \$/year;  $C_{scrub\ NaOH}$  – cost of NaOH, \$/year;  $C_{scrub\ FW}$  – cost of FW, \$/year;  $C_{scrub\ En}$  – cost of energy, \$/year;  $m_{scrub}$  – scrubber system weight, kg;  $c_{cargo}$  – cost of cargo shipment, \$/kg\*nm;  $nm$  – truck nautical mile per year, nm/year.

The third stage is the period when  $CAPEX_{scrub} + OPEX_{scrub}$  become equal to  $OPEX_{fuel}$  and futher due to the differences between LSMGO and IFO price the operating of scrubber will generate the return on investments EBITDA (Earnings Before Interest, Taxes, Depreciation and Amortization):

$$EBITDA_{scrub} = G_{fuel}(C_{LSMGO} - C_{IFO}) * T_{ECA} - (C_{switching} * (1 - T_{ECA})) - CAPEX_{scrub} * i, \$/year. \quad (19)$$

Payback period  $PBP$  is directly depended on the differences of LSMGO and scrubber CAPEX and OPEX:

$$PBP = \frac{CAPEX_{scrub} + OPEX_{scrub}}{OPEX_{fuel}}, \text{ year.} \quad (20)$$

The fourth stage is the period of completion which are determined by the maximum possible period of ship operating. This period are limiting the possible income of investments. Thus, the maximum payback period should not exceed ship operating period:

$$PBP \leq T_{ship \text{ exp.}}, \text{ year.} \quad (21)$$

where:  $T_{ship \text{ exp.}}$  – maximum possible ship operating period, year.

Further, the value of cash flow related to the time  $t$  will be denoted by  $f(t)$  (Ross *et al.* 2013, Australian Government 2006).

In our case, the income, outflow and net inflow are equal:

$$f_{in}(t) = EBITDA_{scrub}, \$ \quad (22)$$

$$f_{out}(t) = CAPEX_{scrub} + OPEX_{scrub}, \$ \quad (23)$$

$$f_{net}(t) = f_{in}(t) + f_{out}(t), \$ \quad (24)$$

As is known, the inflow, outflow or net inflows discounting at time  $t$  is carried out by multiplying its value  $f_{DCF}(t)$  by a discount factor  $\alpha(t)$ :

$$\alpha(t) = \frac{1}{(1-E)^{t-t^0}} \quad (25)$$

$$f_{DCF}(t) = \alpha(t) * f(t), \$ \quad (26)$$

The net present value, simple and discounted payback periods and return on investments are equal:

$$NPV = \sum_{t=1}^T \frac{f_{net}(t)}{(1-E)^{t-t^0}}, \$ \tag{27}$$

$$PBP = \frac{f_{out}(t)}{f_{in}(t)}, year \tag{28}$$

$$DPBP = \frac{f_{out}(t)}{f_{in}(t)} * \alpha(t), year \tag{29}$$

$$ROI = \frac{f_{in}(t)*\alpha(t)}{f_{out}(t)} * 100, \% \tag{30}$$

Thereby, the key efficiency indicators of investments are *NPV*, *DPBP*, *ROI* which will be calculated on the discount methods by taking into account current, pessimistic and optimistic scenario of cash flow.

### 3. The Mathematic Modeling of Scrubber Assessment

The approbation of the optimization model of selection of scrubber system location is presented on example of Ro-Pax ferry (DFDS). To calculate the optimal location of whole system there is a need to identify the configuration, mass and volume of most significant elements. Using mentioned algorithm, the intervals of deviations ( $\delta\theta, \delta\varphi, \delta\overline{GM}, \delta\overline{GZ}$ ) were calculated and following results were obtained:

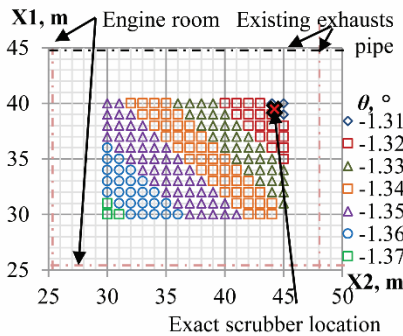


Fig. 5. Deviation of trimming angle

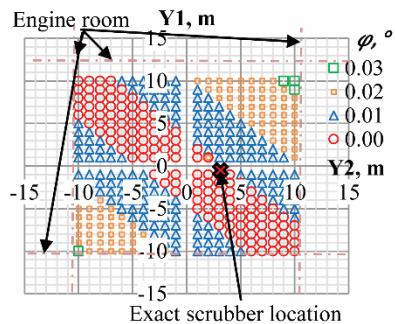


Fig. 6. Deviation of heeling angle

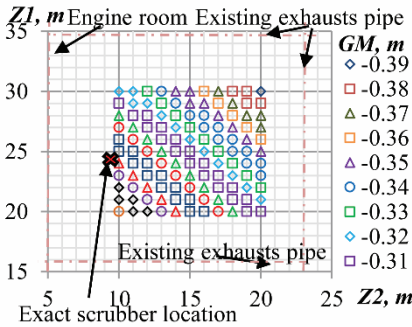


Fig. 7. Deviation of metacentric height

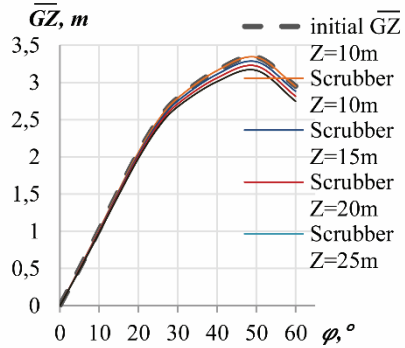


Fig. 8. Deviation of righting arm

The approbation of algorithm was done by comparing the calculation results with real project of scrubber installation on DFDS ferry. The algorithm allows to assess main criteria of ship stability ( $\delta\theta, \delta\varphi, \delta\overline{GM}, \delta\overline{GZ}$ ) and compensate deviations due to the location of each block of system. As is seen in Fig. 6–9 in accordance with scrubber project data (DFDS 2014) exact location of whole scrubber system (marked on the chart  $\times$ ) is within the range obtained by using the proposed algorithm. Received correspondence confirms the accuracy of the calculations and allows stating that the mentioned algorithm can be used to assess ship stability changing and predict the necessary changes to install scrubber onboard.

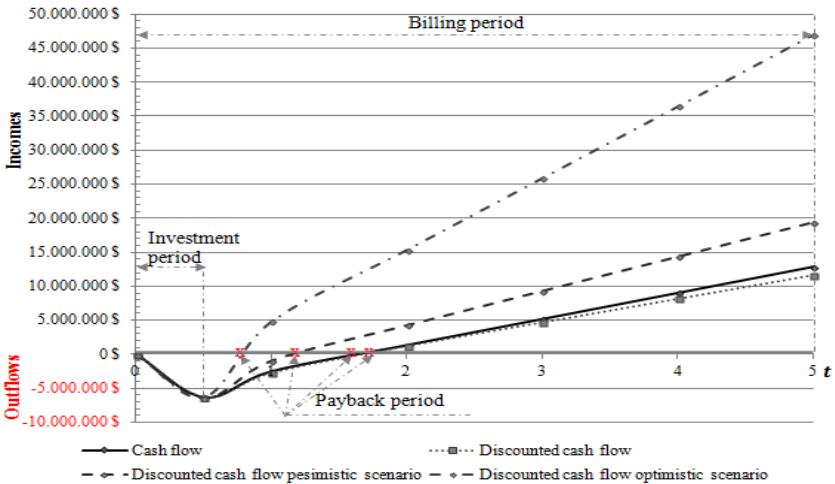
In turn of  $\theta$  (see Fig. 6), the intervals of 5x5m (from 35 to 40 m) allows withstanding relatively similar deviations and adjusting the selection of system location depending on the available space onboard. In turn of  $\varphi$  (see Fig. 7), the mentioned intervals is 2x3m (~ from 0 to 3 m) if all block of system are located on the same side. If 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> block are located on different sides mentioned intervals expands to 4x5m (~ from 0 to 10 m). However, this location of blocks balances only the total center of gravity of the scrubber system. In turn, overturning moment is increased by the longer arm of 1<sup>st</sup> block. Therefore this option is only relevant in the case of replacement of existing equipment on one of the blocks of scrubber system. In turn of  $\overline{GM}$  (see Fig. 8), the mentioned intervals is 4x4m (~ from 10 to 15 m for 2<sup>nd</sup> block and from

20 to 25 for 1<sup>st</sup> block). However, the decrease of metacentric height directly affects the main parameter of stability  $\overline{GZ}$  (see Fig.9) and in this case the center of gravity of whole scrubber system should not exceed 15 m on Z axis. As in our case the lightship weight changed to 2.63% and limiting factor is equal  $\leq 2\%$ . To achieve the requirement, there were made some changes of ship deadweight. The maximum deadweight was reduced by 244 tons (weight of scrubber system), due to the draught marks. This weight was reducing by eliminating one of the fuel tanks in place of new equipment room. The changed gravity centre was compensated by 120 t extra ballast in fore ship (125.5 m on X axis). Thus, the deadweight of ship was reduced by 370 t. An updated Trim and Stability Booklet is then going to have a departure condition with 4179 tons of cargo (including crew, passengers and provision). The actual cargo loading can be higher than the 4179 tons, if other deadweights are reduced (FO, ballast etc.). The investigation of 8 actual conditions received from the ship shows that in the worst case of these conditions, the cargo capacity will be reduced by up to 100 tons.

Certainly, the algorithm of calculations is not final and there are some approximate values that are evident in settlements with limited information about the ship and its premises layout. However, fragments of the expected results cover all location decisions on X, Y, Z axis. So, the algorithm allows setting the range of possible values by moving elements of the scrubber within acceptable interval. The exact location of each element of scrubber system should be refined by the expert opinion of the shipowner. As only shipowner can decide to redevelop the premises, reduce part of the cargo or provision and etc. In turn, mentioned range allows calculating the necessary changes in the cargo capacity of the ship and etc. then possible location is chosen by shipowner. Thus, algorithm allows the shipowner to plan possible changes and the expected costs associated with these changes at the pre-design phase then is possible to choose other way to comply this new MARPOL 73/78 requirements. It is very important that the mathematical modeling of the scrubber installation impact on ship allows without major design expenses choose the best solution for a particular ship.

The evaluation of the investments efficiency is made on the basis of data of scrubber installation project of particular ship received from the shipowner (DFDS 2014). Income data of particular ship

(DFDS 2014): annual fuel consumption 15000t; operating in SECA 100%; amount of Fresh water 9720 m<sup>3</sup>/year; amount of NaOH 9720 m<sup>3</sup>/year; Cost of scrubber equipment 4020568 \$; costs of scrubber installation 2010284 \$; annual maintenance cost 27.166\$/year; price of IFO 322\$/mt; Price of LSMGO 557\$/mt  $\Delta C_{fuel} = 235$  (Bunkerworld 2015-02-23), Pessimistic scenario  $\Delta C_{fuel} = 800\$/mt$  и Optimistic scenario  $\Delta C_{fuel} = 400\$/mt$ . The results are presented in the graphs:



**Fig. 9.** The modeling of cash flows

Cash flows modeling allow estimating the efficiency of investments in scrubber and distributing all the incomes and outflows during the entire billing period (5 years). Figure 3 shows that the largest outflows of scrubber introduction occurred at the beginning of the billing period (buying the equipment and installation). However, CAPEX will be already recouped in the second year by the possibility of using cheaper fuel. Next 3 years (from 2<sup>nd</sup> to 5<sup>th</sup> year) of scrubber operation will present the profit in the form of fuel price differential. Thus, even without fuel price rise, investments in scrubber will allow to generate

profit from the scrubber introduction at least 3 years. The amount of profits directly depends on the difference in fuel prices. For example, the profit is about 130% when calculating the current fuel prices. Using optimistic and pessimistic scenario of fuel prices, mentioned profit may rise from 216% to 522%. The rise in fuel price is expected in the future because of lack of LSMGO on the market. Thus, for more realistic forecasts, at least two (optimistic and pessimistic) scenarios of rise in fuel prices must be used in calculations that allow forecasting the volatility of fuel price. Taking into account the effect of time on the value of cash, the key efficiency indicators of investments (*NPV*, *DPBP*, *ROI*) will be calculated on the discount methods by taking into account current, pessimistic and optimistic scenario (see Tab. 3):

**Table 2.** Efficiency indicators of investments in scrubber reference to a particular ship

Conditions	5 years NPV	PBD	DPBP	5 years ROI
	\$	year	year	%
<b>Presently</b>	11.712.988,51	1.57	1.75	130.06
<b>Pessimistic scenario</b>	19.494.579,42	0.57	0.63	216.46
<b>Optimistic scenario</b>	47.040.033,96	1.13	1.26	522.32

The PBP in scrubber economical study for DFDS cargo ferry is equal to 1.50 years (DFDS 2014). The calculation was performed at the pre-design phase and based on mentioned result was signed the contract of scrubber installation. In turn, obtained PBP is 1.57 years and DPBP 1.75 years. There is 17% difference between analyzed DFDS study results and obtained in the research. This is due to the fact that the proposed method of evaluation contains more accurate data of CAPEX and OPEX of scrubber installation. Mentioned data is cargo capacity reduction, out of operation during installation, time wasting to switch fuel from LSMGO to IFO which are which are not included in most calculations.

#### 4. The Experimental Research of the Scrubber system in Operating Conditions

The interaction of installed scrubber and existing ship's systems was analyzed during experiment of Ro-Pax ferry in operating conditions.

The main objects of study:

- ✓ Ship;
- ✓ Main engines (A and B);
- ✓ Scrubber system.

The analyzed scrubber system was installed onboard Victoria Seaways:



**Fig. 10.** The analyzed ship

The technical characteristics of analyzed ship:

- ✓ IMO number: 9350721
- ✓ Ship type: Ro-Pax;
- ✓ Klass: RINA;
- ✓ Flag: Lithuanian;
- ✓ Year of build: 2009;
- ✓ Builder: Nuovi Canterie Apuani, Italia
- ✓ Ship owner: DFDS Seaways;
- ✓ Ship operator: DFDS Seaways Lietuva;
- ✓ Length: 199.14 m;
- ✓ Width: 26.6 m;
- ✓ Drought: 6.4 m;
- ✓ Bruto weight: 25518;
- ✓ DWT: 8500t;

- ✓ Speed: 23,5 knots;
- ✓ Cargo capacity: 3063 l/m;
- ✓ Trip: Klaipėda – Kiel, Kiel – Klaipėda;
- ✓ Duration: 21val.;
- ✓ Distance: 735 km;
- ✓ Operating: 318d / year, on average, 19.9 hours / day.

Three engines are onboard analyzed ship: two main and one auxiliary. Auxiliary engine is driven by MDO, so the exhaust tract non-fused with scrubber system. The A and B main engines are analyzed in the study:

- ✓ Engines type: 2x Wärtsilä 12V46;
- ✓ Strokes: 4;
- ✓ Power: 2x12 MW;
- ✓ Max air flow: 2x21.4 kg/s;
- ✓ Specific fuel consumption: 176 kg/MWh.

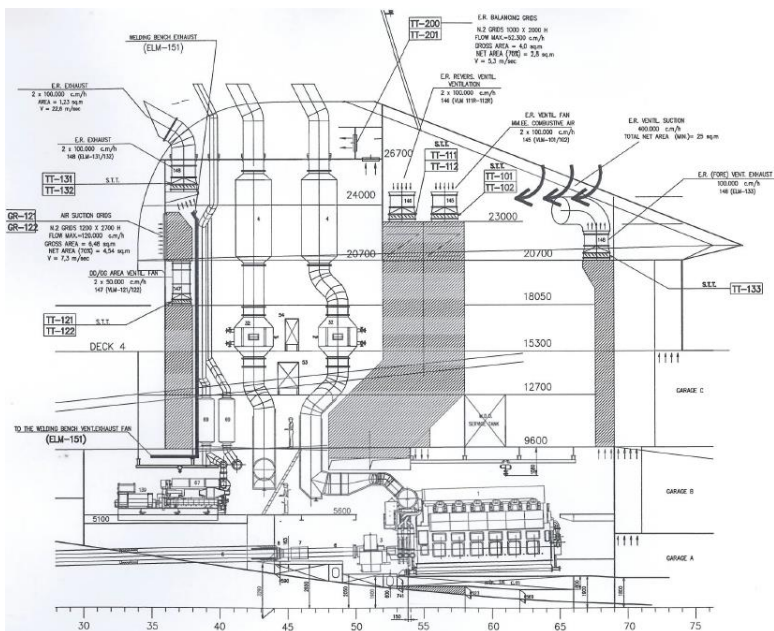
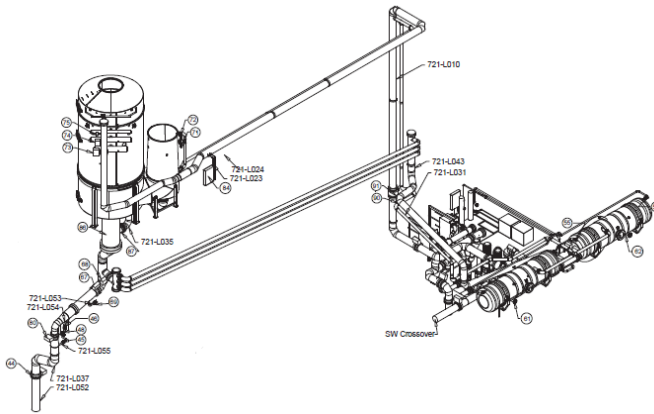


Fig 11. The scheme of engines and exhausts location before installation

The installed scrubber system is integrated and combines two main A and B engine exhaust gas pipeline:

- ✓ Scrubber connection to the engine exhaust tract: integrated;
- ✓ Scrubber type: hybrid (closed loop in the port, open in the sea);
- ✓ Maximum gas flow rate: 43.05 kg / s;
- ✓ Exhaust gas temperature: 380 ° C;
- ✓ CO<sub>2</sub> concentration in exhausts: 6.1%;
- ✓ PM concentration: 0.5 kg / MWh;
- ✓ Designed engine load: 100% MCR;
- ✓ HFO maximum sulfur content: 1%;
- ✓ Marine water alkalinity: 1500 micromoles / liter;
- ✓ SO<sub>x</sub> cleaning efficiency: the 0.1% sulfur content HFO equivalent;
- ✓ Energy demand: open loop 359 kW; closed loop 258;
- ✓ Geometric parameters of scrubber unit:
  - ✓ Length: 7.9 m;
  - ✓ Height: 10.9 m;
  - ✓ Diameter: 4.7 m;
  - ✓ Size: 404.7 m<sup>3</sup>;
  - ✓ Weight (design): 23.2 tons;
  - ✓ Weight (in operating): 33.5 tons;
  - ✓ Total system weight (in operating): 230T;



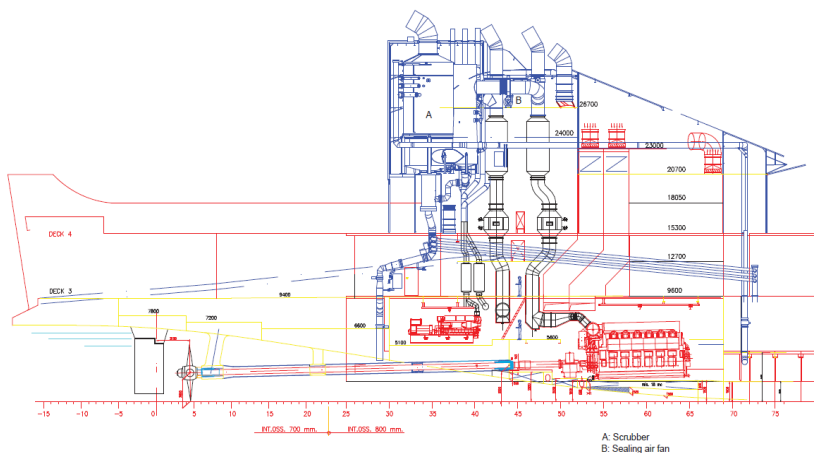
**Fig 12.** Scrubber system

Tested scrubber system consists of:

- ✓ Exhausts cleaning system (scrubber unit) with casing;
- ✓ Exhausts manifold;
- ✓ Ventilation system;
- ✓ Water supply systems;
- ✓ NaOH system;
- ✓ Sewage, water treatment and sludge storage systems;

Scrubber system blocks in the board:

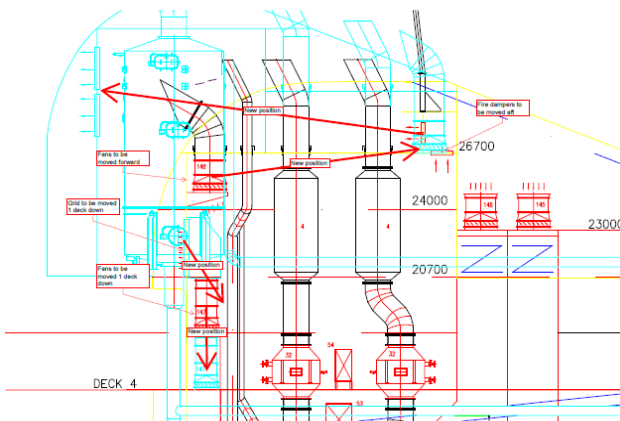
- ✓ Exhausts casing: scrubber unit with manifold;
- ✓ Equipment room 3rd deck: 2 tanks and circulation pumps; 2 coolers and pumps; cleaning module; water analyzer; 2 NaOH pumps and module.
- ✓ Pump room 1st deck: 2 seawater pump.



**Fig. 13.** The location of scrubber system (longitudinal and transverse)

The location of each element of analyzed scrubber system was chosen in view of the existing areas. Mentioned arrangement of coordinate selection is acceptable and widely used on project design phase. However in terms of pre-design phase the analysis of all ship areas is inefficient. Pre-design phase is suitable for technology efficiency assessment is designed to sink the suitability assessment, taking into account the characteristics of particular ship. Therefore, the assessment should be simplified to ensure the immediacy of results. That is why the methodology scrubber efficiency assessment introduced the interval of possible location of each system element location. These limits are set in relation to carry out scrubber project which contains the main principles of each element installation. The analysis of the installed scrubber project was to clarify the possible location intervals which directly coincides with engine room and exhausts location onboard. Therefore, the methodology consists mentioned intervals instead ship's drawings (in the range from the beginning to the end of area X, Y, Z). It is recommended that scrubber installed next to the existing exhausts, pumps and other small water collectors near existing pump room. However, the equipment room can be arranged in particular interval. It was analyzed the two possible equipment locations options in the project: directly under the scrubber; closer to the right side. In the first

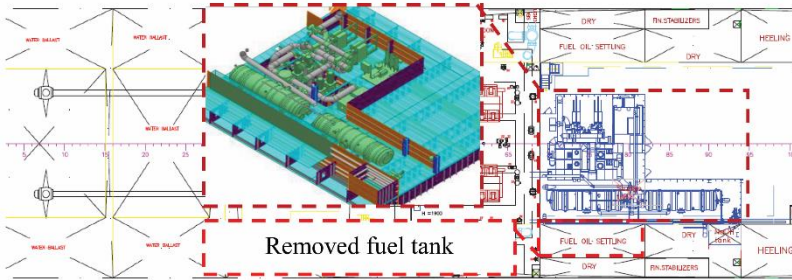
case, the influence of the ship's stability is lower, but given the potential loss of profits because of declining more part of the cargo area, the owner decided to install a room under the second option. It was found that the equipment room has a larger spacing. Therefore, this block has most significant impact on ship stability. The analyzed scrubber located on Deck 20.700 in aft part of the funnel casing. In this connection the relocations of some ventilation devices are to be done:



**Fig. 14.** Re-location of the existing ship elements in exhausts casing area

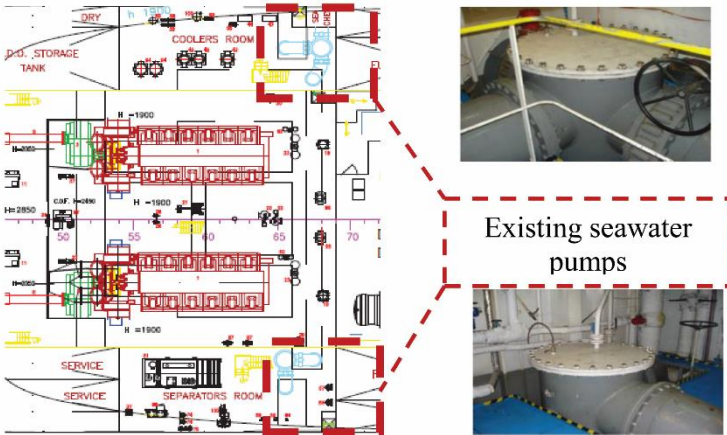
Mentioned changes are determined at the design phase and at pre-design phase are inappropriate. However, given the dimensions and weight of scrubber unit bloc the offered methodology allows to provide additional space required to install scrubber in exhausts casing.

Equipment room is located above on the deck 9.6 m height under the scrubber unit 28 m along the ship closer to the foreship (see fig. 15). Therefore, in order to equip this room the cargo place was reduced by 114.4 m<sup>2</sup>. Equipment room arranged closer to the starboard. Therefore, in order to compensate additional weight respectively the fuel tank at starboard was decrease by 120 tons.



**Fig. 15.** Re-location of the existing ship elements in 3 deck area

Sea water pumps are combined with the existing seawater supply system on the 1st deck 53.6 m from aft along the ship:



**Fig. 16.** Re-location of the existing ship elements in 1 deck area

Pipes of system connections are arranged between mentioned blocks: scrubber, equipment and pumps. Therefore, piping weight may be apportioned among mentioned blocks, and the layout of the coordinate respectively coincides with the coordinates of the blocks.

The results have been treated by mathematical statistics methods using Microsoft Excel.

**Table 3.** The characteristic of measurement device

Measurement device	The range of measurement	Accuracy
<b>TESTO 350</b>		
CO	0...500 ppm	± 5%
CO <sub>2</sub>	0...50%	± 0.3 %
NO	0...300 ppm	± 5%
NO <sub>2</sub>	0...500 ppm	± 5%
SO <sub>2</sub>	0...5000 ppm	± 5%
O <sub>2</sub>	0...25 %	± 0.2 %
<b>HGA</b>		
NO	0...300 ppm	± 5%
CO <sub>2</sub>	0...50%	± 0.3 %
HC	0...500 ppm	± 5%
<b>MAHA</b>		
Smoke density K	0...10 m <sup>-1</sup>	± 0.05 m <sup>-1</sup>

The experimental studies of scrubber system were carried out in cooperation with the Research Laboratory of Air Pollution from Ships. During the experiment were carrying out:

- ✓ The efficiency of exhaust gas cleaning (cleaned and purified gas comparison);
- ✓ Scrubber operating on close and open loop mode;
- ✓ Scrubber operating during the storm;
- ✓ Scrubber operating at different engines load mode (50, 60, 70 % load).
- ✓ A separate measurement of A and B engine exhaust gas before scrubber (HGA and MAHA measurement), equipment in parallel captured sink control panel indications and exhausts after scrubber (350 TEST);

The efficiency of scrubber system was evaluated in two test modes: closed (port area) and open loop (open sea). Exhaust emission measurements were carried out using:



TESTO 350

HGA

MAHA

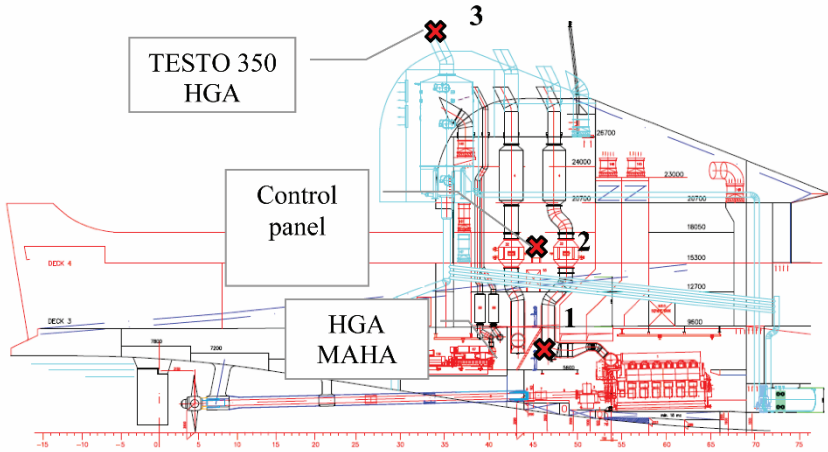
Control panel

**Fig. 17.** Measurements devices

The location of measurement devices onboard:

**Table 4.** Measurements

Measurement device	Exhausts		Control panel
	after scrubber	after engines	
TESTO 350	✓	-	-
HGA	✓	✓	-
MAHA	✓	✓	-
Photography and visual control	-	-	✓



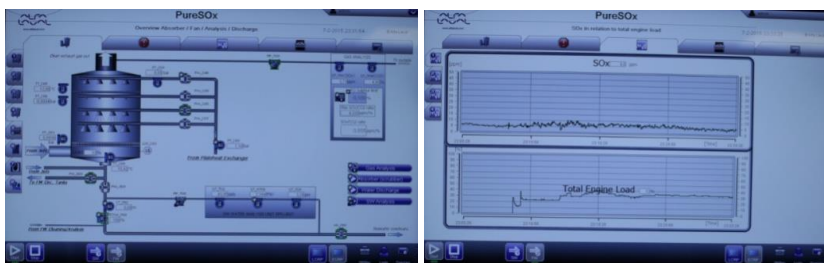
**Fig. 18.** The scheme of distribution of measuring devices onboard:  
1 - engine exhausts in engine room; 2 - scrubber control panel;  
3 - scrubber exhaust gas pipe

MAHA and HGA devices were used at 1 point in the engine room to measure exhausts after engine:



**Fig. 19.** MAHA and HGA measuring device distribution onboard

Measurements were performed separately for the A and B engine. At the same time was recorded notes of scrubber operating using control panel at 2 point:



**Fig. 20.** Scrubber control panel

Exhausts cleaning efficiency was measured at 3 point after scrubber:

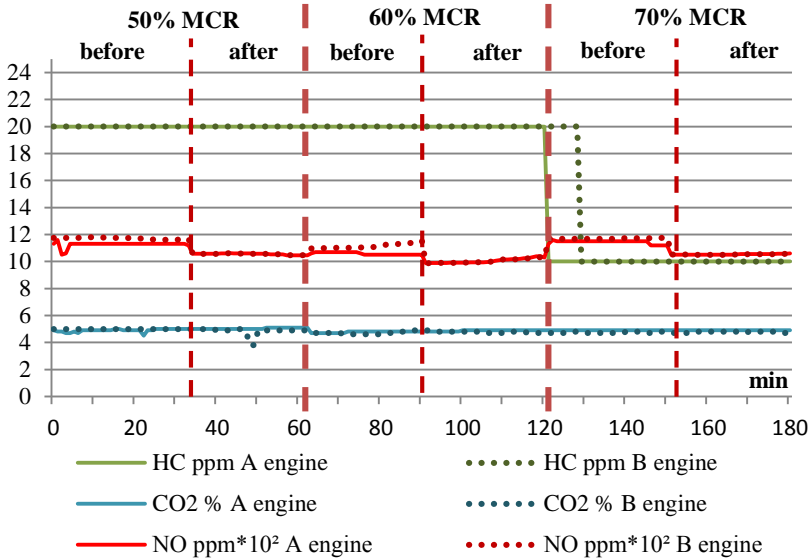


**Fig. 21.** TESTO 350 measuring device in the scrubber exhaust gas pipe

There were no key difference of exhausts cleaning efficiency on close and open loop mode. The required reduction level of  $SO_x$  emissions was ensured on both modes.

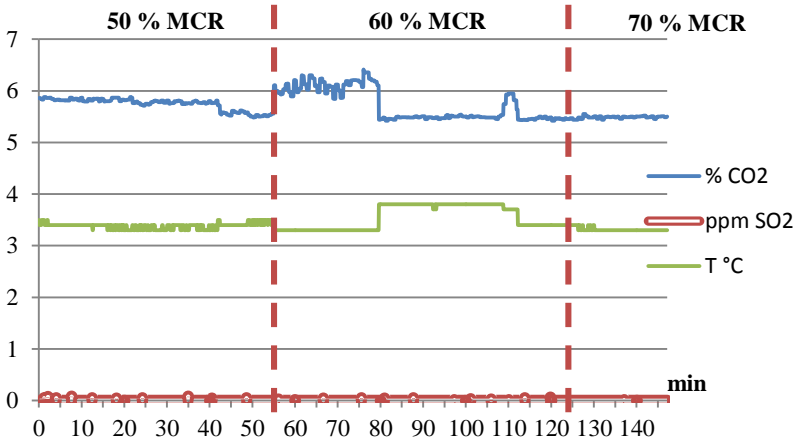
In order to determine the sink scrubbing efficiency of the use of MAHA, HGA and continue 350 equipment was measured ship's main engine exhaust gas emissions and to the sinks. Measurement results were exported and process din Microsoft Excel software. The results are presented in graphs:

By using HGA equipment was measured emission before and after scrubbing in case of HC, CO<sub>2</sub> and NO content:



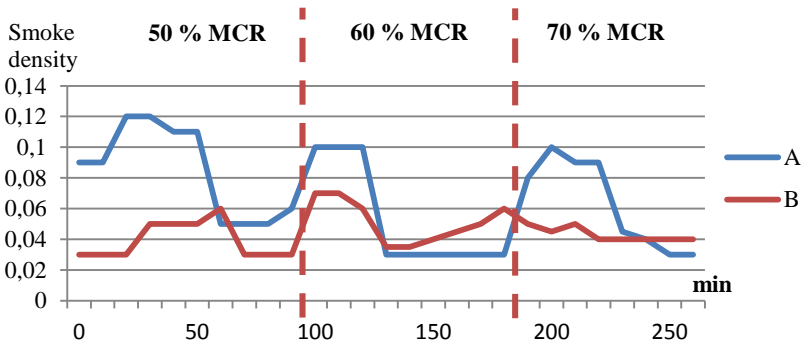
**Fig 22.** HGA measurement result

TEST 350 equipment was used to measure exhausts emissions after scrubber. Consequently, the exhaust cleaning efficiency was determined by calculating the concentration of  $\text{SO}_x$  in exhausts. At the same time was monitored the data of control panel, which recorded a 0-1 ppm  $\text{SO}_x$  concentration at different engine loads. The coincidence of measurement results and control panel data confirms TEST 350 equipment adequacy. The steady reduction of  $\text{SO}_x$  emissions up to 99-100% has been approved during the measurement of exhausts cleaning at point 3. Set parameter corresponds to manufacturer calibration. The instant jump of  $\text{CO}_2$  and temperature was set in the transition of the engine operating modes (from 50 to 60 and from 60 to 70% engine load). However  $\text{SO}_x$  indicators were stable and did not exceed the permissible values. Therefore, even under load change conditions, scrubber system provided the required quality of exhausts cleaning:



**Fig. 23.** TESTO 350 measurement result

MAHA equipment was used to measure smoke density at points 1 and 3. However, the exhausts at point 3 were humidity, that did not allow measuring the relative amount of particulate matter in exhausts. Analyzing the smoke density of exhausts at point 1 depending on engine load was obtained the following results:



**Fig. 24.** MAHA measurement result, smoke density according to SAEJ1667

The scrubber system efficiency of exhausts cleaning was approved during the measurement, which confirms an adequate quality of exhausts cleaning at different engine loads.

## General Conclusions

1. The methodology of comparative cost-effectiveness and technological feasibility assessment of SO<sub>x</sub> emission reduction technologies adaptation has been developed and realized in the form of software:

1.1 Identified and prioritized affecting factors of SO<sub>x</sub> emission reduction technologies adaptation profitability: ship operation intensity; being in ECA; ship type, size, age, engines power and etc. The profitability of scrubbers and low sulfur fuel has been studied.

1.2 The principals of scrubber system location selections onboard has been carried out on the basis of mathematical modeling of negative impact on ship's stability and performance minimization.

1.3 The investment plan the entire life cycle of SO<sub>x</sub> technologies introductions has been created:

- ✓ Installation phase: scrubber - the purchase of equipment, design, installation costs; low sulfur fuel - nonessential capital expenditure of additional fuel tanks installation;
- ✓ Operating phase: scrubber - reagents and additional energy cost, maintenance and repair costs, lost profit because of reduced cargo capacity; low sulfur fuel - significant increased operating costs due to the use of more expensive fuel;

2. The adequacy of created methodology of selection of scrubber system location onboard has been on the simulation-based of analysis of 18 completed projects of scrubber's installation onboard existing ships (*Alpha Layali Aalborg* - Victoria Seaways, *Wärtsilä* - Containership VII, etc.):

2.1 The database of scrubber units and whole system parameters has been developed in accordance with leading equipment manufacturers recommendations (*Alfa Laval Aalborg*, *Wärtsilä*

*Hamworthy Krystallon, Clean Marine, Couple Systems, Du-Pont BELCO Clean Air Technologies, Green Tech Marine, MAN Diesel and Turbo, Marine Exhaust Solutions*);

2.2 The results of software mathematical modeling has been specified in accordance with analyzed 18 completed projects of scrubbers installation onboard existing ships. The obtained results confirm the adequacy and practical application suitability of created methodology in form of software. The analysis shows:

- ✓ Payback period of passengers ferries Ro-Ro / Ro-Pax (8 in Lithuanian fleet) with 100% ECA does not exceed 2 years, whereas for refrigerators and containerships payback period
- ✓ Payback period of cargo ships (26 in Lithuanian fleet) with 75% and less time in ECA is up to 3.5 years. With decreasing transit time in ECA to 50% the payback period is up to 6 years and with 25% transit time in ECA it is up to 13 years;

4. The experimental research of the scrubber system in operating conditions has been prepared, planned and executed during DFDS Seaways Ro-Pax ferry trip from Klaipeda to Kiel:

4.1 It was found 99% of SO<sub>x</sub> emissions reductions at a wide range of different engine operating conditions, including storm.

4.2 Approved scrubber system SO<sub>x</sub> reduction efficiency up to 10%.

5. The developed methodology in the form of software due to approved adequacy and complexity can be recommended to Lithuanian maritime transport operators (*Ministry of Transport and Communications, Lithuanian Maritime Safety Administration, the shipping company and etc.*) for practical use and efficient preparations to comply with MARPOL 73/78 Annex VI requirements.



---

# Priedai

**A priedas. Autorės mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas**

**B priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijų medžiagą disertacijoje**

Irina PANASIUK

ORO TARŠOS IŠ LAIVŲ JĖGAINIŲ MAŽINIMO  
TECHNOLOGIJŲ ĮDIEGIMO TYRIMAI

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,  
transporto inžinerija (03T)

THE RESEARCH OF TECHNOLOGY INTRODUCTION  
OF AIR POLLUTION REDUCTION FROM SHIP PROPULSION

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,  
Transport Engineering (03T)

Klaipėda, 2015

---

SL 1335. 2015 10 30. Apimtis 12,25 sąl. sp. l. Tiražas 20 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/>



