

LAIVO IŠMETAMŲJŲ DUJŲ TOKSIŠKUMO MAŽINIMO PROBLEMATIKA

Irina Panasiuk

Klaipėdos universitetas

El. paštas irina.panasiuk@gmail.com

Santrauka. Straipsnyje analizuojama jūrų transporto įtaka ekologiniam aplinkos disbalansui. Nagrinėjama laivo išmetamųjų dujų oro taršos problematika. Pateikiama oro taršos iš laivų reguliavimo raida. Išanalizuotas skirtingų toksiškumą mažinančių metodų efektyvumas.

Reikšminiai žodžiai: MARPOL 73/78, vidaus degimo variklis (VDV), laivų emisija, išmetamųjų dujų toksiškumas.

Įvadas

Pasaulinės tarptautinės prekybos apimčių didėjimas veikė intensyvią transporto sistemų, iš jų ir laivyno, plėtrą. Lyginant su kitomis transporto rūšimis, laivyboje išmetamųjų CO_2 , t/km, kiekis nėra labai didelis – globaliu mastu $\approx 3,3\%$ (Baltoji knyga 2011). Tačiau pažymėtina, kad apie 90 % pasaulinės prekybos objektų gabenama jūromis: per metus laivais pervežama daugiau nei 8 mlrd. t krovinių; metinės kuro sąnaudos sudaro apie $0,32\div 0,36$ mlrd. t (9 % pasaulinių naftos sąnaudų). Atsižvelgiant į jūrinio transporto suvartojamo kuro kiekį, nuo kurio tiesiogiai priklauso oro taršos iš laivų intensyvumas, jau dabar laivynas kelia didelę grėsmę aplinkai. Taigi, per metus laivai išmeta: daugiau kaip 1 mlrd. t anglies dvideginio (CO_2), apie 25 mln. t azoto oksidų (NO_x), 15 mln. t sieros oksidų (SO_x) ir 1,8 mln. t kietųjų dalelių PM (Strazdauskienė *et al.* 2011).

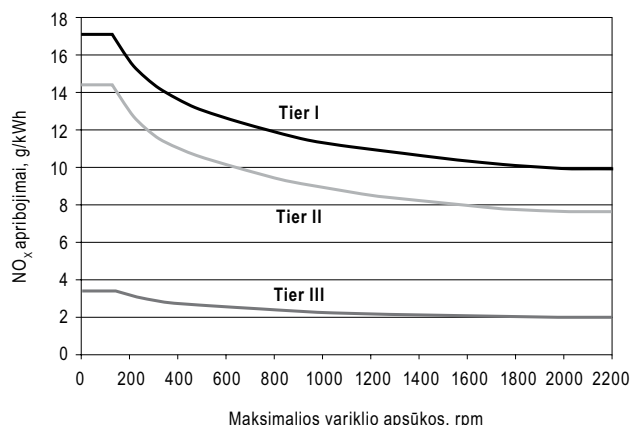
Nesiimant atitinkamų veiksmų kenksmingų dalelių emisija iki 2050 gali padidėti net 1,5–2 kartus. Todėl šiuo metu Tarptautinė jūrų organizacija (IMO) aktyviai rengia planą, kaip sumažinti taršą iš laivų. Pagrindiniai oro taršos mažinimo kriterijai yra: azoto oksidų (NO_x), anglies monoksido ir dioksido (CO ir CO_2), sieros dioksido (SO_2), angliavandenių (CH), suodžių ir kitų kietųjų dalelių (PM) koncentracijos mažinimas laivų išmetamosiose dujose.

Oro taršos iš laivų reguliavimo raida

Siekiant mažinti aplinkos užterštumą 1973 m. IMO išleido Tarptautinę MARPOL 78/73 konvenciją, kurios pagrindinis tikslas – sumažinti jūrų transporto daromą neigiamą įtaką aplinkai. 1978 m. buvo padaryti minėtos konvencijos pakeitimai. 1997 m. buvo pateiktos oro taršos iš laivų prevencijos taisyklės (MARPOL 78/73 ANNEX VI 2006),

kurios įsigaliojo 2005 m. Šis konvencijos priedas nustato leistiną NO_x , CO, CO_2 , SO_x , CH, suodžių ir kitų kietųjų dalelių koncentracijos kieki.

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 VI konvencijos priedu. 2008 m. į MARPOL 73/78 VI priedą buvo įtraukti du nauji emisijos sugriežtinimo lygiai Tier II ir Tier III. Pagal IV priedo reikalavimus laivai, kurių pastatymo metai yra 2000 m. ir vėlesni, taip pat kurių variklių galingumas viršija 130 kW, turi atitikti Tier I lygio reikalavimus. Nuo 2011 m. sausio 1 dienos įsigaliojo Tier II reikalavimai, o nuo 2016 m. įsigalioja Tier III reikalavimai. Tier III lygio reikalavimai, skirtingai nei Tier I ir Tier II, negalios mažesniems nei 24 metrai laivams, kurie naudojami tik pramoginiams tikslais, arba laivams, kurių variklio galia neviršija 750 kW. 1 paveiksle nurodyti konvencijos įsigaliojimo grafikai (Legal regulation shipping 2011).



1 pav. NO_x emisijos apribojimai (MARPOL 73/78 VI priedas)
Fig. 1. Restrictions on NO_x emissions (MARPOL 78/73 ANNEX VI)

1999 m. direktyvoje (su 2005 m. pakeitimais) reglamentuojamas sieros kiekis jūrų transporto priemonių naudojamame kure. 2008 metų MARPOL konvencijos protokolo VI priede numatyta iki 2020 m., blogiausiu atveju bent iki 2025 m., šį kiekį laipsniškai sumažinti net iki 0,5 % (2 pav.).

Pažymėtina, kad konvencija leidžia naudoti daug įvairių teršalų išmetimo mažinimo metodų: įvairių įrangą, metodus, technologijos procesus ir alternatyvų kurą.

Naujojoje direktyvos redakcijoje numatytos vadinosios išmetamųjų teršalų kontrolės zonos ECA (angl. *Emission Control Area*), kur aplinka turi būti ypač saugoma. Prie šių zonų priskiriama (3 pav.): 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 (Legal regulation shipping 2011).

Šioms teritorijoms gali būti suteiktas SECA arba NECA statusas (SO_x or NO_x *Emission Control Areas*), tuomet minėtuose rajonuose leistina sieros oksidų ir azoto oksidų emisija galės būti 3–5 kartus mažesnė nei pasauliniu mastu.

Išanalizuokime tokių zonų atsiradimo priežastį: laivo dyzeliai, aprūpinantys laivą elektros energija, nuolat dirba

uosto teritorijose, ir nors globaliu mastu laivai nedaro didelės įtakos bendram oro užterštumui, bet uostamiestyje išmetamųjų dujų rodiklis gerokai padidėja: iki 10–30 %. Šiose zonose ekologinio fono pablogėjimas vyksta dėl šių priežasčių:

- dėl akvatorijos apribojimų neįmanomas greitas toksinių junginių išsisklaidymas ore;
- uosto teritorijoje pakrovimo / iškrovimo darbų metu laivo dyzeliai dirba dideliais sūkliais.

Minėtose teritorijose padidėjęs laivybos intensyvumas verčia griežtinti laivams keliamus reikalavimus. Panagrinėkime Baltijos jūros pavyzdį. Šios jūros baseino plotas tėra 0,12 % pasaulio vandenyno ploto. Tačiau intensyvumas yra didžiulis: kasmet jame aptarnaujama daugiau nei 60 tūkst. laivų, kurių bendros kuro sąnaudos siekia 5,6 mln. t (daugiau kaip 1,6 % pasaulinio kuro sąnaudų). Dėl išvardintų priežasčių toksinių junginių emisija Baltijos jūroje labai skiriasi (daugiau nei 13 kartų didesnė) nuo pasaulinio vidurkio: čia išmetama daugiau kaip 390 tūkst. t NO_x ; 135 tūkst. t SO_x ; 18 mln. t CO_2 (IMO. Prevention of air pollution from ships 2009).

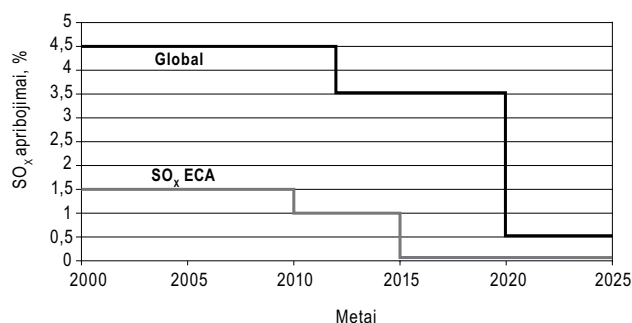
Analizuodami kitus regionus, kur jūrų transporto srautai taip pat dideli, matome, kad atskiros šalys savo iniciatyva stengiasi sumažinti akvatorijų užteršimą. Taip jau nuo 2011 m. Singapūro uoste taikoma kenksmingų junginių emisijos mažinimo programa. Pagal šią programą laivams, kuriuose įdiegtos išmetamųjų dujų valymo sistemos arba naudojamas mažos sieros koncentracijos (<1 %) kuras, bus taikomos 15 % mažesnės rinkliavos už stovėjimo uoste laikotarpį. Kiti uostai (Švedijos, Suomijos, JAV) skiria papildomą oro taršos iš laivų mokestį arba apriboja laivų, neatitinkančių uosto keliamų reikalavimų, įplaukimą į akvatoriją.

Tyrimai rodo, kad SO_x emisijos normų sugriežtinimas padidins laivo eksploatacijos išlaidas ir frachto kainą net iki 30 %, o tose zonose, kurioms bus suteiktas SECA ir NECA statusas, šios sąnaudos padidės net iki 35 %. Todėl norint užtikrinti jūrinio sektoriaus konkurencingumą būtina pasiūlyti racionalų kenksmingų junginių emisijos mažinimo metodą, kuris atitiktų MARPOL 73/78 reikalavimus.

Oro taršos iš laivų mažinimo metodų taikymo racionalumas

Dabartiniu metu laivų išmetamųjų dujų toksiškumas mažinamas dviem kryptimis, kurios pateiktos 1 lentelėje (Авдевин 2003).

Pirminiai metodai: toksinių junginių mažinimas susidarymo metu – variklio darbo proceso optimizavimas. Antriniai metodai: išmetamųjų dujų nukenksminimas nau-



2 pav. SO_x emisijos apribojimai (MARPOL 73/78 VI priedas)
Fig. 2. Restrictions on SO_x emissions (MARPOL 78/73 ANNEX VI)



3 pav. Teritorijos, kuriose keliamos griežtesnės toksinių junginių emisijos normos: ■ ECA; ■ planuojama prijungti; ■ svarstoma; — intensyvios jūrinio transporto magistralės

Fig. 3. Areas of more stringent standards of toxic emissions: ■ existing ECA; ■ planned ECAs; ■ discussed ECAs; — most used trading routes

1 lentelė. Laivo išmetamųjų dujų toksiškumo mažinimo metodai
Table 1. Methods for reducing toxic emissions from the ship

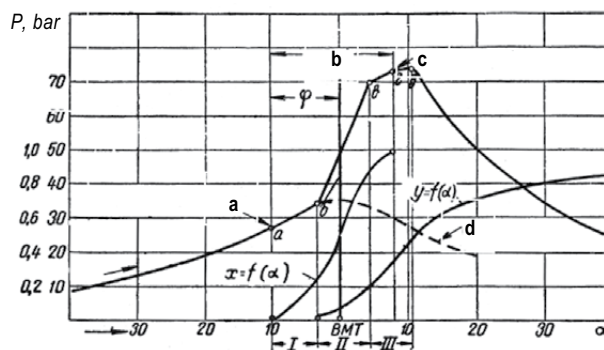
Išmetamųjų dujų toksiškumo mažinimo metodai
Pirminiai metodai
<i>Variklio darbo proceso optimizavimas:</i> • kuro tiekimo reguliavimas; • degimo kameros optimizavimas;
<i>Specialaus kuro naudojimas:</i> • mažasieris kuras; • alternatyvusis kuras;
<i>Oro tiekimo reguliavimas:</i> • įpučiamo oro parametru keitimas;
Antriniai metodai
<i>Išmetamųjų dujų nukenksminimas:</i> • terminis, elektrinis, kontaktinis.

dojant valymo įrenginius.

4 paveiksle pateiktoje diagramoje grafiškai pavaizduotas variklio darbo procesas – slėgio priklausomybė nuo alkūninio veleno pasisukimo kampo (Илпмов *et al.* 1999):

Žinome, kad NO_x junginiai degimo kameroje susidaro esant aukštai temperatūrai. Tačiau CO, CH ir PM emisijai didžiausią įtaką turi neefektyvus kuro degimas (kai kuras sudega nevisiškai). Tokiu būdu variklio toksiškumas mažinamas reguliuojant darbo proceso parametrus, siekiant nustatyti optimalias variklio charakteristikas. Tai pasiekama užtikrinant tolygesnį variklio darbo procesą, t. y. išvengiant staigaus slėgio ir temperatūros šuolio, nesant esminio kuro sąnaudų padidėjimo. Indikatorinėje diagramoje matome, kad iškart po kuro įpurškimo degimo kameroje staiga padidėja slėgis ir atitinkamai temperatūra. Kad geriau vyktų darbo procesas, būtina užtikrinti mažesnę slėgį c atkarpoje (būtent šioje atkarpoje susidaro NO_x). Esminiai parametrai, lemiantys tolygų variklio darbo procesą, yra: kuro įpurškimo laikas, slėgis ir kampas; įpurškiamo kuro pasiskirstymas degimo kameroje; degimo kameros konstrukcija; įpučiamo oro parametrai. Toliau nagrinėsime skirtingų išmetamųjų dujų toksinio poveikio mažinimo pirminių variklio metodų taikymo privalumus ir trūkumus.

Kuro tiekimo reguliavimas. Kuro įpurškimo parametru (kuro įpurškimo laiko, slėgio ir kampo) optimizavimas gali sumažinti kuro sąnaudas ir atitinkamai toksinių junginių emisiją. Tai pasiekama didinant kuro tiekimo slėgį ir užtikrinant geresnę kuro pasiskirstymą degimo kameroje, dėl ko geriau išdega kuras. NO_x emisijos mažinimas pasiekiamas reguliuojant kuro tiekimo kampą. Tačiau, sumažinus kuro tiekimo kampą sumažėja temperatūra, o tai lemia blogesnę kuro išdegimą ir padidina CO, CH ir PM emisiją. Siekiant užtikrinti gerą kuro išdegimą ir tuo pat metu mažesnę slėgį ir temperatūrą naudojamas kuro įpurškimas porcijomis (įpurškimas ciklo pradžioje ir degimo proceso metu). Šiuo



4 pav. VDV indikatorinė diagrama: a – kuro įpurškimo pradžia; b – kuro įpurškimo pabaiga; c – kuro įpurškimo pabaiga; d – plėtimasis be kuro įpurškimo; $x(f(\alpha))$ – tiekiamo kuro kiekis; $y(f(\alpha))$ – sudegusio kuro kiekis

Fig. 4. ICE indicator diagram: a – start of fuel injection; b – period of fuel injection; c – finish of fuel injection; d – expansion without fuel injection; $x(f(\alpha))$ – amount of consumed fuel; $y(f(\alpha))$ – amount of combusted fuel

metodu nedidinant kuro sąnaudų gerokai sumažinama NO_x emisija. Jo pagrindu buvo sukurta „Common rail“ technologija, dėl kurios, esant bet kokiems variklio darbo režimams, į degimo kamerą tiekiamas optimalus kuro kiekis ir užtikrinamas geras variklio darbo procesas.

Degimo kameros optimizavimas. Degimo kameros forma turi įtakos degimo procesui. Varikliai su vientisa degimo kamera pasižymi kuro ekonomišku ir konstrukcijos paprastumu, tačiau jų darbo procesas netolygus ir atitinkamai didesnis variklio toksinis poveikis. Padalintos degimo kameros pasižymi geresniu kuro susimaišymu, kuris veikia kuro degimą ir šį procesą daro tolygesnį. Tačiau dėl šio tipo degimo kameros konstrukcijos tampa sudėtingesnis šalto variklio užvedimas, o dėl didesnio cilindro paviršiaus ploto padidėja šilumos nuostoliai lemia didesnes kuro sąnaudas. Optimalus degimo kameros tipas yra pusiau padalinta kamera, pasižyminti anksčiau išvardintų kamerų privalumais.

Specialaus kuro naudojimas. Dar vienas būdas sumažinti toksinių dalelių emisiją yra efektyvesnio kuro naudojimas. Tai yra kuro savaiminio užsiliepsnojimo savybių gerinimas, siekiant užtikrinti greitą liepsnos fronto pasiskirstymą degimo kameroje. Taip pat galima naudoti mažasierį kurą, kuriuo sumažinama išmetamųjų dujų SO_x emisija. Biodyzelinas ir dujos taip pat užtikrina geras ekonomines ir ekologines charakteristikas. Tačiau pagrindinis alternatyviojo kuro naudojimo trūkumas – gamybos kaina, kuri atitinkamai padidina ir laivo eksploatacijos sąnaudas.

Oro tiekimo reguliavimas. Emisijos mažinimas optimizuojant oro įpūtimą į cilindrą pasiekiamas naudojant turbokompresorius. Jis leidžia padidinti oro kiekį kuro ir oro mišinyje. Tokiu būdu yra sumažinama kietųjų dalelių emisija ir geriau iš cilindro pašalinamos išmetamosios dujos. Toks

oro įpurškimas gerokai padidina įpučiamo oro temperatūrą, todėl degimo kameroje padidėja temperatūra, taip pat padidėja ir NO_x emisija. Norint išvengti temperatūros kilimo oro įpūtimo metu naudojama oro aušinimo sistema. Naudojant turbokompresorių su aušinimo sistema pasiekiamas tiek kietųjų dalelių, tiek NO_x emisijos sumažėjimas.

Vandens įpurškimo į degimo kamerą sistema. NO_x emisija tiesiogiai priklauso nuo temperatūros degimo kameroje. Todėl vandens tiekimas (kartu kurą sumaišant su suslėgtu oru arba įpurškiant tiesiogiai į degimo kamerą) degimo proceso metu sumažina NO_x emisiją. Tačiau šis būdas nėra labai veiksmingas, nes mažėja variklio ciklo šiluminis naudingumo koeficientas.

Paminėti metodai užtikrina laivo ekologinių parametru atitiktį Tier II reikalavimams. Siekiant įvykdyti Tier III normatyvus, būtina naudoti išmetamųjų dujų valymo sistemas.

Išmetamųjų dujų nukenksminimas. Šiuo metu taikomi trys išmetamųjų dujų apdorojimo būdai: terminis (sudeginimas, katalitinis oksidavimas), elektrinis (poliarizavimas) ir kontaktinis (sausasis ir skystasis). Smulkiau aptarsime kontaktinį išmetamųjų dujų apdorojimo metodą. Sausasis valymas taikomas, kai naudojami absorbentai (aliumogelis, silikagelis, ceolitas, aktyvinta anglis). Skystojo valymo esmė – toksinių dalelių ištirpinimas vandenyje. Išvardintos valymo sistemos veiksmingai mažina toksinių junginių koncentraciją išmetamosiose dujose, tačiau jos yra labai masyvos, brangios ir kol kas ne iki galo ištirtas šių sistemų efektyvumas esant kintamiems variklio darbo procesams.

Išvados

Analizuojant IMO reikalavimų sugriežtinimą pastebėta, kad esminiai MARPOL 73/78 pakeitimai buvo padaryti kartu didėjant jūrinio transportavimo srutams. Siūlomas oro taršos iš laivų normavimas yra efektyvus, tačiau kelia rimtą grėsmę laivybos sektoriui ir gali veikti jo konkurencingumo mažėjimą. Prekių transportavimas gali pereiti į sausumos transportą, o tai savo ruožtu dar labiau padidins oro taršą. Todėl naudojant tam tikras griežtesnes priemones būtina iš anksto numatyti galimus metodus, siekiant užtikrinti laivybos sektoriaus konkurencingumą.

Remiantis atliktais skirtingų laivo taršos mažinimo metodų taikymo tyrimais galima teigti, kad nė vienas iš jų nepasiežymi 100 % efektyvumu. Esminė tokios situacijos priežastis yra laivo variklio darbo proceso ypatumai: variklio ekonomiškumas priklauso nuo efektyvaus kuro degimo, šis procesas lydimas aukštos temperatūros, kuriai esant susidaro NO_x; temperatūros sumažinimas teigiamai veikia NO_x emisiją, tačiau kartu didina kuro sąnaudas, CO, CH, PM dalelių išsiskyrimą. Tai įrodo kompleksinio metodo, kuris iki šiol nėra taikomas, būtinumą.

Literatūra

- Baltoji knyga.* 2011. Bendros Europos transporto erdvės kūrimo planas. Konkurencingos efektyvių išteklių naudojimu grindžiamos transporto sistemos kūrimas.
- IMO. Prevention of air pollution from ships. 2009. Second IMO GHG study, MEPC 59. 287 p.
- Legal regulation shipping. 2011 [interaktyvus]. Prieiga per internetą: http://www.mandiesel-greentechnology.com/article_007097.html
- MARPOL 73/78 ANNEX VI Convention for the Prevention of Air Pollution from Ships. London: IMO, 2006. 488 p.
- Strazdauskienė, V.; Bereišienė, R.; Bendikienė, J. 2011. *Švarus oras virš Baltijos – svarbus regiono šalių aplinkosaugos prioritetas.* Prieiga per internetą: http://www.clean-baltic-sea-shping.eu/uploads/media/Presentation_Svarus_oras_virs_Baltijos.pdf
- Авдевин, Д. Е. 2003. *Повышение экологической безопасности дизельных установок судов выбором рациональной технологии нейтрализации оксидов азота в отработавших газах:* Дис. на соиск. учен. степ. канд. тех. н. СПб.: СПбГУБК.
- Шармов, В. И.; Кузнецов, А. Г.; Марков, В. А. 1999. Проблемы создания и совершенствования систем управления дизелей, *Известия ВУЗов: Машиностроение* 5–6: 76–87.

THE PROBLEMS OF REDUCING EXHAUST GAS EMISSIONS FROM SHIPS

I. Panasiuk

Abstract

The article analyzes the environmental impact of shipping and air pollution caused by ships. The paper presents the development of regulations on air pollution caused by ships and describes the efficiency of methods for reducing emissions.

Keywords: MARPOL 73/78, internal combustion engine (ICE), emissions from ships.