

KLAIPĖDOS UNIVERSITETAS

Jūros technologijų ir gamtos mokslų fakultetas

Inžinerijos katedra

Jevgenij Murašov

SUSKYSTINTŲJŲ GAMTINIŲ DUJŲ SENĖJIMO PROCESO

TYRIMAS AB „KN“

Naftos ir dujų technologinių procesų studijų programos

Magistro baigiamasis darbas

Darbo vadovė

Prof. dr. Tatjana Paulauskienė

Klaipėda, 2020

Klaipėdos universitetas

Jūros technologijų ir gamtos mokslų fakultetas

Inžinerijos katedra

Naftos ir dujų technologinių procesų studijų programos magistro baigiamasis darbas

SUSKYSTINTŲJŲ GAMTINIŲ DUJŲ SENĖJIMO PROCESO TYRIMAS AB „KN“

Autorius: Jevgenij Murašov

Darbo vadovė: prof. dr. Tatjana Paulauskienė

ANOTACIJA

Suskystintosios gamtinės dujos yra ateinančio dešimtmečio kuras. Dėl fizikinių bei cheminių savybių jas galima saugiai ir efektyviai transportuoti dideliais atstumais į vietas, kur nėra tiekimo dujotiekio. Didesnis SkGD išskiriamos energijos tankis ir žemos gamtinių dujų tiekimo sąnaudos, lyginant su nafta, gali tapti lemiančiu veiksniu, pasirenkant ekonomišką alternatyvą dyzelinui daugelyje elektros energijos, šildymo ir transporto priemonių. Be to, naudojant SkGD, palyginti su kuru naftos pagrindu, gali sumažėti oro teršalų ir šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimas. 2018–2023 m. bus pradėta eksploatuoti daugiau kaip šimtas milijardų kubinių metrų naujų SkGD tiekimo pajėgumo. Europa tampa viena didžiausių dujų importuotojų, transportuojančių dujas dviem būdais: magistraliniais vamzdynais arba dujas suskystintos fazės, pakartotinai išdujinant SkGD importo terminaluose.

Šiame darbe yra išanalizuojami AB „Klaipėdos nafta“ SkGD importo terminalo technologiniai procesai, SkGD senėjimo procesui įtakos turintys veiksniai ir nugaravusių dujų valdymo ypatumai, kad galima būtų pateikti tolesnes praktines rekomendacijas SkGD senėjimo proceso ir nugaravusių dujų valdymui. Nustatyta, kad SkGD paskirstymo stotyje krovinio senėjimo procesui ir nugaravusių dujų valdymui įtakos turi pradinė krovinio komponentinė sudėtis, laikas, per kurį produktas buvo iškrautas iš talpyklos į autocisternas, ir perpylimas iš vienos talpyklos į kitą. Šilumos nuostoliai technologinėje linijoje ir skirtingas jos ilgis turi įtakos SkGD temperatūrai. Rekomenduojama vengti produkto perpylimo tarp talpyklų operacijų, nes tai lemia minimalų temperatūros nuostolį jo saugojimo metu.

Baigiamąjį darbą sudaro: 63 puslapiai, 1 lentelė, 18 paveikslų, 7 priedai.

Reikšminiai žodžiai: SkGD nugaravusios dujos, SkGD komponentinė sudėtis, metanas, azotas, viršutinis šilumingumas, SkGD senėjimas.

TURINYS

1. LITERATŪROS APŽVALGA.....	5
1.1. Pasaulinės SkGD rinkos 2018 m. apžvalga.....	5
1.2. SkGD tiekimo grandinės analizė.....	8
1.3. SkGD fizikinės ir cheminės sudėties savybės.....	12
1.4. SkGD senėjimo proceso ir nugaravusių dujų valdymas.....	14
1.5. SkGD importo terminalų technologiniai ypatumai.....	16
1.6. SkGD varomų laivų bunkeravimo būdai.....	20
1.7. Bunkeravimo procedūros ypatumai.....	24
2. METODINĖ DALIS.....	28
2.1. Tyrimo objektas.....	28
2.2. AB „KN“ SkGD paskirstymo stoties duomenų analizės metodika.....	30
3. ANALITINĖ DALIS.....	32
IŠVADOS.....	48
LITERATŪRA.....	49
SUMMARY.....	54
P R I E D A I.....	55

IVADAS

Suskystintosios gamtinės dujos (SkGD) pastaraisiais metais vis plačiau naudojamos jūrų transporto sektoriuje, nes degimo proceso metu beveik neišskiria sieros ir kietųjų dalelių ir išskiria apie 90 proc. mažiau azoto oksidų. Anot DNV GL, SkGD varomi laivai gali sumažinti CO₂ emisiją net 15–20 proc. (Facilities for bunkering..., 2016).

Gamtinių dujų skystinimas atliekamas –162 °C temperatūroje. Tokio būvio SkGD užima apie 1:600 gamtinių dujų tūrio, o jų pavertimas skysčiu leidžia gabenti didesnius krovinio kiekius į bet kokią pasaulio vietą. Manoma, kad SkGD yra ateinančio dešimtmečio ir net ateities degalai. Svarbiausias šių pokyčių variklis yra nauji reikalavimai, kurie paskatino SkGD plėtrą transporto sektoriuje ir infrastruktūros plėtrą uostuose, taip pat ir Klaipėdos jūrų uoste.

Prognozuojama, kad SkGD kaina neabejotinai bus pranašesnė už mažai sieros turintį dyzeliną (angl. *Low-sulfur diesel*). Dėl to, kad SkGD yra efektyvesnė energijos rūšis, teikianti 50 GJ energijos metrinei tonai, palyginti su HSFO kuru (angl. *High-sulphur fuel oil*), kuris naudojamas daugiausia laivybos srityje ir teikia 40,5 GJ energijos metrinei tonai.

Anot laivybos įstatymo naujienų portalas, SkGD tampa ekonomiškiau ir tvaresniu kuro pasirinkimu tiek jūros, tiek sausumos transportui (IMO sulfur limits..., 2019). Tačiau SkGD transportavimo ir saugojimo metu dėl šilumos mainų pradeda garuoti lengvesni SkGD komponentai, tokie kaip azotas ir metanas, kurie vadinami nugaravusiomis dujomis (angl. *Boil-off Gas*, BOG). Garavimas dažniausiai svyruoja nuo 0,1 iki 0,5 procentų per dieną nuo SkGD tūrio talpykloje (IGU: Small Scale..., 2015). Jo metu keičiasi SkGD komponentinė sudėtis ir fizikiniai-cheminiai parametrai (Problem of Boil-off..., 2013), o pats procesas vadinamas SkGD senėjimu (angl. *LNG ageing*) ir yra ypač svarbus, kai SkGD komponentinė sudėtis artėja prie ribinių reikšmių. AB „Klaipėdos nafta“ SkGD paskirstymo stotyje produktas gali būti laikomas iki 60 dienų, todėl jo senėjimo ir nugaravusių dujų valdymas leistų palaikyti reikiamą SkGD komponentinę sudėtį, slėgį ir temperatūrą talpykloje.

Šio darbo tikslas – įvertinti technologinių procesų įtaką suskystintųjų gamtinių dujų senėjimui ir nugaravusių dujų valdymui.

Šio darbo uždaviniai:

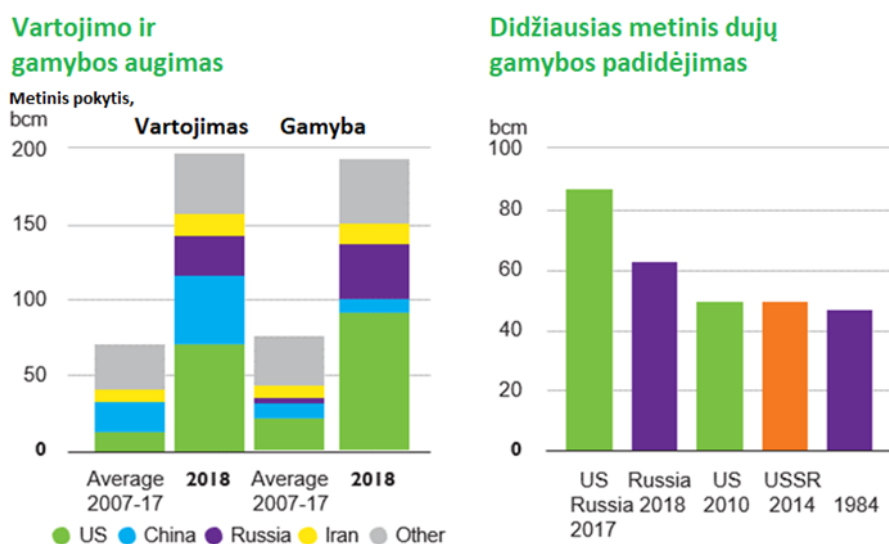
1. Išanalizuoti SkGD importo terminalo technologinius procesus, SkGD senėjimo procesui įtakos turinčius veiksnius ir nugaravusių dujų valdymo ypatumus.
2. Atlikti AB „KN“ SkGD paskirstymo stoties technologinio proceso analizę ir įvertinti technologinių operacijų įtaką SkGD senėjimo procesui ir nugaravusių dujų valdymui.
3. Pateikti praktines rekomendacijas SkGD senėjimo proceso ir nugaravusių dujų valdymui.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Pasaulinės SkGD rinkos 2018 m. apžvalga

Šiame skyriuje bus pristatyti duomenys, kurie atskleidžia fizinius ir rinkos pokyčius SkGD pramonėje visame pasaulyje.

Nustatyta, kad gamtinių dujų suvartojimas 2018 m. padidėjo 195 mlrd. m³, arba 5,3 proc., ir tai yra greičiausi augimo tempai nuo 1984 metų. Dujų vartojimo augimą daugiausia lėmė JAV (78 mlrd. m³), Kinijos (43 mlrd. m³), Rusijos (23 mlrd. m³) ir Irano (16 mlrd. m³) dujų vartojimas (1 pav.) (BP statistical review, 2019).



1 pav. Gamtinių dujų vartojimo ir gamybos pokyčių schema (BP: Statistical review, 2019)

Nors dalis padidėjusių JAV dujų atsargų buvo panaudota trims naujiems JAV SkGD skystinimo įrenginių blokams (angl. *train*), kurie pradėjo veikti 2017 metais, dauguma SkGD buvo naudojami vidaus šalies paklausai tenkinti. JAV dujų suvartojimas padidėjo 78 mlrd. m³ – maždaug tiek pat, kiek per pastaruosius šešerius metus šalyje. Tai siejama su ženkliu meteorologinių sąlygų svyravimu. Didėjant patalpų šildymo ir aušinimo poreikiui, padidėjo ir dujų suvartojimas. Dujų vartojimo didėjimą JAV energetikos sektoriuje dar labiau paskatino beveik 15 gigavatų galios anglimi kūrenamos elektrinės sustabdymas ir gamybos pajėgumų nutraukimas (BP: Statistical review, 2019). Kinijos dujų suvartojimas pernai išaugo stulbinančiai – net 18 proc., lyginant su 2017 metais. Šis augimas susietas su besitęsiančiu aplinkosaugos politikos sudarymu, skatinančiu pramonės objektuose ir gyvenamuosiuose pastatuose anglį pakeisti dujomis.

2018 m. pasaulinis gamtinių dujų suvartojimas padidėjo daugiau nei 5 proc. – tai vienas iš greičiausių dujų paklausos arba produkcijos augimo tempų per pastaruosius 30 metų. JAV SkGD pasaulinės paklausos augimas sudarė 40 proc., o gamybos pajėgumas padidėjo 45 proc.. JAV dujų gamyba padidėjo beveik 12 proc. – 86 mlrd. m³. Iš tikrųjų JAV praėjusiais metais pasiekė unikalų

dvigubą rezultata ir užfiksavo didžiausią visų laikų bet kurios šalies naftos ir dujų gavybos metinį padidėjimą. Pasaulinės dujų gavybos apimties didėjimą lėmė Rusija (34 mlrd. m³), Iranas (19 mlrd. m³) ir Australija (17 mlrd. m³) (BP: Statistical review, 2019).

Pasaulinis SkGD tiekimas ir toliau sparčiai plėtėsi ir padidėjo beveik 10 proc. (37 mlrd. m³), nes Australijoje, JAV ir Rusijoje buvo pradėti statyti nauji ir didinami jau esami skystinimo įrenginiai. Didžiąją metų dalį Azijos dujų paklausa, dominuojant Kinijai, buvo pakankama, kad absorbuotų šias didėjančias atsargas, tačiau dėl mažėjančios dujų paklausos metų pabaigoje Azijos regione kartu su nedideliu SkGD eksporto padidėjimu sumažėjo kainų skirtumas tarp Azijos ir Europos. 2018 m. Europos dujų poreikis sumažėjo šiek tiek daugiau nei 2 proc. (11 mlrd. m³), tai nulėmė ir mažėjantys bei senstantys Europos dujų telkiniai. Nedidelį dujų importo padidėjimą Europoje užtikrino SkGD kroviniai, nukreipti iš Azijos metų pabaigoje. Iš Rusijos gamtinių dujų eksportas magistraliniais vamzdynais į Europą beveik nepakito, išlaikant pastaraisiais metais pasiektą rekordinį lygį.

Pasaulinė prekyba. Penktus metus iš eilės pasaulinė SkGD prekyba siekė rekordą ir 2018 m. pasiekė 316,5 mln. t per metus. Tai reiškia 28,2 mln. t, arba 9,8 proc., padidėjimą lyginant su 2017 m. Augančią prekybą užtikrino padidėję SkGD naujų gamyklų pajėgumai, kurie nuolat auga. Vien Australija laipsniškai didina prekybą (+12,2 mln. t), pritraukdama eksportuotojų ir pradėjusių veikti „Wheatstone LNG“ ir „Ichthys LNG“ projektų. JAV vėl buvo antra pagal SkGD eksporto didinimą (8,2 mln. t), nes „Sabine Pass“ SkGD terminalas veikė ištisus metus ne visu pajėgumu. Terminalas turi penkis visiškai veikiančius skystinimo įrenginius. Šeštasis įrenginys 2019 m. birželio mėn. pasiekė 40 proc. pajėgumą. Be to, pradėtas eksploatuoti naujas „Cove Point“ terminalas (IGU, 2019). Azija lieka didėjančio SkGD vartojimo regionu, nes Kinija papildomai importavo 15,8 mln. tonų. Kitos pagrindinės rinkos, skatinančios SkGD augimą pasaulyje, buvo Pietų Korėja, Indija ir Pakistanas, kurių bendras importas padidėjo 12,8 mln. tonų. Ramiojo vandenyno baseinas ir toliau išlieka didžiausiu SkGD vartojimo regionu, kurio vidaus prekybos srantai pasiekė rekordinį 134,2 mln. t skaičių per 2018 metus (Australijos gavyba ir Kinijos paklausa).

Pasaulinės kainos. 2018 m. SkGD kainos pasaulyje pakilo, o tam įtakos turėjo kylančios naftos kainos ir padidėjusi SkGD paklausa Azijoje (McKinsey, 2018). Kainos nesikeitė pavasario ir vasaros mėnesiais, tačiau dėl gana šaltos žiemos pradžios ir aktyvaus Kinijos SkGD importo jos padidėjo. Šiaurės ir Rytų Azijoje SkGD kainos krito nuo vidutinės 9,88 USD/MMBtu 2018 m. sausio mėnesį iki žemiausios 7,20 USD/MMBtu gegužės mėnesį. Taigi kaina buvo 36 proc. didesnė nei 2017 m. gegužės mėnesį. Išaugusi pasiūla lėmė kainų mažėjimą. Nuo 2018 m. lapkričio mėn. iki 2019 m. sausio mėn. vidutinė Šiaurės ir Rytų Azijos SkGD kaina krito 18 proc. ir pasiekė 9,36 USD/MMBtu. Europos SkGD kainos didžiąją metų dalį didėjo, o mažėti pradėjo ketvirtąjį metų ketvirtį dėl papildomų dujų atsiradimo rinkoje. Pasiekusi 9,54 USD/MMBtu viršūnę (daugiau nei 50 proc.

aukštesnė nei ankstesnių metų lygio), Jungtinės Karalystės virtuali gamtinių dujų pirkimo ir pardavimo bei kainų nustatymo ir pristatymo vieta (angl. *The National Balancing Point*, NBP) pradėjo mažinti kainas nuo spalio ir iki 2019 m. sausio mėn. pasiekė 7,44 USD/MMBtu.

2019 m. startuoja naujos dujų skystinimo gamyklos, taigi dujų kaina gali dar sumažėti, ypač tradicinio sezoninio paklausos augimo metu pavasario ir vasaros mėnesiais.

Skystinimo gamyklos. Pasaulinis skystinimo pajėgumas išlieka plėtros etape, kuris prasidėjo 2016 m. Infrastruktūros plėtra daugiausia augo dėl padidėjusių pajėgumų Australijoje, JAV ir Rusijoje. Nuo 2018 m. sausio mėn. iki 2019 m. vasario mėn. SkGD buvo papildomai pagaminta 36,2 (MTPA) mln. t per metus.

Pirmoji plaukiojančiojo tipo skystinimo gamykla buvo „Hilli Episeyo“ FLNG laivas, kuris retrofitingo būdu buvo pertvarkytas iš 1975 m. pastatyto „Moss“ SkGD dujovežio, kurio talpa buvo 125 000 m³. „Hilli Episeyo“ FLNG laivas gali suskystinti maždaug 2,4 mln. t SkGD per metus. Pirmosios suskystintosios gamtinės dujos buvo pagamintos iš „Perenco Sanagos“ telkinio 2018 m. 2018 m. didžiausią skystinimo pajėgumą išvystė Rusijos rinka, kuri, vykdydama „Yamal LNG T1-2“ projektą, pasiekė 11 (MTPA) mln. t per metus. „Yamal LNG T3“ projektas savo komercinių operacijų pajėgumą pasiekė 2019 m. vasario mėn. (IGU, 2019).

Po Rusijos didžiausias skystinimo augimas buvo stebimas Australijoje, kur du įrenginių blokai „Wheatstone LNG“ pradėjo komercines operacijas 2018 m. 2019 m. birželio mėn. ji pasiekė svarbų etapą, pristatydama savo pirmuosius suskystintųjų gamtinių dujų krovinius klientams Azijoje. Jos esamas pajėgumas – 5,3 mln. t per metus skysčių (MTPA), iš kurių 3,6 MTPA sudaro SkGD.

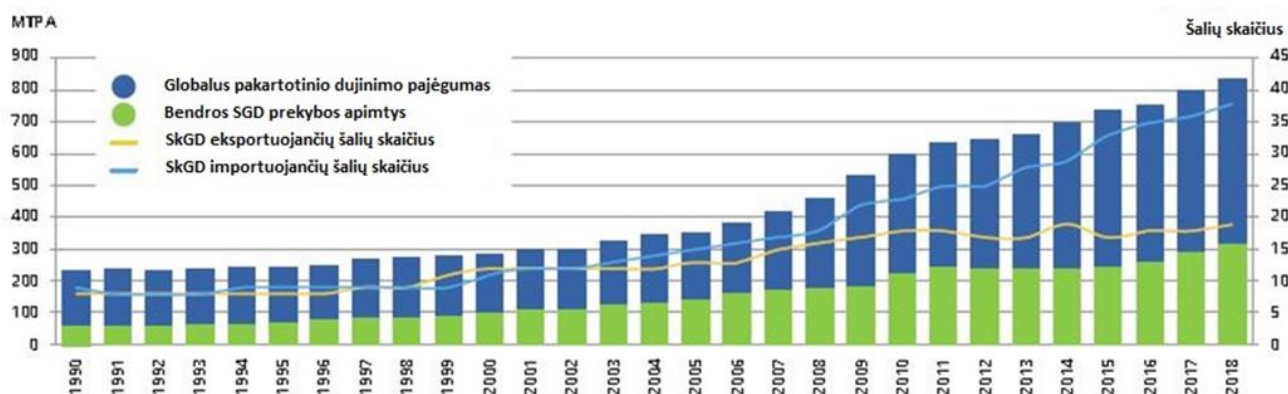
Paskutiniai Australijos projektai „Ichthys LNG“ ir „Prelude FLNG“ bus pasiekę savo maksimalius pajėgumus (12,5 MTPA). Iš „Ichthys LNG“ tikimasi, kad bus pagaminta 8,9 mln. t SkGD gamybos piko laikotarpiu, tačiau piko dar nebuvo.

Vis dėlto JAV yra pasirengusios pranokti Rusiją ir Australiją savo skystinimo pajėgumais, nes paskelbta, kad per 2019 m. bus pasiekta daugiau nei 29 (MTPA) mln. t per metus.

Laivynas. Pasaulinį SkGD laivyną 2018 m. pabaigoje sudarė 525 laivai, įskaitant įprastinius ir FSRU (angl. *Floating Storage and Regasification Unit*) veikiančius laivus bei plūduriuojančiąsias saugyklas. Jis 2018 m. išaugo 11,5 proc., nes buvo pradėti eksploatuoti 53 nauji SkGD laivai, įskaitant keturis FSRU.

Nauji skystinimo pasiūlymai. Nuo 2019 m. vasario mėn., bendras siūlomų projektų pajėgumas pasiekė 845 (MTPA) mln. t per metus, realizuojant naujus projektus JAV ir Kanadoje. Svarbu pabrėžti, kad šiose šalyse yra didžiausi išteklių kiekiai.

Išdujinimo terminalai. Pasaulinio pakartotinio išdujinimo pajėgumas toliau didėjo ir 2019 m. vasario mėn. jau siekė 824 (MTPA) mln. t per metus. Lyginant su praėjusių metų statistika, pakartotinis išdujinimas sparčiai auga (2 pav.).



2 pav. SkGD prekybos apimtys, 1990–2018 m. (IGU, 2019)

Didžiąją pasaulinio pakartotinio išdujinimo dalį vykdo Kinija (10,6 MTPA). Panamoje ir Bangladeše 2018 m. buvo pastatyti du pakartotinio išdujinimo terminalai, padidinę jų skaičių pasaulinėje SkGD rinkoje iki 362. Kartu su sparčiu skystinimo pajėgumo didėjimu, kurio tikimasi dešimtmečio pabaigoje, siekiama sukurti papildomų pakartotinio išdujinimo terminalų. Projektai bus įgyvendinami tiek jau egzistuojančiose rinkose, kuriose dujų poreikis didėja, tiek naujose, kur vyriausybės prioritetą teikia besivystančiai dujų vartojimo paklausai. Nuo 2019 m. vasario mėn. bus statomi papildomi terminalai, galintys išdujinti 129,7 MTPA. Tai apima kelių naujų rinkų, tokių kaip Bahreinas, Filipinai, Rusija (Kaliningradas) ir Gana, pajėgumą.

Plaukiojančiosios saugyklos ir išdujinimo įrenginiai. Nepaisant dviejų jūrinių projektų pradžios 2018 m., bendras pakartotinio išdujinimo pajėgumas veikiančiuose jūrų terminaluose sumažėjo iki 80,1 MTPA. Taip nutiko dėl keturių FSRU uždarymo esamuose jūrų terminaluose Brazilijoje, Egipte, Jungtiniuose Arabų Emyratuose ir Argentinoje (bendras pajėgumas 16,6 MTPA). Dviejų FSRU tipo laivų frachtavimas taip pat baigėsi Kuveite ir Tiandzine Kinijoje. Tačiau Kuveite buvusio terminalo vietoje bus priimamas pakaitinis laivas, o Tiandzine – įrengtas naujas didesnio pajėgumo FSRU laivas. Iki 2019 m. vasario mėn. buvo statoma dvylika naujų jūrinių SkGD terminalų. Šie terminalai yra pasiskirstę tarp naujų rinkų, tokių kaip Gana ir Rusija (Kaliningradas), ir labiau subrendusių rinkų, tokių kaip Indija ir Brazilija. Nuo 2019 m. vasario mėn. dvylika FSRU (įskaitant pertvarkymus) buvo užregistruoti laivų statyklų užsakymų sąrašuose.

1.2. SkGD tiekimo grandinės analizė

Gamtinės dujos daugiau kaip du dešimtmečius išliko sparčiausiai augančių energijos šaltiniu daugelyje pasaulio regionų. Tai lemia mažą šiltnamio efektą sukeliančių dujų išmetimą ir didelės

energijos konversijos efektyvumą (Global LNG fundamentals, 2018). Beveik šimtmetį gamtinės dujos buvo saugiai, patikimai ir ekonomiškai tiekiamos vamzdynais. Įrodyta, kad vamzdynai idealiai tiko XX a. tiekimo ir rinkos sąlygomis, kai prieinamose vietose būdavo randami dideli gamtinių dujų klodai. Vamzdynai užtikrino tiekimo stabilumą bei saugumą ir tai daro toliau (Study on the..., 2017), tačiau per pastaruosius dešimtmečius tapo aišku, kad dideli nauji dujų atsargų kiekiai nėra taip patogiai išdėstyti. Dėmesys nukrypo į nutolusius didelius dujų telkinius, kurie, kaip buvo manoma anksčiau, buvo per toli arba techniškai sunkiai pasiekiami ir per brangūs siekiant juos plėtoti. Šiuo metu vis dažniau svarstoma apie tokių telkinių komercializavimo galimybę. Kita vertus, per pastaruosius tris dešimtmečius tik suskystintųjų gamtinių dujų (SkGD) naudojimas įgalino į dujų rinką įtraukti didelius atokus dujų telkinius, kurie vamzdynais nepasiekiami (pvz., Japonija, Pietų Korėja). Šiandien vis didėjantis SkGD tiekimas prisideda prie konkurencijos dujų rinkoje skatinimo ir energijos tiekimo saugumo bei geopolitinių pasaulinio dujų tiekimo suvaržymų mažinimo.



3 pav. SkGD tiekimo grandinės schema (GIIGNL, 2019)

Pagrindiniai SkGD tiekimo grandinės komponentai yra šie (3 pav.):

1. **Gavybos** etapas apima gamtinių dujų suradimą, gavybą ir perdirbimą.
2. **Skystinimas** apima gamtinių dujų pavertimą skysčiu, kad jas būtų galima gabenti dideliais atstumais laivais arba autocisternomis.
3. **Transportavimas** apima SkGD gabenimą specialios paskirties laivais.
4. **Saugojimo etapas** apima gamtinių dujų saugojimą prieš tiekiant vartotojams.
5. **Išdujinimo etapas** apima SkGD pavertimą dujine faze, naudojant specialią išdujinimo įrangą.
6. **Paskirstymas ir tiekimas** apima gamtinių dujų tiekimą magistraliniais vamzdynais ir paskirstymą galutiniams vartotojams.

Aptarsime gamtinių dujų tiekimo grandinės etapus išsamiau.

Gavyba (angl. *extraction*). Kai geologai ir geofizikai tyrinėtojai aptinka potencialų gamtinių dujų lauką, specialistų komanda atlieka gręžimo darbus iki gamtinių dujų klodo. Išgręžus gręžinį, sužinoma, ar komerciniu požiūriu dujų gavyba bus naudinga, jei taip, pradedamas gamtinių dujų

išgavimo procesas. Išgautos gamtinės dujos vadinamos žaliavinėmis (angl. *feed*) dujomis. Prieš susikuriant SkGD rinkai, naftą lydincios dujos buvo deginamos, dabar jos gali būti surenkamos ir suskystinus transportuojamos dideliais atstumais. Svarbu pabrėžti, kad žaliavinės dujos turi būti valomos ir paruošiamos toliau naudoti. Gamtinės dujos, kurios tiekiamos vartotojams, susideda beveik vien iš metano, nors gręžinio dujų sudėtyje yra įvairių priemaišų, pavyzdžiui, etanas, propanas, butanas, pentanas, vandenilio sulfidas (H₂S), anglies dioksidas (CO₂), helis, azotas ir vanduo, kurie SkGD gamybos proceso metu turi būti pašalinami (GIIGNL, 2019).

Skystinimas (angl. *liquefaction*). Pašalinus didžiąją dalį priemaišų ir sunkiųjų angliavandenilių iš žaliavinių dujų, jos tiekiamos į skystinimo įrenginius, kuriuose temperatūra siekia –162 °C (–256 °F). Tuomet SkGD tampa skaidriu ir bespalviu kaip vanduo skysčiu, bet sveria maždaug pusę tiek kiek vanduo (Linde: LNG technology, 2018). Vienas tūris SkGD atitinka maždaug 600 tūrių gamtinių dujų standartinėje temperatūroje (15,6 °C/60 °F) esant atmosferos slėgiui. Kitaip tariant, skystoji forma užima 600 kartų mažesnę tūrį nei tas pats gamtinių dujų kiekis. Būtent ši savybė SkGD daro ekonomiškai patrauklią prekę transportuoti dideliais atstumais ir kiekiais laivais arba sunkvežimiais.

Transportavimas (angl. *transportation*). Trečiasis SkGD tiekimo grandinės etapas yra suskystintųjų gamtinių dujų transportavimas galutiniam vartotojui. Pirminiai transportavimo būdai galimi jūriniais laivais ir sunkvežimiais (LNG operations..., 2015), o keliose pasaulio vietose ir geležinkeliu (Japonija).

SkGD laivai, pagal Tarptautinės jūrų organizacijos (*International Maritime Organization*, IMO) reglamentą, turi turėti dvigubą korpusą, kad būtų užtikrintas saugus krovinių gabenimas jūra. SkGD importo ir pakartotinio išdujinimo terminaluose SkGD laikomos ir saugomos, prieš pakartotinai jas dujinant ir / arba tiekiant vartotojui.

Tarptautinė jūrų organizacija (IMO) yra Jungtinių Tautų agentūra, atsakinga už tarptautinių sutarčių (vadinamųjų konvencijų) priėmimą ir atnaujinimą dėl laivybos saugos ir saugumo. IMO priėmė maždaug 40 konvencijų ir protokolų, įskaitant Tarptautinį laivų, vežančių suskystintąsias gamtines dujas, statybą ir įrangą (IMO Gas Code), ir Tarptautinį pavojingų krovinių gabenimo jūra kodeksą (angl. *International Maritime Dangerous Goods Code*, IMDG).

SkGD transportavimas jūros keliais, naudojant specializuotus laivus. Kai SkGD turi būti transportuojamos dideliu atstumu, dažniausiai jūra, krovinyms gabenamas specializuotais SkGD dujovežiais. Pirmasis „M/V Methane Pioneer“ tokio tipo laivo reisas 1959 m. vyko iš Leik Čarlso (Lake Charles, Luiziana) į Kanvi Ailandą (Canvey Island, Jungtinė Karalystė). Komerciniai „M/V Methane Progress“ ir „M/V Princess“ reisai prasidėjo 1964 m. ir vyko maršrutu iš Alžyro į Kanvi Ailandą. Nuo to laiko daugiau nei 45 000 reisų baigėsi be incidentų, ir krovinyms saugiai

pasiekdavo galutinį tašką. Šiandien SkGD gabenamos dvigubo korpuso laivuose, specialiai suprojektuotuose pakrauti krovinių esant atmosferiniam slėgiui ir kriogeninei temperatūrai.

SkGD laivai – tai tradicinių laivų konstrukcijos ir specializuotų kriogeninių medžiagų bei kitų sistemų derinys (Transportation of Liquefied..., 1977). Krovinių saugojimo rezervuarai turi izoliacijos sluoksnius, kurie izoluoja SkGD nuo aplinkos, kad jos nesusiltų ir neišsiliėtų užplaukus ant sekumos ar susidūrus su kitu laivu. Daugelyje SkGD tipo laivų nugaravusios dujos (angl. *Boil-off Gas*, BOG) reiso metu naudojamos kaip laivo kuras. Nugaravusių dujų (BOG) atsiranda, kai SkGD sušyla ir garų slėgis talpykloje padidėja (LNG fundamentals, 2014).

Šiuo metu pasaulyje eksploatuojama apie 300 SkGD laivų, kurių daugelis gali vežti 120 000–175 000 m³ SkGD. Tuo tarpu naujų laivų statyba padidino SkGD laivų krovos pajėgumą iki 267 000 m³. SkGD laivų kaina šiandien svyruoja nuo 225 iki 250 milijonų JAV dolerių už 135 000 m³ talpos laivą iki maždaug 300 milijonų JAV dolerių už didesnės talpos laivą.

SkGD transportavimas sausumos keliais naudojant specialius sunkvežimius – autocisternas. Naudojant specializuotas dvisienes vakuuminio būdu izoliuotas nerūdijančio plieno talpyklas sunkvežimiuose, suskystintąsias gamtines dujas galima greitai ir efektyviai transportuoti galutiniam vartotojui. Nuo 1968 m. daugelyje pasaulio šalių buvo pradėtos naudoti autocisternos SkGD transportuoti ir kroviniams gabenti. Šiuo metu SkGD krovinių gabenimas yra išsivysčiusi sritis, dažniausiai naudojanti 6–20 t autocisternas (GIIGNL, 2019).

SkGD importo ir išdujinimo terminalai (angl. *LNG Receiving and Regasification Terminals*). Ketvirtasis SkGD proceso grandinės etapas apima importo terminalus. Šiuo metu pasaulyje veikia apie 63 didelės apimties SkGD importo terminalai. Didžiausi SkGD importuotojai yra Japonija, Pietų Korėja, Taivanas ir Indija Azijos žemyne, JAV, Meksika, Brazilija, Argentina ir Čilė Amerikoje ir keletas Europos šalių, tokių kaip Belgija, Prancūzija, Jungtinė Karalystė, Portugalija, Italija ir Ispanija. Suskystintosios gamtinės dujos yra laikomos kriogeninėse talpyklose, kurios gali išlaikyti –160 °C temperatūrą, kad palaikytų dujas skystos būsenos. Rezervuarų išorinės sienos yra pagamintos iš sustiprinto gelžbetonio. Nepaisant aukštos kokybės izoliacijos, SkGD rezervuaruose vyksta šilumos mainai su aplinka, o tai sukelia nedidelį produkto garavimą. Susidariusios dujos surenkamos ir vėl tiekiamos į SkGD srautą, naudojant kompresorius ir kondensavimo sistemas. Taip nesudaro galimybės prarasti dalį gamtinių dujų ir joms patekti į aplinką. Tik techninės priežiūros laikotarpiais nugaravusios dujos nebegali būti surenkamos, todėl yra deginamos.

Metaną geriau sudeginti, nei išleisti į atmosferą, siekiant nedidinti šiltnamio efekto (Methane Emissions: from..., 2017). BOG valdymas taip pat apima pakartotinį nugaravusių dujų skystinimą ir tiekimą dujinėms elektrinėms. Kiekvienoje talpykloje yra instaliuoti giluminiai siurbliai, kurie tiekia dujas į išdujinimo įrangą arba SkGD vartotojams.

SkGD taip pat gali būti tiekiamos į atviroje jūroje esančius terminalus, vadinamuosius SkGD plaukiojančiuosius saugojimo ir išdujinimo įrenginius (angl. *Floating Storage and Regasification Unit*, FSRU). Plaukiojančiosios priemonės leidžia įrengti SkGD terminalus jūroje, kas palengvina jų eksploatavimą.

1.3. SkGD fizikinės ir cheminės sudėties savybės

SkGD yra bekvapis, bespalvis, ne korozinis, nedegus ir netoksiškas skystis (Basic properties of..., 2019). Gamtinės dujos suskystinamos $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūroje, prieš pasiekiant galutinį vartotoją išdujinamos ir atverčiamos į pirminę būseną. Gamtinės dujos, kurias naudojame namuose, turi kvapą, nes į gamtines dujas, prieš jas tiekiant į paskirstymo tinklą, dedama kvapiųjų medžiagų. Šis kvapas leidžia lengviau nustatyti dujų nuotėkį (Natural gas odorization, 2010).

Pagrindinės SkGD fizikinės ir cheminės savybės:

- cheminė sudėtis;
- virimo taškas;
- tankis ir savitasis svoris;
- degumas;
- savaiminio užsiliepsnojimo temperatūra;
- viršutinis šilumingumas;
- *Wobbe* indeksas;
- metano skaičius.

SkGD komponentinė sudėtis. SkGD yra angliavandenilių mišinys, sudarytas daugiausia iš metano – CH_4 , kurio vertė turi būti ≥ 90 (Gamtinių dujų kokybės..., 2013) ir kuriame papildomai gali būti nedidelis kiekis etano, propano, butano, azoto ar kitų komponentų, paprastai esančių gamtinėse dujose (Basic properties of..., 2019).

Žemiau pateiktoje lentelėje pateikti riebių ir sausų dujų komponentinės sudėties standartiniai parametrai, kurie rodo ribą tarp riebių / sausų ir įprastų dujų.

1 lentelė. SkGD komponentinė sudėtis (Accurate determination of LNG quality unloaded in Receiving Terminals: An Innovative Approach)

	Riebios dujos, %	Sausos dujos, %	Įprastos dujos, %
Metanas, mol %	87,0	98,0	92,0
Etanas, mol %	9,5	1,4	6,0
Propanas, mol %	2,5	0,4	1,0
Butanas, mol %	0,5	0,1	0
Azotas, mol %	0,5	0,1	1

Virimo taškas. Tai yra viena reikšmingiausių savybių, nes rodo, kada dujos tampa skysčiu. Virimo taškas apibrėžiamas kaip „temperatūra, kurioje skystis verda“, arba temperatūra, kurioje esant atmosferos slėgiui jis pereina iš dujinės į skystąją fazę (GIINGL, 2017). SkGD virimo temperatūra priklauso nuo dujų komponentinės sudėties, tačiau dažniausiai siekia $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kai šaltos SkGD liečiasi su šiltesniu oru, vandeniu ar aplinka, jos pradeda intensyviai garuoti, nes aplinkos temperatūra yra aukštesnė nei SkGD virimo taškas. Tuo tarpu SkGD skystinimo proceso metu dujų tūris sumažėja 600 kartų. Suskystintosios gamtinės dujos vėl paverčiamos į dujinę fazę ir paskirstomos galutiniams vartotojams.

SkGD tankis ir savitasis svoris. SkGD tankis yra absoliutus dydis, rodantis medžiagos masę tūrio vienetu. Skirtingų telkinių SkGD komponentinė sudėtis nevienoda, todėl SkGD tankis skiriasi dėl jų sudėties ir gali svyruoti nuo 430 iki $470\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (LNG Fundamentals, 2014). Taigi SkGD tankis yra dvigubai mažesnis už vandens tankį $997\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, todėl suskystintosios gamtinės dujos bus virš vandens joms išsiliejus. Savitasis svoris yra santykinis dydis. Savitasis skysčio svoris yra SkGD skysčio tankio ir vandens tankio santykis esant $15,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūrai. Savitasis dujų svoris yra tų dujų tankio ir oro tankio esant $15,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ santykis. Visos dujos, kurių savitasis svoris yra mažesnis nei $1,0$, yra lengvesnės už orą (plūduriuojančios). Kai savitasis svoris ar santykinis tankis yra gerokai mažesnis už oro, dujos lengvai pasiskirsto atvirose arba gerai vėdinamose vietose. Visos dujos, kurių savitasis svoris yra didesnis nei $1,0$, yra sunkesnės už orą (neigiamai plūstančios). Savitasis metano svoris aplinkos temperatūroje yra $0,554$, todėl jis lengvesnis už orą ir yra plūdrus. Aplinkos sąlygomis SkGD tampa garais, nes žemėje nėra vietos, kurios temperatūra būtų $-162\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kai SkGD išgaruoja, šaltos dujos kondensuoja drėgmę ore, dažnai sukeldamos baltų garų debesį, kol dujos sušyla, pasklinda ir išsisklaido.

Degumas. Tai yra savybė, dėl kurios gamtinės dujos yra pageidautinos kaip energijos šaltinis, tačiau dėl tos pačios priežasties degumas gali kelti pavojų aplinkos ir darbo saugai (GIINGL, 2019). Labai svarbu aiškiai apibrėžti: gamtinės dujos yra degios, bet skysta gamtinių dujų forma nėra degi dėl to, kad skystyje trūksta deguonies. Kadangi suskystintosios gamtinės dujos pradeda garuoti iškart išleidus iš talpyklos, svarbu žinoti, kada ir kiek laiko garai bus degūs. Metano apatinė degumo riba (angl. *Lower Flammable Limit*, LFL) yra 5 proc., o viršutinė degumo riba (angl. *Upper Flammable Limit*, UFL) – 15 proc. tūrio ore. Už šio diapazono ribų metano ir oro mišinys nėra degus.

Savaiminio užsiliepsnojimo temperatūra. Tai žemiausia temperatūra, kuriai esant ore esančios dujos ar garai (pvz., gamtinės dujos) savaime užsidega, nesant kibirkšties ar liepsnos. Ši temperatūra priklauso nuo tokių veiksnių kaip oro ir kuro mišinys bei slėgis. Oro ir kuro mišinys, kur ore yra apie 10 proc. metano, savaiminio užsiliepsnojimo temperatūra yra maždaug $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ ($1\ 000\text{ }^{\circ}\text{F}$) (GIINGL, 2019). SkGD užsiliepsnojimo temperatūra yra labai aukšta, dujos greitai dega

ir yra geresnis šilumos šaltinis nei kiti degalai, pvz., benzinas. SkGD metano liepsnos temperatūra yra 1330 °C. Palyginimui – benzino liepsnos temperatūra yra 1027 °C, tai reiškia, kad SkGD dega karščiau.

Suskystintosios gamtinės dujos dega greitai (maždaug 12,5 m² per minutę) palyginti su benzino degimo greičiu (4 m² per minutę). SkGD deginant išskiria daugiau šilumos, nes jos degimo šiluma yra 50,2 MJ/kg (21 600 Btu/lb) palyginti su benzinu, kurio degimo šiluma yra 43,4 MJ/kg (18 720 Btu/lb). Deginant suskystintąsias gamtines dujas, daugiausiai susidaro anglies dioksido ir vandens garų.

Viršutinis šilumingumas. Tai šiluminės galios matavimas, kuris priklauso nuo dujų sudėties ir nurodo energijos kiekį, išsiskiriantį, kai kubinis metras gamtinių dujų visiškai sudega (ISO 6976).

Wobbe indeksas. Tai yra dujinio kuro pakeičiamumo rodiklis. Šis dydis charakterizuoja gamtinių dujų energetinę vertę. Jis apibrėžiamas kaip aukščiausia šiluminė vertė tūrio pagrindu esant nurodytoms standartinėms sąlygoms, padalyta iš santykinio tankio kvadratinės šaknies tomis pačiomis nurodytomis matavimo atskaitos sąlygomis. (Composition and Physical..., 2018).

Metano skaičius. Tai vienas iš dujų kokybės reikalavimų, kuris rodo degalų tinkamumą norint išvengti variklio bildėjimo. Aukštesnis metano skaičius rodo geresnę dujų kokybę variklių reikalavimo atžvilgiu (Euromot position: Requirements..., 2017).

1.4. SkGD senėjimo proceso ir nugaravusių dujų valdymas

SkGD yra kriogeninis skystis, t. y. žemos temperatūros skystis, kurio virimo temperatūra – 160 °C. Neišvengiama šiluma patenka iš aplinkos ir sušildo SkGD, net jei talpykloje yra didelės izoliacijos sluoksnis bei dvigubos sienos ir t. t. Pakilusi temperatūra reiškia, kad SkGD artėja prie virimo taško ir pradeda garuoti. Šis reiškinys yra žinomas kaip užvirimas ir sutrumpintai vadinamas BOG (angl. *Boil-Off Gas*) – nugaravusios dujos. SkGD sudaro skirtingi komponentai ir su jais susijusi virimo temperatūra. Pirmiausia išgaruoja žemo virimo temperatūros komponentai, tokie kaip azotas ir metanas, sunkesni angliavandeniliai, tokie kaip etanas, propanas ir butanas, išgaruoja vėliau (LNG Blue Corridors..., 2017). SkGD senėjimas (angl. *ageing*), arba nusistovėjimas (angl. *weathering*), yra laipsniškas pradinės skysčio sudėties pasikeitimas per tam tikrą laiką. Šis reiškinys atsiranda dėl šilumos pernešimo iš aplinkos. Skysčio sudėtis keičiasi atsižvelgiant į padidėjusį sunkesnių komponentų kiekį, nes lakieji komponentai skystyje išgaruoja. Senėjimo proceso metu keičiasi tiek SkGD kokybė, tiek savybės. Tai vadinama dujų senėjimu. Todėl bet koks šilumos patekimas į aplinką išgarina SkGD taip, kad nelieka jokių matomų požymių ant paviršiaus. Kad temperatūra būtų pastovi ir tinkama slėgiui talpykloje palaikyti, suskystintosios gamtinės dujos pačios atvėsta, išgaruojant nedidelei jų daliai ir susidarant BOG (nugaravusioms dujoms).

Yra du pagrindiniai nugaravusių dujų (BOG) šaltiniai, kai SkGD saugomos laikymo režimu, t. y. šilumos patekimas į saugyklą ir vamzdžius iš aplinkos ir slėgio pokyčiai. Šilumos patekimas iš aplinkos reiškia, kad talpykloje nuolat susidaro BOG. Norint sumažinti garavimą, talpyklose turi būti daugiasluksnė izoliacija arba tiesiog dvigubas jos sluoksnis su oro tarpu, kuris sumažina šilumos nutekėjimą (Problem of Boil-off..., 2013). Talpyklose gerokai padidėjęs garavimo greitis gali sukelti atmosferos slėgio sumažėjimą. Norint palaikyti žemą slėgį talpykloje, SkGD temperatūra turi mažėti maždaug 0,1 °C kas 0,01 baro kritimo. Tai skatina didesnę garavimą. Atmosferos slėgio kritimas turi poveikį tik tuo atveju, jei jis yra greitas, nes tik tada jis gali gerokai padidinti garavimo kiekį talpykloje. SkGD sugojimo metu talpykloje susidariusios BOG paprastai angliškai vadinamos *tankage BOG*. Kai į SkGD patenka šilumos, garų slėgis talpykloje padidėja. Siekiant išlaikyti talpyklos slėgį saugaus diapazono ribose, kompresoriai turi pašalinti *tankage BOG* (Problem of Boil-off..., 2013). Krovos terminaluose BOG paprastai suspaudžiamos ir eksportuojamos į gamyklos degalų sistemą arba kitas pritaikytas sistemas. Priėmimo terminaluose BOG suspaudžiamos pakartotinio dujinimo įmonėje, kur jas galima suspaustas eksportuoti kaip dujas arba suskystinti ir eksportuoti kaip SkGD dujas. Kraunant ir iškraunant SkGD tanklaivį, paprastai BOG susidaro 8–10 kartų daugiau nei *tankage BOG*. Priežastis – garų grąžinimas iš laivo ar saugyklų. Pagrindiniai BOG šaltiniai laivo pakrovimo / iškrovimo metu yra šie:

Pakrovimo metu sugeneruotos BOG:

- garų grąžinimas iš laivo talpyklų;
- šiluma perduodama krovimo siurbliais į SkGD;
- šilumos nuotėkis į SkGD iš vamzdžių ir įrangos;
- laivo kolektoriaus ir krovos rankovių atšaldymas;
- SkGD sumaišymas su pradiniu SkGD kiekiu;
- laivo talpyklų aušinimas, jeigu būtina.

Iškrovimo proceso metu sugeneruotos BOG:

- garų grąžinimas į laivo talpyklas;
- šiluma, kurią laivo siurbliai perduoda SkGD;
- šilumos nuotėkis į SkGD per vamzdžius ir įrangą;
- didesnis laivo darbinis slėgis nei SkGD talpykloje;
- laivo kolektoriaus ir krovos rankovių atvėsinimas prieš iškraunant;
- krantinės linijų aušinimas prieš iškrovimą, jei būtina;
- nepakrauto SkGD maišymas su esamomis skirtingos kokybės atsargomis.

BOG kiekiui terminale įtakos turi įvairūs veiksniai. Neatliekant iškrovimo, BOG daugiausia atsiranda dėl nuolatinio šilumos nutekėjimo į kriogenines talpyklas ir susijusius recirkuliacijos

vamzdynus, naudojamus SkGD izoliacijai (Modelling of Boil-Off..., 2010). Cirkuliacijos metu per dujotiekius sugerama šiluma patenka su SkGD į talpyklas ir didina BOG išsiskyrimą. Autocisternų pakrovimas ir specifinė SkGD komponentinė sudėtis taip pat turi įtakos BOG kiekiui. Kuo didesnis SkGD išėjimas, tuo labiau sumažėja skysčio lygis SkGD talpykloje. Norint užpildyti SkGD talpyklos tūrį, atitinkamam slėgiui palaikyti reikia didesnio BOG kiekio. Grynasis BOG kiekis mažėja. Šis reiškinys žinomas kaip tūrio poslinkis. Autocisternų pakrovimas sukuria BOG dviem būdais. Be nuolatinio šilumos nutekėjimo į sunkvežimį, įvykus skysčio su skirtingais tankiais mainams tarp SkGD saugyklos ir autocisternos, padidėja BOG. Kai kurie SkGD komponentai, daugiausia metanas ir azotas, taip pat turi įtakos BOG kiekiui. Esant tam tikram šilumos nutekėjimui, jei azoto kiekis yra pastovus, kai yra daugiau metano, susidaro daugiau BOG. Jei metano kiekis yra pastovus, azoto elgsena yra tokia pati. Laivo iškrovimo metu BOG kiekis yra kelis kartus didesnis nei saugant SkGD talpyklose. Šilumos nutekėjimas įvyksta jau laive esančiose talpyklose, krovos rankovėse, vamzdynuose, ir atsiranda šilumos mainai naudojant krovos siurblius. Dalis energijos, kurią gauna krovos siurbliai, gali virsti šiluma. Kai SkGD teka iškrovimo linijoje, statinio slėgio energija virsta šiluma dėl trinties ir atsparumo turbulencijai. Taigi šiluma sušildo suskystintąsias dujas ir susidaro BOG.

SkGD gali būti tiekiamos į talpyklą iš viršaus arba apačios, tai priklauso nuo SkGD tankio iškrovimo metu. Iš viršaus užpildoma, jei SkGD laive yra sunkesnės nei terminale, ir atvirkščiai. Skirtingo tankio SkGD gali gerai susimaišyti automatiškai. Priešingu atveju skystis gali pasiskirstyti sluoksniais, o po tam tikro laiko stratifikacija gali nutrūkti dėl stiprios šiluminės konvekcijos, susidarančios talpyklos dugne, pradeda išsiskirti dideli BOG kiekiai, iki 30 kartų didesni nei įprasta per trumpą laiko tarpą – toks reiškinys vadinamas (angl. *rollover*) (Risk Focus: Safe..., 2019). Norint išvengti tokios situacijos, terminale reikia nuolat stebėti SkGD tankį talpyklose. Jei kraunamų SkGD slėgis yra didesnis ir taikomas talpyklos užpildymas iš viršaus, tikėtina, kad nemažas kiekis SkGD pavirs BOG. Paprastai kuo didesnis kraunamos talpyklos slėgis, tuo mažiau BOG susidaro iškraunant laivą.

1.5. SkGD importo terminalų technologiniai ypatumai

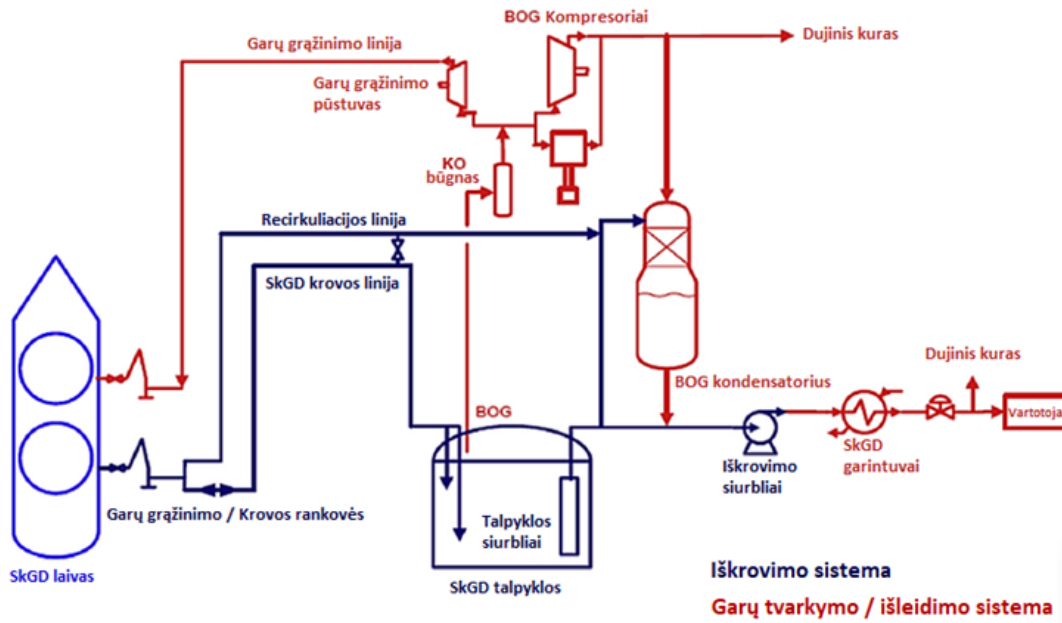
Suskystintųjų gamtinių dujų terminalas yra priėmimo punktas kroviniams iškrauti iš SkGD tanklaivių. Šiuo tikslu pastatyti uostai yra specialiai pritaikyti SkGD eksportui ir importui. Terminaluose yra SkGD iškrovimo ir pakrovimo technologijų įvairovė, vykdomos pakartotinio dujinimo, tankinimo, apskaitos ir kitos operacijos bei procesai.

SkGD importo terminalo schema atvaizduota 5 pav., joje parodyta, kaip suskystintosios gamtinės dujos iškraunamos laivo siurbliais per terminalo krovos rankoves ir kaip per vamzdyną

patenka į saugyklą. Po išdujinimo gamtinės dujos tiekiamos į paskirstymo vamzdynus ir apskaitos tašką, kur jos kvėpinamos ir tiekiamos galutiniam vartotojui arba kitoms energijos gamybos stotims.

SkGD importo terminalo technologinis procesas išsamiau aprašytas toliau.

SkGD importo terminalams dujos tiekiamos daugiausia suskystinta forma, naudojant specialius SkGD dujų tanklaivius. SkGD laikinai saugomos, išdujinamos ir siunčiamos į dujų tinklą. Terminalas gali turėti autocisternų krovos punktą, geležinkelio estakadą ir aptarnauti mažus SkGD dujovežius.



5 pav. SkGD importo terminalo tipinė proceso schema (Handbook of Liquefied Natural Gas, 2014)

Suskystintųjų gamtinių dujų terminale SkGD vėl atverčiamos į dujinę būseną. SkGD importo terminalo veiklą galima suskirstyti į keturis pagrindinius etapus:

1. suskystintųjų gamtinių dujų iškrovimas iš laivų;
2. suskystintųjų gamtinių dujų saugojimas;
3. pakartotinis išdujinimas;
4. tiekimas.

SkGD iškrovimas iš laivų. Suskystintosioms gamtinėms dujoms krauti iš laivų į terminalo talpyklas naudojami specialių tipų vamzdžiai, nes SkGD dujų temperatūra yra labai žema ir siekia – 160 °C. Dujovežis švartuojamas prie iškrovimo krantinės, o perkraunant SkGD naudojamos krantinėje esančios rankovės ir garų grąžinimo sistema bei aušintuvas.

Dujovežių talpa kinta nuo 50 000 m³ iki 266 000 m³ (tai didžiausio SkGD dujų tanklaivio „MOZAH“ (statytas 2008 m.) talpa) („MOZAH“, the world's..., 2008). Daugelio tanklaivių talpa yra 145 000–150 000 m³, o laivų iškrovimo procesas vyksta vidutiniškai 13 valandų.

Standartinių 150 000 m³ talpos dujovežių iškrovimo rankovių skersmuo yra 20 cm, kas leidžia pasiekti maksimalų 12 000 m³·h⁻¹ iškrovimo greitį. Didesnės talpos dujovežiuose, kurių talpa siekia 260 000 m³, o iškrovimo rankovių skersmuo 40 cm, iškrovimo greitis yra 18 000 m³·h⁻¹.

Pakrovimo / iškrovimo rankovės yra naudojamos skystam kroviniui iš dujovežio į terminalą perkrauti. Rankovės yra lanksčios, kad prisitaikytų prie galimo laivo judėjimo dėl nepalankių hidrometeorologinių sąlygų. Kiekvieną rankovę sudaro atrama, suktukas, atsvaros sistema pusiausvyrai palaikyti, šarnyrinių jungčių sistema, hidraulinė pavara, greito sujungimo ir avarinio paleidimo sistema (NIIGATA: Marine Loading..., 2017).

Siekiant nustatyti SkGD tanklaivyje pakrautą arba iškrautą SkGD kiekį, atliekami du matavimai – prieš krovą ir po krovos, matuojant SkGD lygį talpykloje, SkGD temperatūrą, GD temperatūrą, GD slėgį. Pirmas matavimas atliekamas, prijungus rankoves prie laivo, bet prieš pradėdamas jas vėsinti ir atidarinti apsauginius vožtuvus. Antrasis matavimas atliekamas 15–30 minučių po krovos operacijos pradžios. Užbaigus SkGD krovos operaciją, rankovės prapučiamos azotu, siekiant pašalinti SkGD likučius. Avarijos atveju numatytos automatinio išjungimo sistemos (angl. *Emergency Release System*, ERS).

Suskystintųjų gamtinių dujų saugojimas. Suskystintosios gamtinės dujos transportuojamos vamzdynais, jungiančiais krovos rankoves su laivo talpyklomis, saugomos specialiose kriogeninėse talpyklose, kurių dvigubos sienelės skirtos SkGD garavimui ir BOG susidarymui mažinti. SkGD talpyklose yra nerūdijančio plieno vidinis sluoksnis su išoriniu plieno sluoksniu, naudojama labai efektyvi vakuuminės izoliacijos technologija. Tokia konstrukcija lemia didesnę kriogeninių temperatūrų izoliaciją ir ilgesnį suskystintųjų gamtinių dujų temperatūros stabilumą. Nepaisant aukšto izoliacijos technologinio lygio, SkGD po tam tikro laiko pradeda garuoti. Joms surinkti ir grąžinti į sistemą naudojamas kompresorius ir kondensacijos sistema (Gas and LNG..., 2017).

Nugaravusių dujų valdymas. Siekiant kondensuoti SkGD terminaluose susidariusias BOG, naudojamas BOG rekondensatorius. Pakartotinas BOG skystinimas yra atliekamas norint jas grąžinti atgal į suskystintųjų gamtinių dujų saugyklas. Tokia technologija leidžia išvengti nepageidaujamo BOG deginimo importo terminaluose. Šis procesas taip pat užtikrina, kad SkGD komponentinė sudėtis laikui bėgant išliks vienoda, išvengiant SkGD senėjimo proceso.

Nugaravusių dujų valdymo metodai. „Air Liquide Engineering & Construction“ turi dvi patikrintas technologijas, padedančias susigrąžinti BOG, kurios neišvengiamai susidaro tuo metu, kai saugyklose laikomos ypač žemos temperatūros SkGD. Pakartotinio BOG skystinimo technologija remiasi atvirkštinio azoto Braitono ciklu (angl. *Reverse nitrogen Brayton cycle*). Priklausomai nuo esamo BOG slėgio, gali būti naudojamos proceso schemos su vienu ar dviem plėstuvais (angl. *Expanders*). Jie veikia kaip siurbliai, tačiau atvirkščiai. Skystis patenka į aukštesnį slėgį ir išeina esant

žemesniam slėgiui. Vienas iš azoto ciklo naudojimo privalumų – proceso lankstumas, nes BOG srautas bėgant laikui gali ženkliai kisti (Boil-Off Gas Reliquefaction..., 2019).

Antra nugaravusių dujų gražinimo į sistemą technologija – vadinamoji LIN. Jos pagrindas – skysto azoto, kaip aušinimo priemonės, panaudojamas. Lyginant su BOG skystinimo įrenginiu, ši technologija reikalauja mažesnių pradinių investicijų ir yra tinkamesnė vidutinio dydžio SkGD laikymo talpykloms. Paprastai tai yra dažniausiai taikomas sprendimas visoje nedidelės apimties SkGD grandinėje.

Suskystintųjų gamtinių dujų išdujinimo procesas. SkGD importo terminalai skirstomi į dvi kategorijas: pirminiai terminalai, skirti SkGD kroviniams, atgabentiems dideliais SkGD laivais, priimti, ir antriniai terminalai, skirti mažesniems SkGD kroviniams, atgabentiems sunkvežimiais arba bunkeravimo laivais, priimti ir pakartotinai juos išdujinti. Atgabentos dujos laikomos specialiose kriogeninio tipo talpyklose ir pakartotinai išdujinamos, naudojant įvairios konstrukcijos garintuvus. Sausumos suskystintųjų gamtinių dujų importo terminaluose SkGD iškraunamos iš dujovežių į talpyklas, esančias uoste. Vėliau pagal poreikį SkGD pakartotinai išdujinamos ir tiekiamos į dujų sistemą vartotojams.

Išdujinimas (angl. *regasification*) yra procesas, kai SkGD dujos iš skystos būsenos paverčiamos į dujinę būseną. Dažniausiai išdujinimo procese kaip šildymo agentas naudojamas jūros vanduo. Kai kuriuose SkGD terminaluose naudojamos savų energijos sistemų išmetamos dujos. Kiti SkGD terminalai turi povandeninę deginimo įrangą, kuri naudojama SkGD šildyti, siekiant jas konvertuoti į dujinę fazę. Procesu metu kaip kuras naudojamos apie 1,5–2,0 tūr. % gamtinės dujos. Šie garintuvai yra lankstūs ir skirti didžiausiems vartojimo poreikiams tenkinti. Tokie garintuvai vadinami SkGD panardinamaisiais degimo garintuvais (angl. *LNG Submerged Combustion Vaporizers*) (LNG Regasification Terminals..., 2017).

Tiekimas. Kai gamtinės dujos gražinamos į dujinę būseną, prieš nukreipiant galutiniam vartotojui, matuojamas jų kiekis ir komponentinė sudėtis, atliekamas aromatizavimas. Gamtinės dujos yra bekvapės, todėl gamtinių dujų aromatizavimas yra operacija, kurios metu į dujas pridedama kvapiųjų medžiagų, kad dujas būtų lengva aptikti nutekėjimo atveju. Pridedant kvapiųjų medžiagų (tetrahidrotiofeno), negalima pakeisti fizinių ar cheminių gamtinių dujų savybių, išskyrus kvapą (Natural gas odorization, 2010).

Šiame skyriuje buvo apžvelgti įvairūs SkGD terminale vykstantys procesai. SkGD terminalas gali veikti šiek tiek kitaip, atsižvelgiant į konkretaus terminalo reikalavimus ir paskirtį.

1.6. SkGD varomų laivų bunkeravimo būdai

Šiame skyriuje bus aptariami galimi laivų bunkeravimo būdai ir analizuojami SkGD bunkeravimo etapai.

2017 m. SkGD varomų laivų skaičius visame pasaulyje išaugo nuo 118 iki 143, dar 135 užsakyti, o 135 yra statomi pagal individualius užsakymus. SkGD varomų laivų užsakymai apima įvairius laivų tipus, įskaitant tanklaivius, kruizinius ir konteinerinius laivus, automobilių vežėjus bei labai dideles rūdų gabenimo priemones.

Iš 94 kruizinių laivų, įtrauktų į pasaulinę užsakymų knygą 2018 m., 18 buvo varomi SkGD. Tai sudarė 20 proc. visų kruizų pramonei skirtų naujų statinių. Pirmasis pasaulyje kruizinis laivas, naudojantis SkGD, Carnival'o įmonės „AIDAnova“ jau 2018 m. gruodžio mėn. buvo pradėtas eksploatuoti. Planuojama statyti dar septynis kruizinius SkGD varomus laivus, kuriuos „Carnival“ užsakė pastatyti iki 2022 metų.

Dėl nuolat didėjančių SkGD laivų skaičiaus vyksta SkGD bunkeravimo paslaugų ir infrastruktūros plėtra. SkGD bunkeravimas yra technologinė operacija, kai suskystintosios gamtinės dujos iš nurodyto paskirstymo šaltinio yra perduodamos laivui, kuriame jos naudojamos kaip kuras. Vienas pagrindinių SkGD bunkeravimo iššūkių yra sąsajos, sukurtos SkGD gabenimo ir perdavimo metu. Šie iššūkiai gali būti norminio arba techninio pobūdžio.

SkGD bunkeruojamos kriogeninėje temperatūroje, todėl reikia specialios įrangos ir procedūrų. Bet koks personalo kontaktas su degalais gali sukelti stiprų nušalimą. Net ir nedidelio SkGD kiekio išsiliejimas gali sukelti technologinių problemų, nes neapsaugotas konstrukcinis plienas gali skilti.

Kitas svarbus bunkeruojamų dujų aspektas – didėjant SkGD temperatūrai, didėja jų garų slėgis ir mažėja skysčio tankis, o tai gali padidinti reikiamą akumuliacinės talpos tūrį ir slėgį.

SkGD talpyklos užpildymo riba yra didžiausias leistinas skysčio tūris talpykloje, išreikštas procentais nuo visos talpyklos tūrio. Ši riba priklauso nuo suskystintųjų gamtinių dujų tankio, pakrovimo ir etaloninės temperatūros (LNG Bunkering: Technical..., 2015) ir yra nustatoma pagal formulę (1):

$$LL = FL\left(\frac{\rho_R}{\rho_L}\right), \quad (1)$$

čia:

LL – pakrovimo riba, didžiausias leistinas skysčio tūris, kuris gali būti pakrautas į talpyklą, %;

FL – užpildymo riba, pakrauto krovinio tūris talpykloje, %;

ρ_R – santykinis SkGD tankis etaloninėje temperatūroje, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$;

ρ_L – santykinis SkGD tankis pakrovimo temperatūroje, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

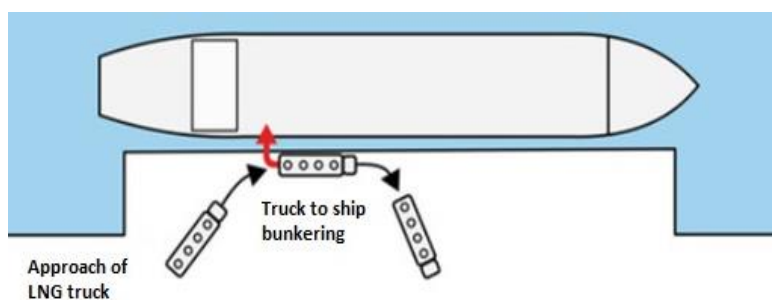
Tuo tarpu maksimali SkGD krovinių cisternų užpildymo riba yra 98 tūr. % standartinėje temperatūroje. Remiantis klasifikacinių bendrovių ir reguliavimo institucijų reikalavimais, kiekvienu

konkrečiu atveju gali būti leidžiama nustatyti aukštesnę užpildymo ribą. Tipinė krovos riba dujas kaip kurą naudojančiam laivui gali svyruoti nuo 85 iki 95 tūr. %, atsižvelgiant į talpyklos tipą, slėgio mažinimo vožtuvo nustatymus ir kitus ypatumus.

Suskystintųjų gamtinių dujų bunkeravimas gali būti atliekamas naudojant šiuos būdus (Prospects and opportunities..., 2017):

1. Iš autocisternos į laivą (angl. *Truck to Ship*, TTS);
2. Iš laivo į laivą (angl. *Ship to Ship*);
3. Iš terminalo į laivą (angl. *Terminal to Ship*, TS);
4. Iš ISO konteinerio į laivą (angl. *ISO container to Ship*).

Laivo bunkeravimo būdas iš autocisternos į laivą. Šis bunkeravimo būdas atliekamas, kai sausumos vartotojams yra gerai prieinamos SkGD saugyklos ir yra gerai išplėtotas ir patikimas greitkelių tinklas (Operation Guidelines for..., 2014). Bunkeravimas galimas to paties uosto skirtingose krantinėse, aptarnaujant laivus atsižvelgus į esamas sąlygas. SkGD sunkvežimis sujungiamas su priimančiuoju laivu krantinėje, naudojant lanksčiąją žarną, paprastai pasitelkus rankinį konsolinį kraną (6 pav.). Šis metodas gali būti taikomas nedideliems bunkeravimo kiekiams – nuo 200 iki 400 m³, o standartinis bunkeravimo greitis, kraunant SkGD iš autocisternos į laivą, siekia 40–60 m³·h⁻¹.



6 pav. Bunkeravimo būdo iš autocisternos į laivą tipinė schema (LNG bunkering operations, Adobe 2019)

Privalumai:

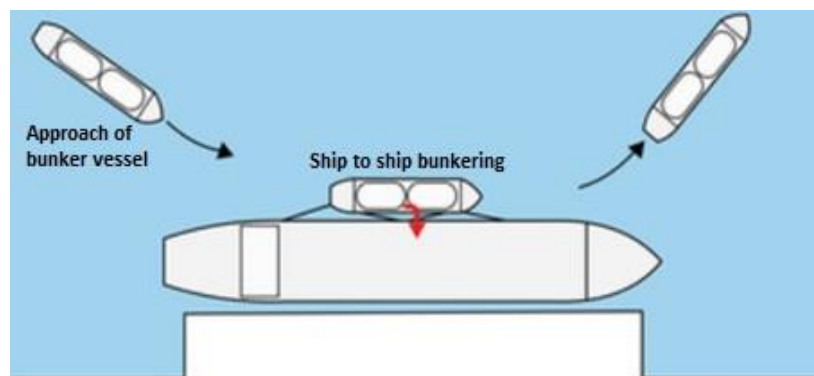
- veiklos lankstumas;
- minimali infrastruktūra;
- galimybė pristatyti reikiamą krovinio kiekį, atsižvelgiant į kliento poreikius ir užsakymo dydį;
- galimybė prisitaikyti prie skirtingų krovos reikalavimų.

Trūkumai:

- ribota sunkvežimių talpa (40–80 m³);

- ribotas SkGD debitas ($900\text{--}1200\text{ L}\cdot\text{h}^{-1}$);
- reikšmingas poveikis kitoms operacijoms, susijusioms su keleiviais ir (arba) kroviniais;
- ribotas judėjimas krantinės pusėje;
- galimi eismo ribojimai (leidimai, fiziniai apribojimai ir pan.).

Laivo bunkeravimo būdas iš laivo į laivą. Šis bunkeravimo būdas yra labiausiai paplitęs ir yra atliekamas, kai siekiama užtikrinti laivo bunkeravimą norimais kiekiais uosto akvatorijoje, prieplaukoje ar atviroje juroje (LNG ship to ship..., 2016). Suskystintosios gamtinės dujos į priimančius laivus atgabenamos bunkeravimo laivu arba barža (7 pav.). Bunkeruojantis laivas švartuojamas kitoje krantinės pusėje arba prie paties laivo, o SkGD tiekimo žarną perduoda bunkeruojantis laivas. Standartinis SkGD krovinio tūris, kuris gali būti pakrautas iš bunkeruojančiojo laivo į priimančiąjį laivą, svyruoja nuo 100 iki 6 500 m³, o bunkeravimo greitis siekia 500–1 000 m³·h⁻¹.



7 pav. Bunkeravimo būdo iš laivo į laivą tipinė schema (LNG bunkering operations, Adobe 2019)

Privalumai:

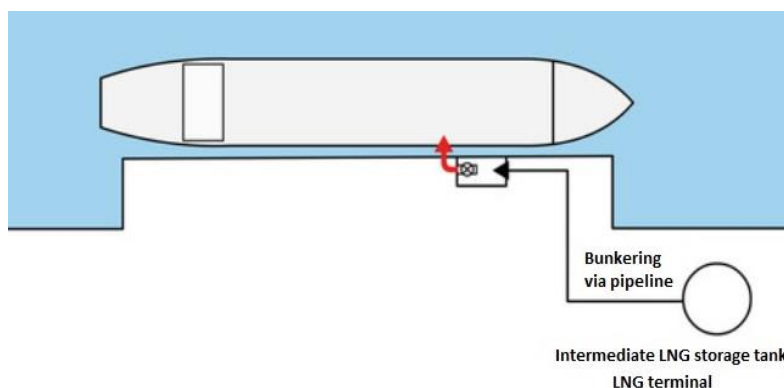
- netrukdo krovinų / keleivių tvarkymo operacijoms;
- geriausias SkGD bunkeravimo variantas, ypač laivams, trumpai apsisiojantiems uoste;
- didesnis SkGD pristatymo pajėgumas;
- lankstumas – bunkeravimas gali vykti greta priimančiojo laivo, inkaravietėje arba terminale.

Trūkumai:

- reikalauja didelių investicijų (SkGD laivo / baržos projektavimas / įsigijimas, statyba ir eksploatavimas);
- ribotas bunkeruojančiojo laivo dydis, turintis įtaką reikiamo krovinio kiekio užsakymams.

Laivo bunkeravimo būdas iš terminalo į laivą. Šis bunkeravimo metodas taikomas, kai SkGD importo terminalas yra uosto teritorijoje. Taikant šį metodą, suskystintosios gamtinės dujos iš

terminalo saugyklos gali būti gabenamos bunkeruoti, uosto ir apylinkių vartotojams. SkGD tiekiamos tiesiai iš mažos SkGD saugyklos, mažos stoties arba iš importo ar eksporto terminalo (8 pav.). Standartinis SkGD krovinio tūris, kuris gali būti pakrautas iš terminalo į laivą. SkGD krovinio tūris, kuris gali būti pakrautas iš terminalo į laivą, siekia 500–20 000 m³, o standartinis bunkeravimo greitis – 1 000 ir 2 000 m³·h⁻¹ (LNG bunkering procedures..., 2015).



8 pav. Bunkeravimo būdo iš terminalo į laivą tipinė schema (LNG bunkering operations, Adobe 2019)

Privalumai:

- galimybė sukaupti ir pristatyti didesnius SkGD kiekius;
- geras pasirinkimas uostams, kurių bunkeravimo paklausa stabili ir ilgalaikė.

Trūkumai:

- sunkiai pasiekiami terminalai laivybos atžvilgiu;
- sunkiau užtikrinti, kad didesnis SkGD eksporto terminalas būtų arti.

Laivo bunkeravimo būdas iš ISO konteinerio į laivą. Šis bunkeravimo metodas taikomas, kai SkGD į priimantįjį laivą pristatomos ISO konteineriujė. Jei priimantysis laivas yra aprūpintas tokio tipo konteinerių prijungimo jungtimis, tai SkGD konteineris gali būti naudojamas kaip laivo kuro aprūpinimo talpykla reiso metu.

Galimi tokie ISO SkGD konteinerių dydžiai:

- 20 pėdų 20,5 m³ talpos konteineris;
- 40 pėdų 43,5 m³ talpos konteineris.

Privalumai:

- bunkeravimo operacijos metu SkGD perduodamos pastoviu srautu be trukdžių dėl išorinių veiksnių;
- patogus išdėstymas laivo denyje užtikrina krovos operacijos saugumą;
- lengvas krovos žarnų prijungimas ir atjungimas;

- lengvesnis transportavimas keliu iki bunkeruojamo laivo arba iškrovos taško, palyginus su kitais būdais.

Trūkumai:

- ribotas SkGD kiekis (1 konteineris – 20–40 m³);
- tinka specializuoto tipo laivams, turintiems ISO kriogeninių konteinerių pajungimo įrangą;
- laivas turi būti aprūpintas SkGD prijungimo sistema.

1.7. Bunkeravimo procedūros ypatumai

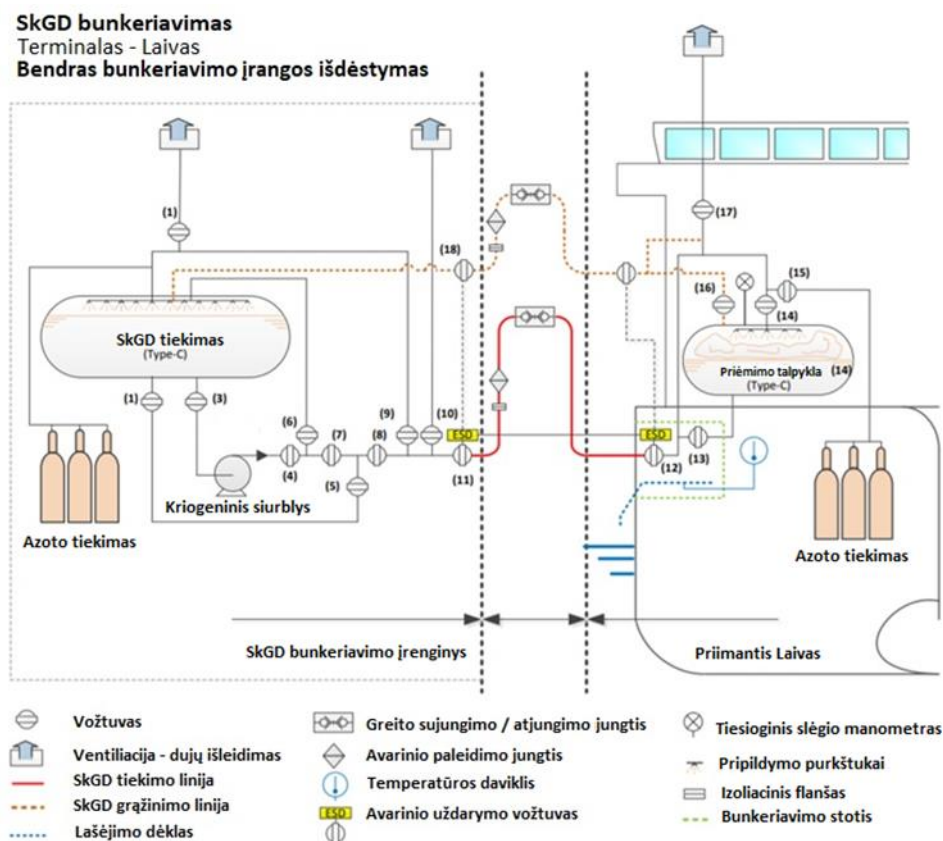
SkGD bunkeravimas yra suskystintųjų gamtinių dujų perkėlimas į laivą. Aplinkos reguliavimo institucijos daro spaudimą jūrų pramonei, kad tarša reiso metu sumažėtų. Naujos griežtos taisyklės dėl išmetamo sieros kiekio skatina tobulinti SkGD bunkeravimo sistemą ir kurti infrastruktūrą.

Iškrovimo įrenginys gali būti terminalas, sunkvežimis arba laivas / barža. Dizainas ir išdėstymas gali skirtis (Guidance on LNG Bunkering..., 2018). Schema (9 pav.) rodo technologinio proceso įrangos išdėstymą. Bunkeravimo operacijos metu gali būti taikomi skirtingi technologiniai sprendimai ir naudojama įranga (jungtys, žarnų ilgiai, talpyklų dydžiai, valdymo mechanizmai ir kt.).

Atsižvelgiant į konkretų projektą, kai kurie šiame skyriuje apibūdinti etapai dėl projekto technologinio proceso suplanavimo gali neįvykti arba būti atlikti kitaip.

Pagrindinis šio skyriaus tikslas – išanalizuoti SkGD bunkeravimo etapus. Bunkeravimo proceso pradžioje visi sistemos vožtuvai uždaromi, kaip parodyta 9 paveiksle. Laivas švartuojamas prie krantinės ir toliau vykdomi žemiau išvardyti technologiniai procesai:

1. Pradinis šaldymas (angl. *Initial Cooling*).
2. Išankstinis kriogeninio siurblio aušinimas (angl. *Initial Cryogenic Pump Precooling*).
3. Bunkeravimo žarnos prijungimas (angl. *Bunker Hose Connection*).
4. Technologinės sistemos prapūtimas inertinėmis dujomis (angl. *Inerting the Connected System*).
5. Technologinės sistemos prapūtimas (angl. *Purging the Connected System*).
6. Krovos operacija (angl. *Filling Sequence*).
7. SkGD tiekimo technologinės sistemos valymas (angl. *Liquid Line Stripping*).
8. Technologinės sistemos prapūtimas pasibaigus krovai (angl. *Final Inerting of Bunkering Lines*).



9 pav. Bendra SkGD bunkeravimo schema (EMSA, Guidance on LNG Bunkering to Port Authorities and Administrations, 2018)

Pradinis šaldymas. Vamzdyno linijos aušinamos iš anksto, prieš pradėdant bet kokią bunkeravimo procedūrą. Sistemą reikia atvėsinti lėtai, kitaip temperatūrų pokytis bunkeravimo metu lems krovinio kokybės pokyčius ir greitesnį garavimą vamzdynuose. Dėl netinkamo aušinimo taip pat gali įtrūkti vamzdžiai. Išankstinio aušinimo seka priklauso nuo siurblio, techninių charakteristikų, talpyklos dydžio ir terminalo konstrukcinių ypatumų. Šaltos SkGD išleidžiamos iš talpyklos apatinės dalies ir lėtai „įstumia“ šiltesnį dujų mišinį vamzdžiuose atgal į talpyklos viršutinę dalį. Šiame etape terminalo ir bunkeruojamo laivo SkGD talpyklos turi būti patikrintos, kad atitiktų reikiamą temperatūrą ir slėgį. Talpykloje temperatūra tiesiogiai koreliuoja su slėgiu. Jei priimančiojo laivo talpykloje temperatūra yra gerokai aukštesnė nei išpylimo temperatūra, perduodant SkGD jos pradeda garuoti. Tai greičiausiai padidins talpyklos slėgį, ir jei slėgis viršys nustatytą ribą, automatiškai atsidarys slėgio nuleidimo vožtuvas. Dėl šios priežasties abiejų talpyklų slėgiai turi būti sumažinti prieš bunkeravimą, jeigu priimančiosios talpyklos temperatūra yra didesnė (EMSA: Guidance on LNG..., 2018). Taip pat svarbu atkreipti dėmesį į tai, kad jei priimančiojoje talpykloje SkGD kiekis yra mažas, šilumos mainai pačioje talpykloje padidėja, krovinyje sparčiau garuoja, dėl to slėgis talpykloje didėja. Norint SkGD perduoti, reikia tam tikro slėgio skirtumo, kuris paprastai nustatomas krovos siurbliu ir pačioje priimančiojoje talpykloje. Kuo didesnis slėgio skirtumas, tuo efektyvesnė krova.

Išankstinis kriogeninio siurblio aušinimas. Fiksuoto greičio krovos siurblys, prieš atliekant krovos darbus, taip pat turi būti iš anksto aušinamas. Krovos darbams, kai slėgio skirtumas tarp iškrovimo ir priėmimo talpyklų yra didesnis nei 2 bar, pirmos talpyklos slėgis bus naudojamas kaip varomoji jėga, tokiu atveju krovos siurblys veiks kaip atsarginis įrenginys.

Bunkeravimo žarnos prijungimas. Krantinė turi būti aprūpinta specialiais iškrovimo įrenginiais (t. y. žarnos kranu) arba rankovėmis, kad bunkerio žarna būtų pristatyta į priimančiąjį laivą. Žarna jungiama prie kolektoriaus. Kiekvienas kolektorius turi būti įžemintas, o priimančiajame laive šalia jungties turi būti įrengta izoliacinė jungė, kad būtų išvengta galimo užsiliepsnojimo šaltinio dėl elektrostatinio kaupimosi krūvio. Įrenginiai sujungiami viena arba dviem lanksčiosiomis žarnos – viena skysčio užpildymo žarna ir viena garų gražinimo žarna (Operation Guidelines for..., 2014). Perduodant mažesnę SkGD kiekį, kai talpyklos užpildymo greitis yra maždaug 50–200 m³·h⁻¹. ir kai priimančioji talpykla yra C tipo rezervuaras su galimybe nuosekliai užpildyti, garų gražinimo žarna paprastai nereikalinga. Kad perdavimo greitis būtų didesnis, gali būti naudojama garų gražinimo linija.

Technologinės sistemos prapūtimas inertinėmis dujomis. Inertinės dujos naudojamos drėgmei ir deguoniui (mažiau kaip 4 proc.) pašalinti iš priimančiosios talpyklos ir susijusių vamzdinių. Inertinimas atliekamas nuosekliu sistemos slėgio kėlimu ir paskui sumažinimu su azoto pagalba. Drėgmė talpyklose ar krovos linijose sudaro hidratus, t. y. ledo gabaliukus, kuriuos sunku pašalinti iš sistemos. Deguonis sistemoje sukuria sprogią atmosferą SkGD perdavimo linijos viduje ir gali sukelti pavojingą situaciją, kurios reikia išvengti mažinant drėgmę ir deguonį (LNG Bunkering: Technical..., 2015).

Technologinės sistemos prapūtimas. Likusi sistema išvaloma gamtinėmis dujomis, kad būtų pašalintas likęs azotas pagal variklio specifikacijas. Turi būti deramai atsižvelgiama į tai, ar per stiebą nepašalinamas metano kiekis. Bet koks reikalingas perteklinio suskystintųjų gamtinių dujų BOG / dujų išleidimas turėtų būti atliekamas naudojant oksidatorių / deginimą arba lygiavertę sistemą. Išvalius vamzdžius, sistemos vožtuvai turėtų būti greitai uždaryti, kad pro ventiliacijos angą neišeitų didesnis metano kiekis.

Krovos operacija. Talpyklos užpildymo būdas gali būti panaudojus tiek apatinį, tiek viršutinį užpildymą (su purškiklių pagalba). Įprasta pradėti nuo viršutinio užpildymo, nes tai sumažina slėgį SkGD talpykloje, o kai pasiekiamas pakankamas slėgis, galima pereiti prie krovos, taikant dugninį užpildymo metodą. Dėl aukšto slėgio priėmimo talpykloje sunkiau perduoti SkGD, o siurblys turės dirbti su didesniu slėgiu ir didesnėmis energijos sąnaudomis. Perdavimo greičio diapazonas būna tarp 100–1 000 m³·h⁻¹., priklausomai nuo scenarijaus, talpyklų, įrangos ir nuo to, koks užpildymas buvo parinktas – dugninis ar viršutinis. Dugninis užpildymas gali užimti daugiau laiko, palyginus su

viršutiniu. Atsižvelgiant į laiką, iš pradžių pageidautina užpildyti talpyklos dugną, būtinai atsižvelgiant į privalomą talpyklos slėgį krovos operacijos metu. Keitimas tarp viršutinio ir apatinio užpildymo bunkeravimo metu taip pat yra įprasta praktika, kontroliuojant slėgį priėmimo talpykloje (Guidance on LNG Bunkering..., 2018). Krovos operacijos metu stebėti abiejų talpyklų techninius parametrus perkraunant SkGD yra privaloma, atsižvelgiant į sistemos slėgį, rezervuaro tūrį ir įrangos elgseną. Ši procedūra turi būti atliekama kiekvienoje talpykloje, nepriklausomai nuo SkGD tipo. Pagal klasės taisykles, didžiausias SkGD rezervuarų užpildymo lygis yra 98 proc. bendrojo tūrio, tačiau paprastai dėl sistemos projektavimo gali būti mažesnis.

SkGD tiekimo technologinės sistemos valymas. Suskystintosios gamtinės dujos, kurios liko bunkeravimo žarnoje ir linijose po krovos siurblio sustabdymo, prieš atjungiant, reikia išvalyti. Ant iškrovimo įrenginio linijos vožtuvai uždaromi, atidaromas vožtuvas, kuris prijungtas prie kuro talpyklos viršuje. Šis procesas sukuria slėgį, kylantį dėl vamzdžiuose ir žarnoje likusio skysčio temperatūros. SkGD likutis grąžinamas į abi talpyklas. Vėliau atidarius atitinkamus vožtuvus, likusios SkGD stumiamos į priimančiojo laivo talpyklą.

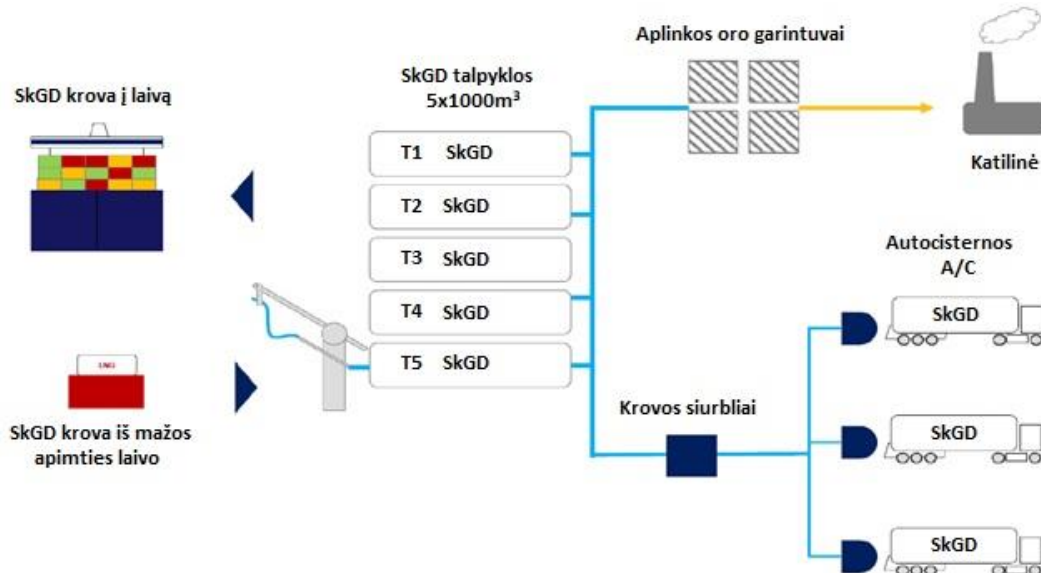
Technologinės sistemos prapūtimas pasibaigus krovai. Visame procese SkGD bunkeravimo linija prieš atjungiant turėtų būti inertinama azoto dujomis eksploatacijos pabaigoje.

2. METODINĖ DALIS

2.1. Tyrimo objektas

Šio darbo tyrimo objektas yra SkGD senėjimo procesas. Analizuojant AB „KN“ paskirstymo stotyje vykstančius technologinius procesus bei dujų komponentinę sudėtį ir savybes, siekiama nustatyti būdus, kaip suvaldyti BOG susidarymą ir SkGD senėjimą.

10 paveiksle pateiktas SkGD paskirstymo stoties veikimo principas.



10 pav. AB „KN“ paskirstymo stoties veikimo principas (KN – an oil product and LNG terminal operator, 2017)

SkGD paskirstymo stotis skirta SkGD iš mažos apimties dujovežių priimti, jas laikinai saugoti bei perkrauti į autocisternas ar SkGD varomus ir / ar bunkeravimo laivus. SkGD gali būti kraunamos ir į ISO reikalavimus atitinkančius standartinio dydžio konteinerius, kurie gali būti gabenami geležinkeliu ir keliais. Į SkGD paskirstymo stotį SkGD gali būti importuojamos iš Klaipėdos SkGD terminalo „Independence“ arba iš kitų terminalų Baltijos ar Šiaurės jūroje (AB „KN“, 2019).

Mažos apimties SkGD dujovežis pakraunamas Klaipėdoje esančiame FSRU, suskystintųjų gamtinių dujų laivas-saugykla (angl. *Floating Storage Regasification Unit*) „Independence“ terminale, toliau SkGD transportuojamos Kuršių mariomis iki AB „KN“ naftos terminalo krantinės, kur atliekama perkrova iš SkGD mažos apimties dujovežio į AB „KN“ SkGD paskirstymo stotį ir krovinyms saugomas paskirstymo stoties talpyklose iki 60 kalendorinių dienų, tuo tarpu vyksta krova į SkGD autocisternas, laivus, galinčius plukdyti SkGD krovinį ir SkGD varomus laivus.

SkGD paskirstymo stoties infrastruktūrą sudaro penkios antžeminės talpos, kurių tūris siekia 1 000 m³ ir maksimalus užpildymo lygis sudaro 90 tūr. % (10 pav.). Šių talpų tipas (angl. *Bullet type tanks*) skirtas mažesniems SkGD kiekiams saugoti (Wartsila: Small and..., 2018). Per parą

susidarančio BOG kiekis siekia 0,05–0,15 tūr. tačiau talpyklos gali išlaikyti didesnę slėgį iki vieno mėnesio. Šios talpyklos suprojektuotos ir eksploatuojamos taip, kad nereikėtų BOG kompresoriaus.

Krantinė aprūpinta SkGD krovai ir perkrovai būtina įranga, kurią sudaro viena 18 metrų ir 8 colių lanksčioji krovos žarna ir viena 15 metrų ir 6 colių lanksčioji garų gražinimo žarna. SkGD priėmimo iš laivo greitis gali siekti $1\,250\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$, o SkGD krovos į laivą greitis svyruoja nuo 250 iki $500\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ („KN“ Technical Specifications..., 2019). SkGD paskirstymo stoties infrastruktūrą taip pat sudaro krovos į autocisterną platforma, kurioje vienu metu gali vykti dvi krovos į autocisternas operacijos iš antros talpyklos (T2), maksimalus SkGD pakrovimo greitis į autocisterną siekia $100\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. Tuo tarpu pirma talpykla (T1) skirta BOG tiekti į AB „KN“ katilinę, o likusios trys (T3), (T4) ir (T5) – SkGD saugoti. Svarbu paminėti, kad stotyje vykdomi plėtros darbai, kurie leis vykdyti krovą į autocisternas iš kitų talpyklų, kas užtikrins krovinio šilumos nuostolių mažėjimą perkraunant iš saugojimo talpyklų į antrą (T2) talpyklą.

Didžioji dalis krovos darbų, be BOG perdavimo į katilinę, yra vykdomi kriogeninėms sąlygoms skirto išcentrinio siurblio, kuris yra tinkamas bet kokiems krovos darbams su kriogeniniais skysčiais (Cryogenic transfer pumps..., 2018). Krovos metu SkGD eina pro matavimo prietaisą Koriolį (angl. *Coriolis*), kuris skirtas skysčio masės srautui matuoti. Šie matavimo prietaisai išdėstyti vamzdyno linijose. Taip pat paskirstymo stotis naudoja dujų chromatografą. Tai chromatografijos tipas, naudojamas analitinės chemijos junginiams atskirti ir analizuoti (Estimated Uncertainty of..., 2014). Tiriama dujiniai junginiai sąveikauja su nejudančia kolonėlės faze ir parodo SkGD komponentinę sudėtį.

Paskirstymo stotyje įrengtas SkGD išdujinimo įrenginys, kurį sudaro keturi aplinkos oro garintuvai (angl. *Ambient Air Vaporizer*), elektrinis šildytuvas ir kita įranga, reikalinga dujų, tiekiamų į AB „Klaipėdos nafta“ katilinę, srautui ir temperatūrai reguliuoti. Didžiausias pakartotinio išdujinimo greitis yra $7\,000\text{ Nm}^3\cdot\text{h}^{-1}$. Aplinkos oro garintuvai yra santykinai nesudėtingi šilumokaičiai, išgarinantys suskystintąsias gamtines dujas, naudodami šilumą, sugeriamą iš aplinkos oro (Air Heated Vaporizers, 2017). Dėl šio paprasto veikimo principo tokiems garintuvams nereikia išorinės energijos, o SkGD eina per daugybę tarpusavyje lygiagrečiai sujungtų vamzdžių. Elektrinis šildytuvas gali būti naudojamas šaltuoju sezono metu kaip atsarginis pašildymo įrenginys (LNG Vaporizer selection..., 2017). Tokiu būdu paskirstymo stotyje vyksta procesų įvairovė, užtikrinanti terminalo veikimą.

2.2. AB „KN“ SkGD paskirstymo stoties duomenų analizės metodika

Šioje dalyje aprašoma, koku principu buvo renkami SkGD komponentinės sudėties fizikinių ir cheminių savybių duomenys ir kaip jie buvo rūšiuojami, kokia analizė ir skaičiavimai buvo atlikti.

Duomenys buvo renkami nuo 2019 09 16 iki 2019 09 23, atliekant praktiką AB „KN“. Darbe analizuojamas 2019 04 03 – 2019 09 08 laikotarpis, per kuri buvo atgabenti keturi laivo kroviniai ir atlikta 150 krovos į autocisternas operacijų. Atlikus pirminę pasirinktų duomenų analizę, tolesnei analizei dėl skirtingų operacijų krovos kiekio į autocisternas buvo pasirinkti tik trys krovos iš laivų laikotarpiai. Tuo tarpu ketvirtos krovos iš laivo operacijos laikotarpio pirminė analizė pateikta prieduose.

Laivo kroviniai buvo suskirstyti į tris krovos ciklus. Kiekvieną iš jų sudarė du krovos periodai: pirmas periodas (a) – krova iš bunkeravimo laivo į antrą talpyklą (T2) ir iš jos krova į autocisternas. Periodą (b) sudaro to paties krovinio perkrova iš vienos talpyklos į kitą (T2) ir krova į autocisternas. Duomenys buvo pateikti kaip visos krovos į autocisterną vidurkis per 40 minučių krovos darbų. Analizuojant SkGD komponentinės sudėties duomenis, buvo nuspręsta grafiškai pateikti šių priklausomybių grafinę analizę:

- SkGD temperatūra ir SkGD tūris talpykloje – trys krovinio krovos ciklai.
- SkGD temperatūros priklausomybė nuo krovos į autocisterną operacijų skaičiaus, vykdant tris krovos iš laivų operacijas.
- Metano ir azoto kitimo SkGD tendencija, vykdant krovą į autocisternas.
- SkGD temperatūros ir viršutinio šilumingumo kitimo tendencija, vykdant SkGD krovą į autocisternas.
- SkGD viršutinio šilumingumo kitimas, vykdant tris skirtingas krovos iš laivų.
- SkGD temperatūros ir tankio kitimo tendencija, vykdant krovą į autocisternas.

Prieduose pateikti duomenys:

- SkGD krovinio komponentinė sudėtis (1 priedas).
- Metano skaičiaus kitimo priklausomybė nuo krovos į autocisterną operacijų skaičiaus, vykdant tris krovos iš laivų operacijas (2 priedas).
- SkGD komponentinės sudėties kitimo priklausomybė nuo krovos į autocisterną operacijų skaičiaus, vykdant tris krovos iš laivų operacijas (3 priedas).
- SkGD temperatūra ir SkGD tūris talpykloje – per visą renkamų duomenų laikotarpį (4 priedas).
- SkGD tankio ir viršutinio šilumingumo kitimo SkGD tendencija, vykdant krovą į autocisternas (5 priedas).

- SkGD temperatūros ir *Wobbe* skaičiaus kitimo SkGD tendencija, vykdant krovą į autocisternas (6 priedas).
- SkGD tankio ir *Wobbe* skaičiaus kitimo SkGD tendencija, vykdant krovą į autocisternas (7 priedas).

Atliekant SkGD tūrio talpykloje skaičiavimus, kiekis, pakrautas į autocisterną, buvo konvertuojamas iš kg į m³, tam prireikė pakrautą svorį į autocisterną padalinti iš SkGD tankio ir atimti iš pradinio skysčio užpildymo kiekio talpykloje, kuris buvo pateiktas iš AB „KN“ SkGD paskirstymo stoties krovos žurnalo.

Atliekant SkGD viršutinio šilumingumo vidutinės reikšmės analizę, vykdant tris atskiras laivų krovos operacijas, taikyta formulė:

$$\frac{(a_1 \cdot b_1) + (a_2 \cdot b_2) + (a_3 \cdot b_3) + \dots + (a_n \cdot b_n)}{b_1 + b_2 + b_3 + \dots + (b_n)}, \quad (2)$$

čia:

a – viršutinis šilumingumas, kWh·kg⁻¹;

b – kiekis, pakrautas į autocisterną, m³.

3. ANALITINĖ DALIS

Šiame skyriuje bus analizuojami duomenys, kurie turi įtakos SkGD senėjimo veiksniams ir nugaravusių dujų valdymo ypatumams.

11 paveiksle parodytas pirmojo nagrinėjamo krovinio temperatūros ir produkto lygio talpykloje kitimas po krovos į autocisternas operacijų. Šios krovos ciklą sudarė du krovos periodai. Ciklo metu dalyvavo 17 autocisternų (a) periode, kai laivo krovins buvo perkraunamas į talpyklą T2, ir 15 autocisternų (b) periode, krovinį perkraunant iš T4 į T2 talpyklą (žr. schemą 10 pav.):

- a) **Pirmojo laivo krovinio krovimas į antrąją talpyklą (T2)**, kurios maksimalus tūris sudaro 1 000 m³. Iš jos krovins buvo kraunamas į autocisternas. Šiame krovos periode dalyvavo 17 autocisternų, o maksimalus talpyklos užpildymo lygis kito nuo 77 tūr. % iki 10 tūr. %. Tuo tarpu pradinė krovinio temperatūra kito nuo –153 °C iki –145 °C. Iš 11 paveiksle pateiktų duomenų matome, kad po krovos į dešimtą autocisterną (A/C 10), kai krovinio lygis talpykloje sumažėjo apie 50 proc. (nuo 77 iki 40 tūr. %), stebimas pirmas krovinio temperatūros įšilimas nuo –153 °C iki –152 °C. Kitas krovinio temperatūros įšilimas nuo –152 °C iki –151 °C stebimas, kai talpyklos užpildymo lygis po krovos į dvyliktą autocisterną (A/C 12) sumažėjo iki 32 tūr. %. Po dar dviejų autocisternų pakrovimo operacijų (A/C 14) krovins tampa 1 °C šiltesnis ir siekia –150 °C. Krovinio lygis talpykloje tuo metu siekia 23 tūr. %. Staigus krovinio temperatūros įšilimas stebimas esant mažiausiam produkto lygiui talpykloje (10 tūr. %), atlikus 17-a autocisternų pakrovimo operacijų. Apibendrinus galima teigti, kad sumažėjus krovinio lygiui talpykloje nuo 77 iki 10 tūr. % bei atlikus 17 krovos operacijų į autocisternas, krovinio temperatūra pakito 8 laipsniais – nuo –153 °C iki –145 °C.
- b) **Pirmojo laivo krovinio krovimas iš ketvirtosios talpyklos (T4) į antrąją talpyklą (T2)**, iš kurios toliau vykdomas autocisternų pakrovimas. Svarbu pabrėžti, kad, sumaišius T2 talpykloje iki –145 °C sušilusį krovinį su iš T4 talpyklos perkrautu produktu, bendra krovinio temperatūra pasiekė –151 °C, o atlikus 15-a krovos į autocisternas operacijų, prarado 6 °C ir, esant 21 tūr. % lygiui talpykloje, siekė –145 °C. Po krovos į antrąją autocisterną (A/C 2) SkGD temperatūra sumažėjo iki –151 °C, kas būdinga iškraunant mažesnio tankio likutį iš antrosios talpyklos apačios į pirmąją autocisterną (A/C 1), kai krovins nebuvo tolygiai susimaišęs. Svarbu pabrėžti, kad, vykdant produkto perkrovimo iš vienos talpyklos (T4) į kitą (T2) operaciją, krovins prarado net 2 °C ir įšilo nuo –153 °C iki –151 °C. Tai siejama su šilumos nuostoliais krovos linijoje. Analizuojant šios krovos duomenis, matyti, kad krovinio temperatūros didėjimas yra greitesnis, lyginant su aukščiau aprašytu variantu. Pirmas temperatūros pokytis nuo –151 °C iki –150 °C stebimas sumažėjus SkGD lygiui talpykloje nuo 75 tūr. % iki 70 tūr. % ir pakrovus tik trečią autocisterną. Tuo tarpu (a) atveju SkGD

krovinio temperatūra išlieka pastovi iki dešimtos krovos operacijos į autocisterną, o (b) atveju tuo metu, esant 42 tūr. % talpyklos užpildymo lygiui, stebimas spartus temperatūros pokytis – nuo $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-146\text{ }^{\circ}\text{C}$. Apibendrinus galima teigti, kad, sumažėjus krovinio lygiui talpykloje nuo 79 tūr. % iki 21 tūr. % ir atlikus 15 krovos operacijų į autocisternas, krovinio temperatūra pakito 6 laipsniais – nuo $-151\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$.

12 paveiksle parodytas antrojo nagrašinėjamo krovinio temperatūros ir produkto lygio talpykloje kitimas, po krovos į autocisternas operacijų. Šios krovos ciklą sudarė du krovos periodai, kuriame dalyvavo 18 autocisternų (a) periode ir 15 autocisternų (b) periode. Svarbu pabrėžti, kad antrojo laivo krovinio atveju (a) periode, kai vyko krovinio perkrovimas iš talpyklos T2 į autocisternas, lyginant su pirmuoju laivo kroviniu, operacijų skaičius buvo didesnis ir siekė 18. Tuo tarpu pirmojo laivo krovinio perkrovimo iš talpyklos T2 į autocisternas operacijų skaičius siekė 17.

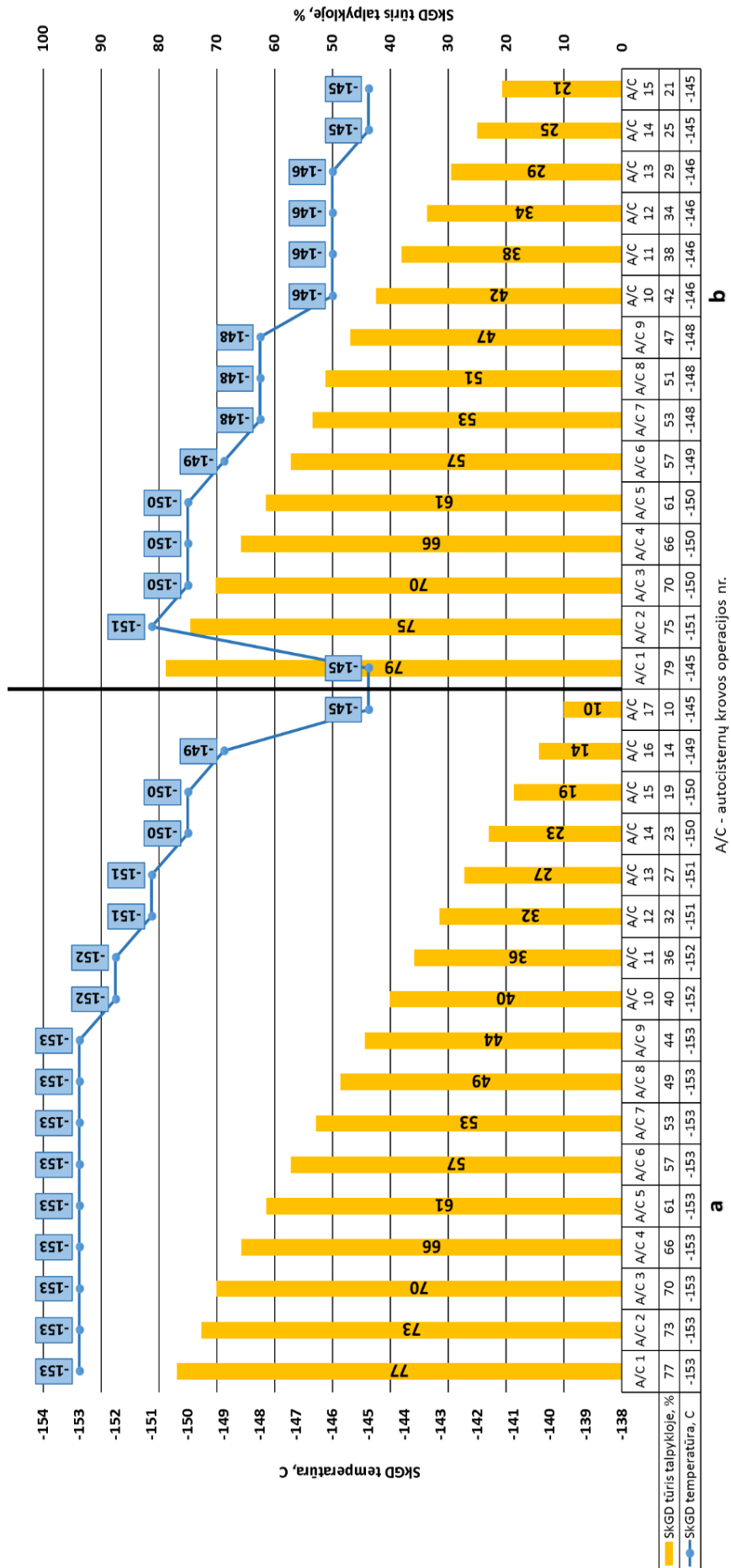
a) **Antrojo laivo krovinio krovimas į antrąją talpyklą (T2).** Šiame krovos periode dalyvavo 18 autocisternų, o maksimalus talpyklos užpildymo lygis kito nuo 83 iki 11 tūr. %. Pradinis talpyklos užpildymo lygis, lyginant su pirmuoju kroviniu, buvo 6 proc., o galutinis – 1 proc. didesnis. Tuo tarpu pradinė krovinio temperatūra buvo $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ aukštesnė negu pirmojo krovinio atveju ir kito nuo $-151\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-144\text{ }^{\circ}\text{C}$. Iš 12 paveiksle pateiktų duomenų matyti, kad po krovos į 12-ą autocisterną (A/C 12), kai krovinio lygis talpykloje sumažėjo daugiau nei 50 proc. (nuo 83 iki 37 tūr. %), stebimas pirmas krovinio temperatūros įšilimas nuo $-151\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Svarbu pažymėti, kad tai vyko pakraunant dvi papildomas autocisternas, lyginant su pirmuoju kroviniu, t. y. esant didesniai produkto kiekiui talpykloje, SkGD temperatūra ir kiti parametrai bei komponentinė sudėtis ilgiau išlieka nekintami. Kitas krovinio temperatūros kitimas nuo $-150\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-149\text{ }^{\circ}\text{C}$ buvo stebimas, kai talpyklos užpildymo lygis po krovos į 13-ą autocisterną (A/C 13) sumažėja iki 33 tūr. %. Tuo tarpu pirmojo krovinio atveju, esant apytiksliai tokiam pat produkto lygiui talpykloje (32 tūr. %), taip pat buvo stebimas produkto temperatūros didėjimas $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, tik atlikus viena krovos operacija mažiau. Po dar dviejų autocisternų pakrovimo operacijų (A/C 15) krovinsys sušyla $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir siekia $-148\text{ }^{\circ}\text{C}$. Krovinio lygis talpykloje tuo metu siekia 24 tūr. %. Staigus krovinio temperatūros didėjimas stebimas esant mažiausiam produkto lygiui talpykloje (11 tūr. %), atlikus 18 autocisternų pakrovimo operacijų. Apibendrinus galima teigti, kad sumažėjus krovinio lygiui talpykloje nuo 83 iki 11 tūr. % bei atlikus 18 krovos operacijų į autocisternas, krovinio temperatūra kito 7 laipsniais – nuo $-151\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-144\text{ }^{\circ}\text{C}$, o palyginus su pirma krova, sumažėjus krovinio lygiui talpykloje nuo 77 iki 10 tūr. % bei atlikus 17 krovos operacijų į autocisternas, krovinio temperatūra kito 8 laipsniais – nuo $-153\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$.

b) **Antrojo laivo krovinio krovimas iš trečiosios talpyklos (T3) į antrą talpyklą (T2)**, iš kurios toliau vykdomas autocisternų pakrovimas. Svarbu pabrėžti, kad sumaišius T2 talpykloje iki $-144\text{ }^{\circ}\text{C}$ sušilusį krovinį su iš T3 talpyklos perkrautu produktu, bendra krovinio temperatūra pasiekė $-147\text{ }^{\circ}\text{C}$, o atlikus 15 krovos į autocisternas operacijų, prarado tik $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir esant 17 tūr. % produkto lygiui talpykloje siekė $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$. Po krovos į pirmąją autocisterną (A/C 1) SkGD temperatūra pakilo iki maksimalios pradinės $-147\text{ }^{\circ}\text{C}$ temperatūros, mažesnio tankio likutis susimaišė su kroviniu, turinčiu didesnį pradinį tankį iš trečios talpyklos (T3) ir neturėjo įtakos temperatūros šuoliui, lyginant su pirmojo krovinio antrojo periodo krova. Svarbu pabrėžti, kad vykdant produkto perkrovimo iš vienos talpyklos (T3) į kitą (T2) operaciją, krovinsys praranda net $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir įšyla nuo $-151\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-147\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tuo tarpu pirmosios krovos atveju SkGD temperatūra padidėjo tik $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tai siejama, kaip ir pirmojo krovinio atveju, su šilumos nuostoliais technologinėje linijoje.

Analizuojant šios krovos antrojo periodo duomenis matyti, kad krovinio temperatūros kitimas yra lėtesnis – jis įšilo tik $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ per visą krovos periodą, lyginant su aukščiau aprašytu variantu, kur po pirmojo krovinio antrojo periodo krovos temperatūros kitimas siekė net $6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pirmas temperatūros pokytis nuo $-147\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-146\text{ }^{\circ}\text{C}$ stebimas sumažėjus SkGD lygiui talpykloje nuo 76 iki 43 tūr. %, pakrovus tik devintą autocisterną. Tuo tarpu (a) atveju SkGD krovinio temperatūra išlieka pastovi iki 11-os krovos į autocisterną, o toliau stebimas spartus temperatūros įšilimas – nuo $-151\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-144\text{ }^{\circ}\text{C}$. Analizuojant (b) atvejį matyti, kad pradinė temperatūra yra žemesnė ir išlieka stabilesnė per visą krovos periodą: kada talpyklos užpildymo lygis siekė 30 tūr. %, krovinsys įšilo tik $1\text{ }^{\circ}\text{C}$, o pasiekus paskutinę krovą ir talpyklos užpildymo lygiui nukritus iki 17 tūr. %, neviršijo žemiausios (a) periodo temperatūros.

Apibendrinus galima teigti, kad sumažėjus krovinio lygiui talpykloje nuo 76 iki 17 tūr. % bei atlikus 15 krovos operacijų į autocisternas, krovinio temperatūra kito 2 laipsniais – nuo $-147\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$. Palyginus su pirmąja krova, sumažėjus krovinio lygiui talpykloje nuo 79 iki 21 tūr. % ir atlikus 15 krovos operacijų į autocisternas, krovinio temperatūra kito net $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ – nuo $-151\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tam įtakos galėjo turėti tai, kad antrojo krovinio (b) periodo atveju talpykla buvo iškrauta per 11 kalendorinių dienų, o pirmojo krovinio atveju, talpykla buvo iškrauta per dvidešimt septynias kalendorines dienas, kas ir nulėmė didesnį krovinio įšilimą talpykloje bei spartesnio SkGD senėjimo proceso talpykloje.



Pirmas krovinys: a) po krovos iš T2 į A/C; b) po krovos iš T4 į T2 ir kraunant A/C.

11 pav. Pirmojo nagrinėjamo krovinio temperatūros ir produkto lygio talpykloje kitimo tendencijos, vykdamas krovą į autocisternas:
 a) po krovos iš T2 į A/C; b) po krovos iš T4 į T2 ir kraunant A/C

13 paveiksle parodytas trečiojo nagrinėjamo krovinio temperatūros ir produkto lygio talpykloje kitimas po krovos į autocisternas operacijų. Šios krovos ciklą sudarė du krovos periodai. Jame dalyvavo 20 autocisternų (a) periode ir 15 autocisternų (b) periode. Svarbu pabrėžti, kad trečiojo laivo krovinio atveju a) periode, kai vyko krovinio perkrovimas iš talpyklos T2 į autocisternas, lyginant su pirmuoju ir antruoju laivo krovniais, operacijų skaičius buvo didžiausias – 20. Tuo tarpu pirmojo laivo krovinio perkrovimo iš talpyklos į autocisternas operacijų skaičius siekė 17, o antrojo – 18.

a) **Trečiasis laivo krovinyas buvo kraunamas į antrąją talpyklą (T2)**, o iš jos vyko krova į autocisternas. Šiame krovos periode dalyvavo 20 autocisternų, o maksimalus talpyklos užpildymo lygis kito nuo 82 tūr. % iki praktiškai žemiausio leidžiamo lygio – 5 tūr. %. Pradinė krovinio temperatūra buvo žemiausia iš visų nagrinėjamų atvejų ir kito nuo $-154\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-143\text{ }^{\circ}\text{C}$. Iš 13 paveiksle pateiktų duomenų matyti, kad po krovos į trečiąją autocisterną, kai krovinio lygis talpykloje sumažėjo 8 proc., nuo 82 iki 74 tūr. %, stebimas pirmas krovinio temperatūros įšilimas nuo $-154\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-153\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Kitas krovinio temperatūros kitimas nuo $-153\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-152\text{ }^{\circ}\text{C}$ stebimas, kai talpyklos užpildymo lygis po krovos į penktąją autocisterną sumažėjo 8 proc. – iki 66 tūr. %, tuo tarpu pirmojo ir antrojo krovinių temperatūra išliko pastovi ir nesikeitė, pasiekus tokį pat krovos į autocisternas operacijų skaičių. Tuo tarpu po dar keturių autocisternų pakrovimo operacijų krovinyas įšilo dar vienu laipsniu ir siekė $-151\text{ }^{\circ}\text{C}$. Krovinio lygis talpykloje tuo metu siekė 51 tūr. %.

Staigus krovinio temperatūros didėjimas stebimas atlikus 14-ą krovos operaciją, kai talpyklos užpildymo lygis siekė 30 tūr. %, o krovinio temperatūra įšilo $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ – nuo $-154\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-149\text{ }^{\circ}\text{C}$. Palyginus su pirmąja ir antrąja tokio paties periodo 14-a krovos operacija, kai talpyklos užpildymo lygis pirmuoju atveju siekė 23 tūr. %, o antruoju 28 tūr. %, SkGD įšilo tik $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tęsiant krova, stebima SkGD temperatūros didėjimo $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ tendencija pakraunant kiekvieną kitą autocisterną iki A/C18, kai produkto lygis talpykloje siekė 14 tūr. %, o produkto temperatūra – $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mažėjant talpyklos užpildymo lygiui, talpykla greičiau įšyla, SkGD pradeda greičiau garuoti, formuojasi nugaravusios dujos, kurios dar labiau spartina krovinio įšilimą. Atlikus 20 autocisternų pakrovimo operacijų ir esant 5 tūr. % produkto lygiui talpykloje, SkGD temperatūra įšilo nuo $-154\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-143\text{ }^{\circ}\text{C}$.

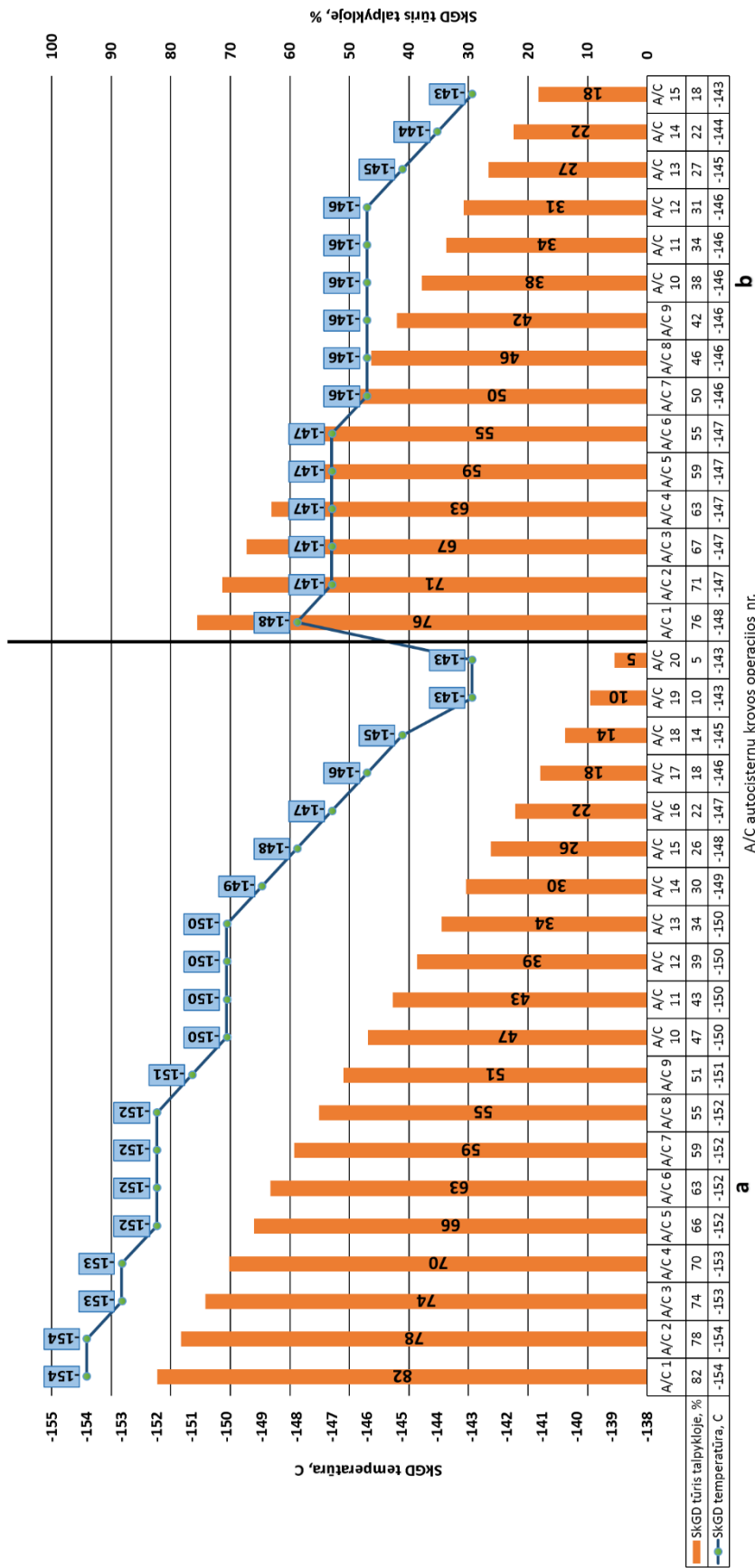
Apibendrinus galima teigti, kad sumažėjus krovinio lygiui talpykloje nuo 82 iki 5 tūr. % bei atlikus 20 krovos operacijų į autocisternas, krovinio temperatūra kito 11 laipsnių – nuo $-154\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-143\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lyginant su pirmąja ir antrąja krovomis, kai pirmosios krovos krovinio temperatūra įšilo 8 laipsniais, o antrosios krovos – 7 laipsniais, didesnę krovinio įšilimą lėmė

tai, kad pakrautų autocisternų skaičius buvo didesnis ir talpykla buvo iškrauta iki beveik mažiausios leistinos ribos.

b) **Trečiojo laivo krovinio krovimas iš ketvirtosios talpyklos (T4) į antrąją talpyklą (T2)**, iš kurios toliau vykdomas autocisternų pakrovimas. Svarbu pabrėžti, kad sumaišius T2 talpykloje iki $-143\text{ }^{\circ}\text{C}$ sušilusį krovinio likutį su iš T4 talpyklos perkrautu produktu, bendra krovinio temperatūra pasiekė $-148\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir atlikus 15-a krovos į autocisternas operacijų įšilo $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir esant 18 tūr. % produkto lygiui talpykloje siekė $-143\text{ }^{\circ}\text{C}$. Mažesnio tankio produkto likutis susimaišė su nauju kroviniu iš T4 talpyklos ir neturėjo įtakos produkto temperatūros kitimui. Svarbu pabrėžti, kad vykdant produkto perkrovimo iš vienos talpyklos į kitą operaciją krovinsys prarado net $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir įšilo nuo $-154\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-148\text{ }^{\circ}\text{C}$, lyginant su pirmine krovinio temperatūra. Pirmosios krovos atveju SkGD tolygiai susimaišė talpykloje tik po antrosios krovos į autocisterną ir taip pat buvo perkrautas iš T4 į T2 talpyklą, tačiau krovinsys prarado tik $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ir įšilo nuo $-153\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-151\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tuo tarpu antrasis krovinsys buvo perkrautas iš T3 talpyklos į T2 talpyklą ir įšilo $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ – nuo $-151\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-147\text{ }^{\circ}\text{C}$. Analogiškai kaip ir pirmojo bei antrojo krovinio atvejais tai siejama su šilumos nuostoliais krovos linijoje, galimai su skirtingu vamzdyno ilgiu tarp talpyklų ir krovos siurblio perdavimo greičiu.

Analizuojant (b) krovos duomenis matyti, kad krovinio temperatūros kitimas yra lėtesnis ir praradimas siekia $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ per visą krovos periodą. Pirmas temperatūros pokytis nuo $-148\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-147\text{ }^{\circ}\text{C}$ stebimas po krovos į antrąją autocisterną. Sumažėjus SkGD lygiui talpykloje 26 proc. nuo 76 iki 50 tūr. % ir pakrovus septintąją autocisterną, krovinio temperatūra pakito nuo $-147\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-146\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lyginant su (a) atveju, SkGD krovinio pradinė temperatūra buvo žemesnė, tačiau jo temperatūros didėjimas buvo spartesnis dėl didesnio pradinio produkto užpildymo lygio talpykloje – 82 tūr. % ir krovos operacijų skaičiaus – 20. Tuo tarpu (b) atveju pradinė SkGD temperatūra buvo aukštesnė ir siekė $-148\text{ }^{\circ}\text{C}$ kaip ir (a) krovos periodo atveju, pakrovus jau 15-ą autocisterną. Svarbu pabrėžti, kad pastaruoju atveju krovinio temperatūra išlieka stabilesnė per visą krovos periodą.

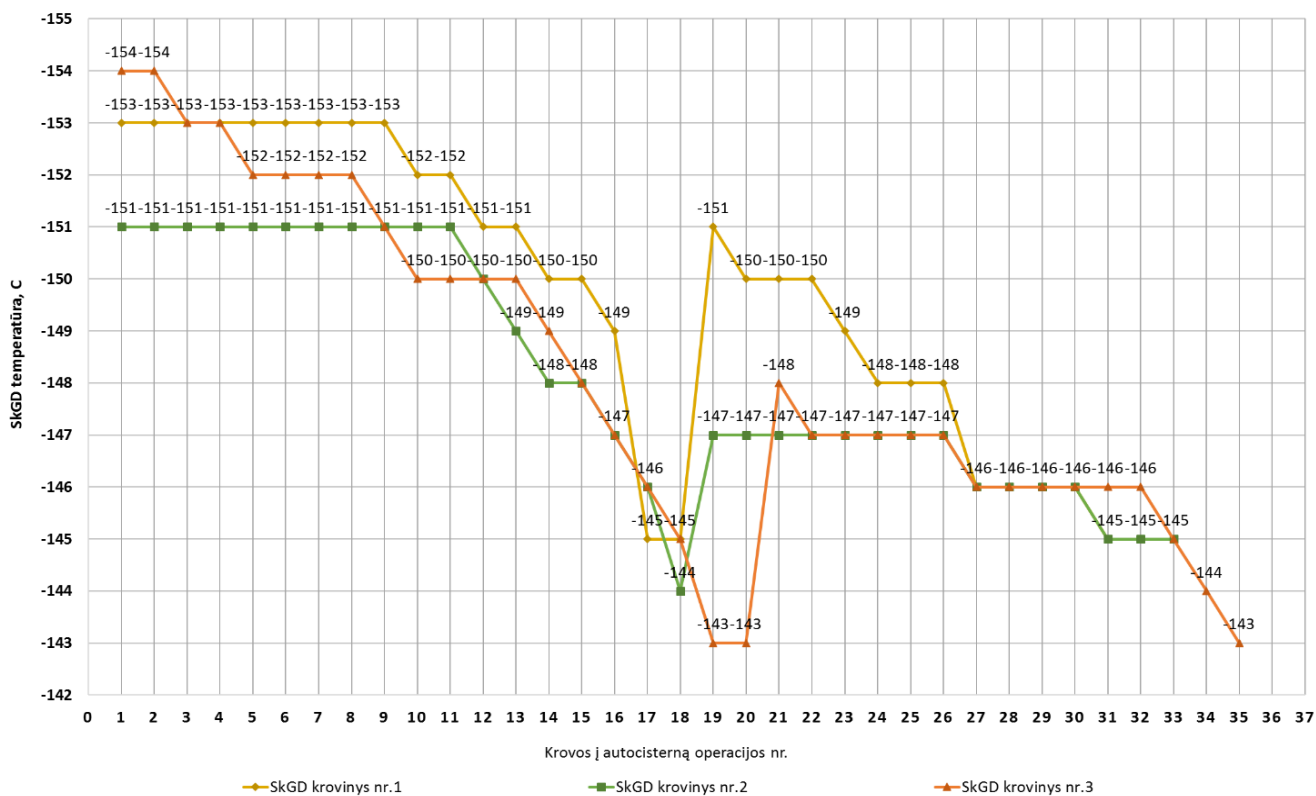
Apibendrinant galima teigti, kad sumažėjus krovinio lygiui talpykloje nuo 76 iki 18 tūr. % bei atlikus 15-a krovos operacijų į autocisternas, krovinio temperatūra kito $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ – nuo $-148\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-143\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lyginant su pirmąja ir antrąja krovomis, kur pirmosios krovos krovinio temperatūra įšilo $6\text{ }^{\circ}\text{C}$, o antrosios krovos tik $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, tokį skirtingą krovinio įšilimą esant vienodam krovos į autocisternas operacijų skaičiui nulėmė pradinės temperatūros skirtumas, patiriant šilumos nuostolių krovos linijoje, ir skirtinga komponentinė krovinio sudėtis (žr. 1 priedą, SkGD krovinio komponentinė sudėtis).



Trečiasis kroviny: a) po krovos iš T2 į A/C; b) po krovos iš T4 į T2 ir kraunant A/C.

13 pav. Trečiojo nagrinėjamo krovinio temperatūros ir produkto lygio talpykloje kitimo tendencijos, vykstant krovą į autocisternas:
a) po krovos iš T2 į A/C; b) po krovos iš T4 į T2 ir kraunant A/C

14 paveiksle pateikta SkGD temperatūros priklausomybė nuo krovos į autocisterną operacijų skaičiaus vykdant tris krovos iš laivų operacijas.



14 pav. SkGD temperatūros kitimo priklausomybė nuo krovos į autocisterną operacijų skaičiaus vykdant tris krovos iš laivų operacijas

Analizuojant SkGD temperatūros kitimo pirmosios, antrosios ir trečiosios krovos metu duomenis, galima teigti, kad sparčiausias temperatūros kitimas prasideda, kai talpyklos užpildymo lygis yra mažesnis negu 40 tūr. %, pirmojo krovinio atveju pasiekus krovą į dešimtąją autocisterną – 40 tūr. % (11 pav.), antrojo krovinio atveju pasiekus krovą į dvyliktą autocisterną – 37 tūr. % (12 pav.), o trečiojo krovinio atveju pasiekus krovą į keturioliktą autocisterną – 30 tūr. % (13 pav.).

Palyginus visų antrojo periodo krovos operacijų duomenis, kai krovinys buvo perkraunamas iš vienos talpyklos į kitą, matyti, kad pirminė temperatūra dėl patirtų šilumos nuostolių technologinėje linijoje ir talpyklos papildymo SkGD būna aukštesnė, tačiau tolesnis temperatūros įšilimas yra nuoseklesnis ir pasiekus paskutinę krovą į autocisterną neišyla daugiau negu pirmojo periodo krovos ciklo temperatūra.

Taigi nustatyta, kad SkGD krovinys saugojimo metu pradeda šilti, kas turi įtakos dujų parametru ir sudėties kitimui. BOG išsiskyrimas talpykloje reikalauja energijos, kuri gali būti paimta tik iš SkGD skystosios fazės, todėl talpykloje prasideda SkGD skysčio autovėsinimas. SkGD iškrovimo į autocisterną operacijos metu terminalo talpyklos viršuje susidaro vakuumas, dėl to krenta slėgis talpyklos viršuje, kas ir sukuria spartesnį produkto garavimą – BOG išsiskyrimą, kad kompensuotųsi prarastas slėgis. Garų slėgis talpykloje krenta, dėl to prasideda aktyvesnis aukščiausių virimo

temperatūrą turinčių SkGD komponentų garavimas (Accurate determination of..., 2009). SkGD garavimo proceso metu skystis atiduoda dalį energijos, dėl to atvėsta, tačiau garų fazė virš jo šildo krovinį ir talpyklą. Iš SkGD esančių komponentų pirmiausia išgaruoja azotas, nes turi žemiausią virimo temperatūrą ($-189\text{ }^{\circ}\text{C}$), po jo pradeda garuoti metanas, todėl svarbu stebėti azoto koncentracijos kitimą SkGD. Pagal šiuos stebėjimus galima prognozuoti metano garavimo pradžią ir pačių dujų senėjimą (angl. *Ageing*) (Method development for..., 2013). Šis procesas apibūdinamas laipsnišku SkGD komponentinės sudėties pasikeitimu bėgant laikui. Šį procesą būtina valdyti, ypač kai metano koncentracija SkGD artėja prie LR energetikos ministerijos nustatytos ribinės vertės – 90 mol. % (Gamtinių dujų kokybės..., 2013).

Analogiškai grafiniu būdu buvo analizuojama SkGD metano skaičiaus kitimo priklausomybė nuo krovos į autocisterną operacijų skaičiaus, vykdant tris krovos iš laivų operacijas, tačiau dėl nežymaus duomenų pokyčio bus pateikta 2 priede.

Toliau darbe pateikiama azoto ir metano kitimo SkGD analizė, vykdant krovą į autocisternas.

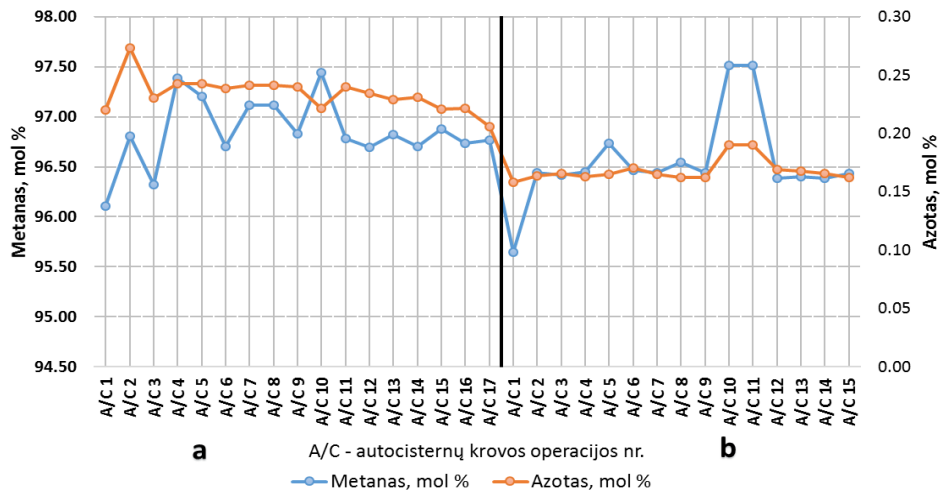
15 paveiksle pateiktos metano ir azoto koncentracijų kitimo SkGD tendencijos po kiekvienos krovos į autocisternas. Buvo analizuojami trys krovos ciklai, kurie suskirstyti į periodus (a) ir (b). Periodas (a) – tai pirminis laivo krovinys, pakrautas į antrąją SkGD talpyklą (T2), ir iš jos atliekama krova į autocisternas (A/C). Tuo tarpu periodas (b) rodo krovą iš T3 arba T4 talpyklos į talpyklą T2, o iš jos atliekama krova į autocisternas.

Iš 15 paveiksle pateiktų duomenų matyti, kad analizuojamų krovų metu krovinio metano koncentracija SkGD kito nuo 96,10 iki 96,43 mol % per pirmąjį, nuo 95,76 iki 95,54 mol % per antrąjį ir nuo 92,61 iki 92,59 mol % per trečiąjį krovos ciklus. Tuo tarpu azoto koncentracija dujose kito nuo 0,22 iki 0,16 mol % per pirmąjį, nuo 0,15 iki 0,07 mol % per antrąjį ir nuo 0,35 iki 0,28 mol % per trečiąjį krovos ciklus.

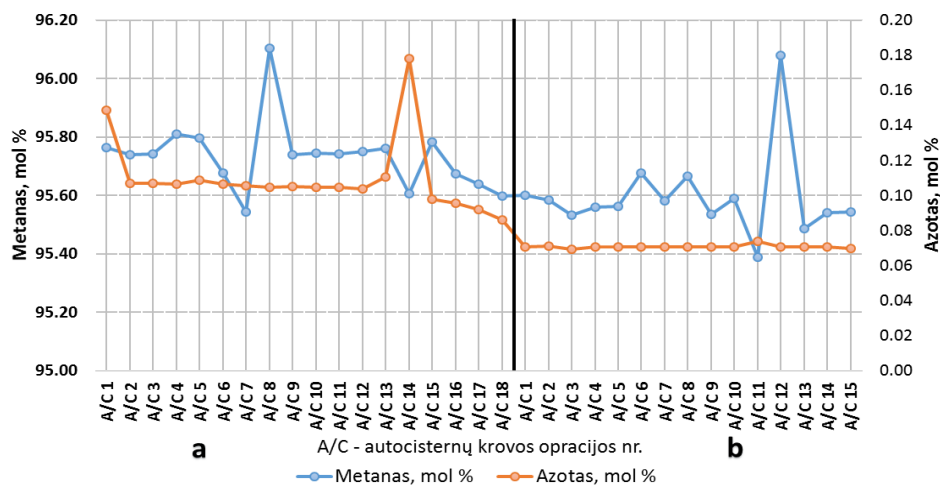
Pastebėta, kad BOG kiekis mažėja priklausomai nuo SkGD nusistovėjimo trukmės ir sąlygų, kuriomis yra mažesnis azoto kiekis SkGD komponentinėje sudėtyje. Azoto buvimas lemia maksimalų BOG išsiskyrimą, atsirandantį dėl šilumos patekimo į skystį (Huerta et al, 2019).

Apibendrinus galima teigti, kad, vykdant SkGD krovą iš talpyklų į autocisternas, dujų azoto ir metano koncentracijos praktiškai nepasikeitė. Galimai tai siejama su produkto garavimo ir autovėsinimo procesais, kurie vyksta atliekant SkGD krovimą į autocisterną. Tuo metu talpyklos viršutinėje dalyje susidaro vakuumas, kas skatina BOG išsiskyrimą, o joms išsiskyrus krovinys atvėsta, slopindamas komponentinės sudėties kitimą.

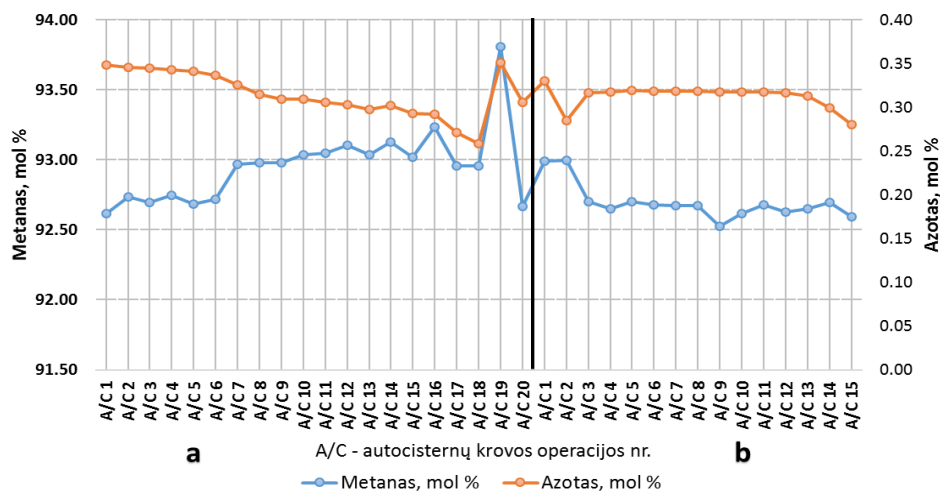
Etano, propano, azoto ir kitų komponentų kitimo SkGD tendencijos, vykdant krovą į autocisternas, pateiktos 3 priede.



Pirmas kroviny: a) po krovos iš T2 į A/C; b) po krovos iš T4 į T2 ir kraunant A/C.



Antras kroviny: a) po krovos iš T2 į A/C; b) po krovos iš T3 į T2 ir kraunant A/C.



Trečias kroviny: a) po krovos iš T2 į A/C; b) po krovos iš T4 į T2 ir kraunant A/C.

15 pav. Metano ir azoto kitimo SkGD tendencija, vykdant krovą į autocisternas

16 paveiksle pateiktos SkGD temperatūros ir viršutinio šilumingumo kitimo, vykdant krova į autocisternas, tendencijos.

Nustatyta, kad pirmo laivo krovinio saugojimo metu SkGD temperatūra kito $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ – nuo $-153\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$, antro laivo krovinio – $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ – nuo $-151\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-144\text{ }^{\circ}\text{C}$, o trečio – $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ – nuo -154 iki $-143\text{ }^{\circ}\text{C}$. Kitų krovų, kurios neįtrauktos į detalesnę analizę, duomenys pateikti 4 priede.

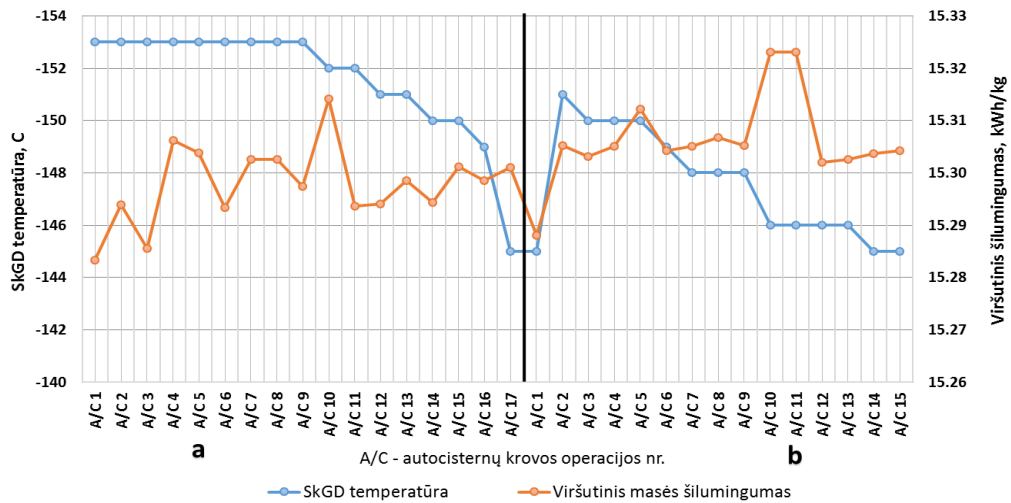
Atliekant talpyklos papildymą iš kitos talpyklos, naudojant tą patį krovinį, SkGD temperatūra pirmojo laivo krovinio metu sumažėjo $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ – nuo $-145\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-151\text{ }^{\circ}\text{C}$, antrojo – $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ – nuo $-144\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-147\text{ }^{\circ}\text{C}$, o trečiojo – $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ – nuo $-143\text{ }^{\circ}\text{C}$ iki $-148\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Atliekant pirmojo laivo krovinio pirmą krova į autocisterną, viršutinis SkGD šilumingumas siekė $15,283\text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$. Tuo tarpu pakrovus 17-ą krova, jis išaugo $0,018\text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$ iki $15,301\text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$. Nustatyta, kad papildant talpyklą to paties krovinio SkGD iš kitos talpyklos ir atlikus 15a krovos į autocisternas operacijų, šilumingumo reikšmė padidėjo $0,016\text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$ – nuo $15,288\text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$ iki $15,304\text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$.

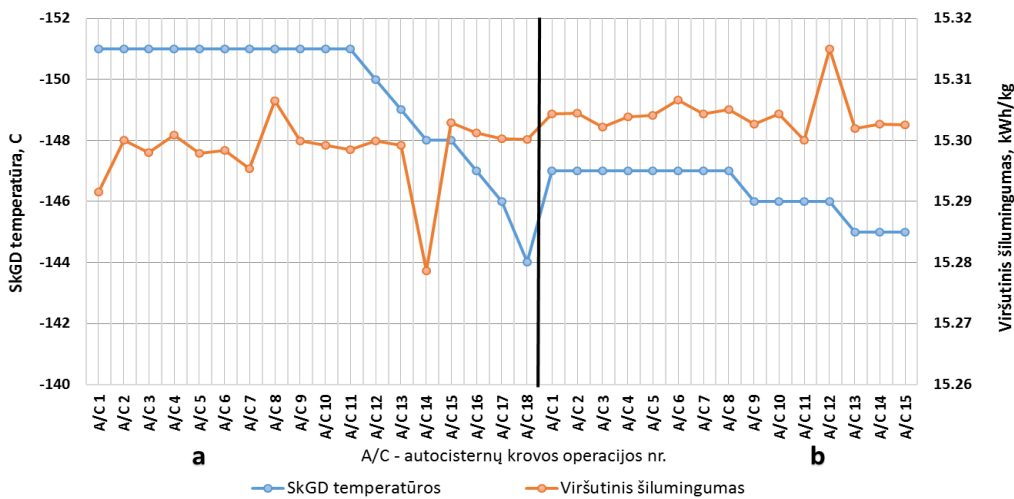
Analizuojant antrojo laivo krovos duomenis matyti, kad krovinio viršutinio SkGD šilumingumo pirminė vertė siekė $15,291\text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$, o atlikus 18-ą krova į autocisterną, ji išaugo $0,009\text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$ iki $15,300\text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$, kas apskritai sudaro mažesnę pokytį, palyginus su pirmojo krovinio ciklu esant didesniai krovos į autocisternas skaičiui. Įvykdžius to paties SkGD krovinio talpyklos papildymą ir atlikus 15 krovos į autocisternas operacijų, viršutinio šilumingumo reikšmė sumažėjo $0,002\text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$ – nuo $15,304\text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$ iki $15,302\text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$. Lyginant su pirmosios krovos antro (b) periodo krova ir esant vienodam krovos į autocisternas skaičiui, viršutinio šilumingumo reikšmė sumažėjo.

Atliekant trečiojo laivo krovinio krova, kurios metu buvo pakrauta 20 autocisternų, tai didžiausias kiekis per visus tris krovos ciklus, įvykdžius 1-ą krova į autocisterną, viršutinis SkGD šilumingumas siekė $15,170\text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$. Tuo tarpu pakrovus 20-ą autocisterną, jis išaugo $0,014\text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$ iki $15,184\text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$, kas sudarė mažesnę pokytį, palyginus su pirma krova, ir didesnę, palyginus su antra krova. Atlikus talpyklos papildymą ir pasiekus 15-ą krovos į autocisterną operaciją, šilumingumo reikšmė padidėjo $0,002\text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$ – nuo $15,186\text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$ iki $15,188\text{ kWh}\cdot\text{kg}^{-1}$, tai sudarė mažesnę pokytį, lyginant su pirmo krovinio to paties periodo krova ir didesnę pokytį nei antro krovinio tokio pat periodo krova, esant abiem atvejais vienodam krovos kiekiui į autocisternas.

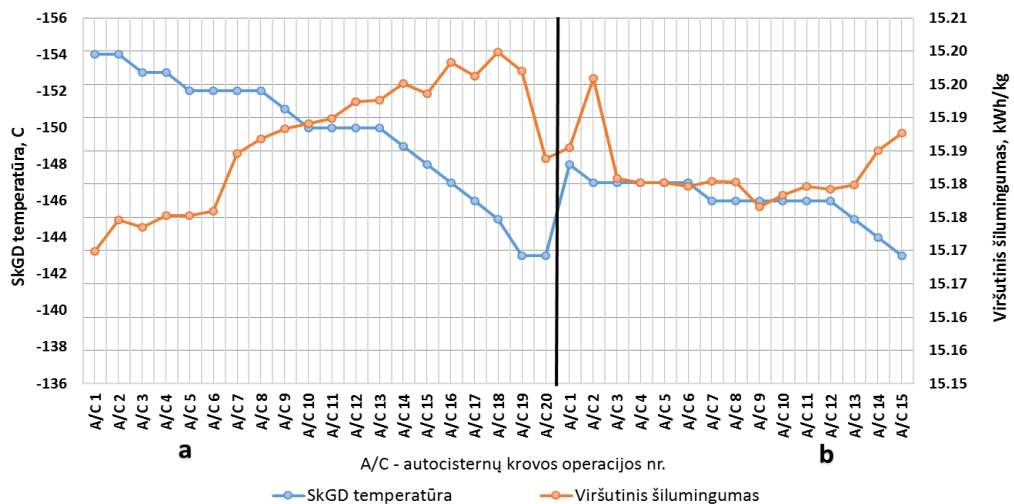
Žemiau yra pateiktas paveikslas su vidutinėmis pirmojo, antrojo ir trečiojo krovinių viršutinio šilumingumo reikšmėmis, jame atlikta detalesnė analizė, kur (a) periodas – krova iš laivo į talpyklą (T2) ir iš jos krova į autocisternas, (b) periodas – tai krova iš kitos talpyklos į talpyklą (T2) ir krova į autocisternas (17 pav.).



Pirmas kroviny: a) po krovos iš T2 į A/C; b) po krovos iš T4 į T2 ir kraunant A/C.

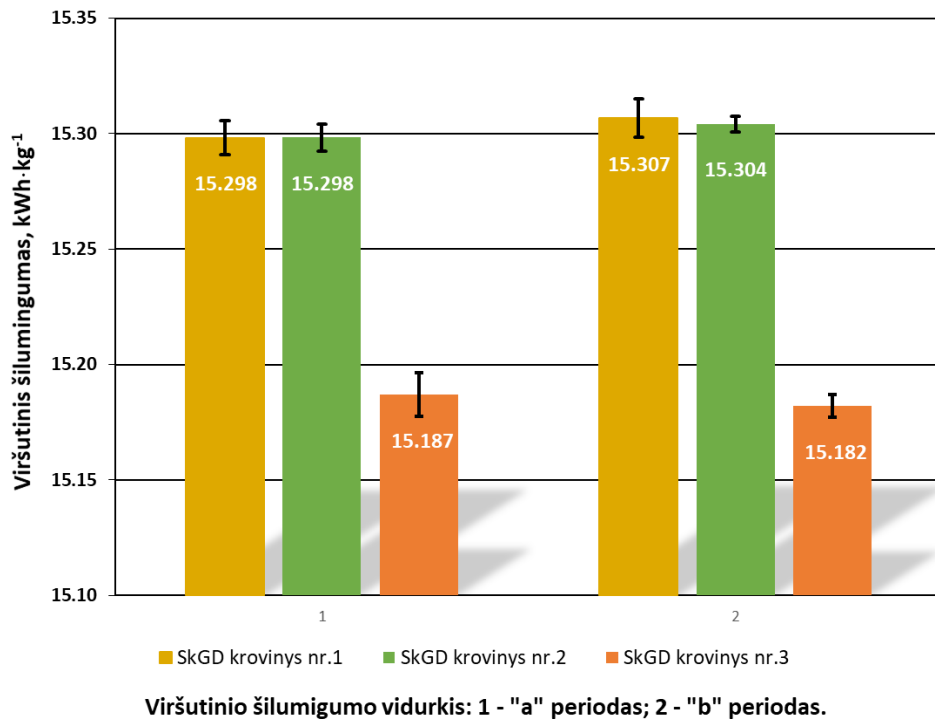


Antras kroviny: a) po krovos iš T2 į A/C; b) po krovos iš T3 į T2 ir kraunant A/C.



Trečias kroviny: a) po krovos iš T2 į A/C; b) po krovos iš T4 į T2 ir kraunant A/C.

16 pav. SkGD temperatūros ir viršutinio šilumingumo kitimo, vykdant SkGD krovą į autocisternas, tendencija



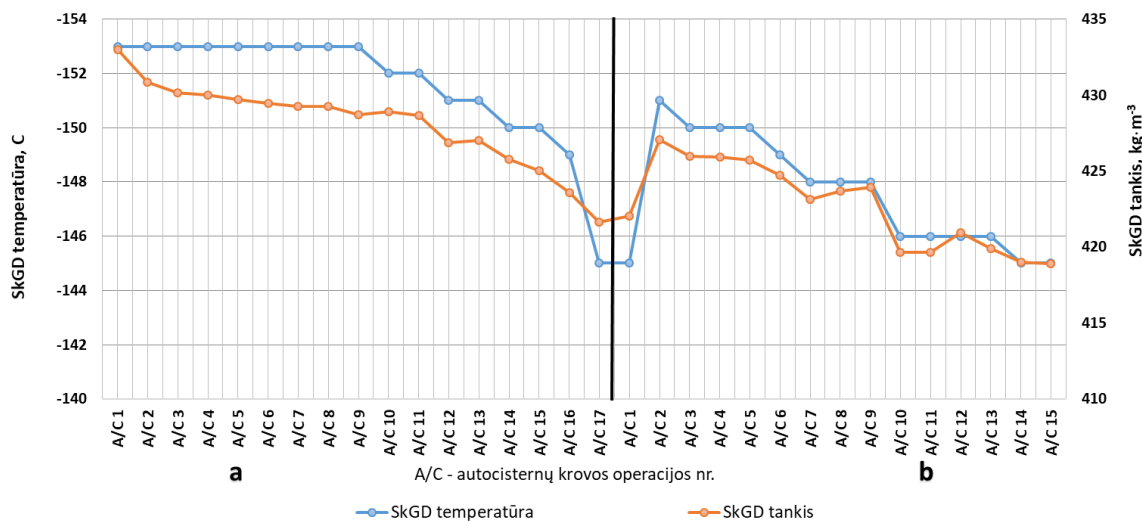
17 pav. SkGD viršutinio šilumingumo vidutinė reikšmė, vykdant tris atskiras laivų krovias

Atliekant pirmojo laivo krovinio (a) periodo SkGD viršutinio šilumingumo vidurkio analizę, taikant standartinės deviacijos paklaidos skaičiavimą, matyti, kad ši reikšmė, atlikus 17-a krovos į autocisterną operacijų (11 pav.), siekė $15,298 \pm 0,007 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$ (17 pav.). Antro laivo krovinio krova, atlikus 18 krovos į autocisterną operacijų (12 pav.), siekė $15,298 \pm 0,006 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$, o trečiojo laivo krovinio krova, iškrovus 20-ą autocisterną (13 pav.), siekė $15,187 \pm 0,009 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$.

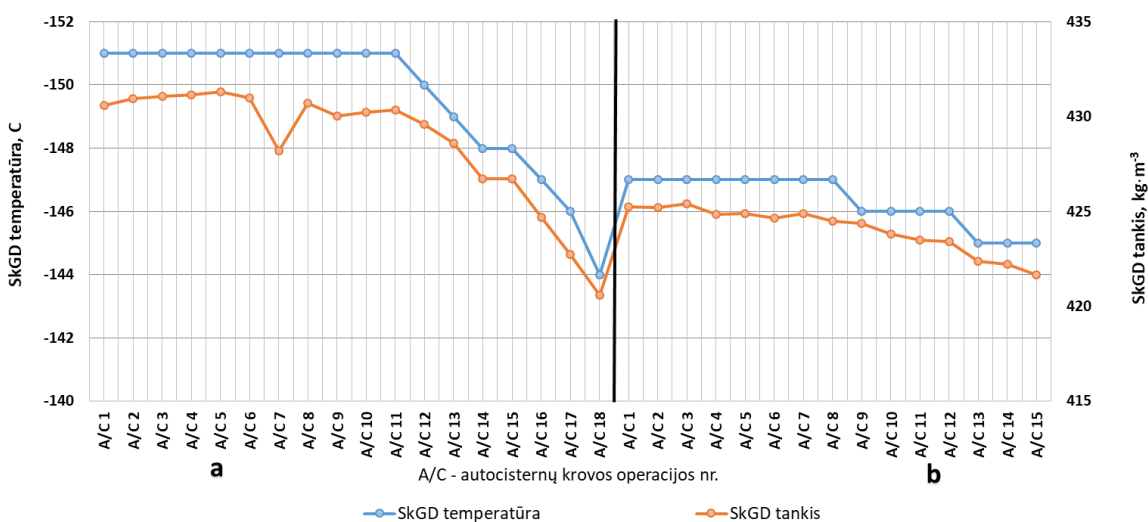
Tuo tarpu (b) periodo metu, kai vyko to paties SkGD krovinio perkrovimas iš kitos talpyklos ir esant vienodam krovų skaičiui į autocisternas visais trimis krovos periodais (15 krovos operacijų), viršutinio šilumingumo vidutinė reikšmė pirmo krovinio atveju siekė $15,307 \pm 0,008 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$. Antrojo laivo krovinio – $15,304 \pm 0,003 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$, trečiojo – $15,182 \pm 0,005 \text{ kWh} \cdot \text{kg}^{-1}$. Analizuojant šiuos duomenis matyti, kad rezultatai svyravo paklaidų ribose.

Apibendrinus visų nagrinėjamų SkGD krovos atvejų temperatūros ir viršutinio šilumingumo kitimo tendencijas vykdant krovą į autocisternas, galima teigti, kad mažėjant temperatūrai talpykloje nuo $-154 \text{ }^\circ\text{C}$ iki $-143 \text{ }^\circ\text{C}$ SkGD viršutinis šilumingumas svyravo paklaidų ribose.

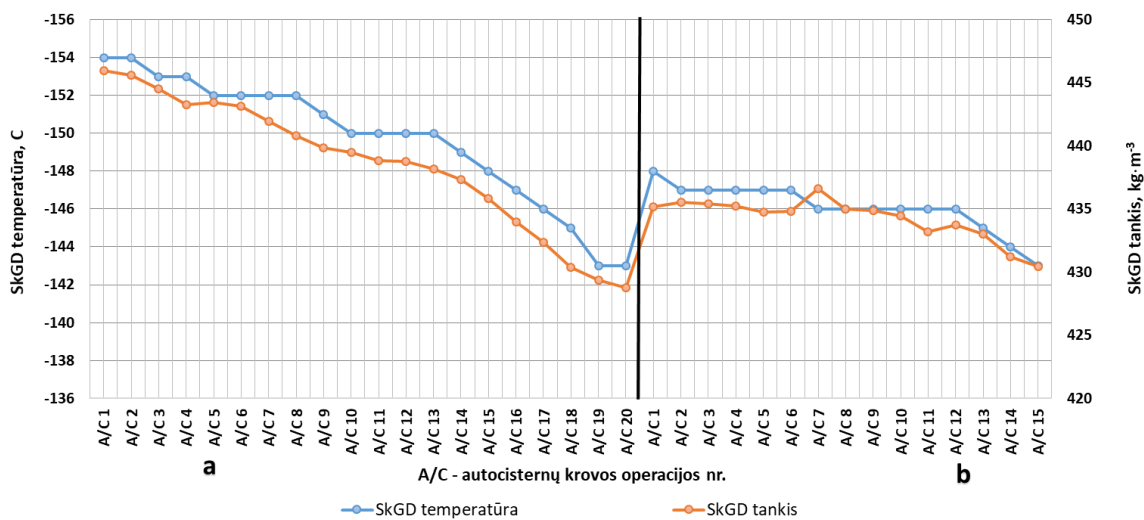
Toliau darbe pateikiama SkGD temperatūros ir tankio kitimo analizė. 18 paveiksle pateiktas SkGD temperatūros ir tankio kitimas po kiekvienos krovos į autocisternas.



Pirmas kroviny: a) po krovos iš T2 į A/C; b) po krovos iš T4 į T2 ir kraunant A/C.



Antras kroviny: a) po krovos iš T2 į A/C; b) po krovos iš T3 į T2 ir kraunant A/C.



Trečias kroviny: a) po krovos iš T2 į A/C; b) po krovos iš T4 į T2 ir kraunant A/C.

18 pav. SkGD temperatūros ir tankio kitimo tendencija, vykdant krovą į autocisternas

Nustatyta, kad SkGD tankis pirmojo krovinio (a) periodu, kai atlikta 17-a krovos operacijų į autocisternas, sumažėjo $11,38 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, arba 2 proc., nuo $430 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ iki $421,62 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, o (b) periodu, kai atlikta 15-a krovos operacijų į autocisternas, sumažėjo $3,13 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, arba 0,7 proc., nuo $422,05 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ iki $418,92 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Antrojo krovinio SkGD tankis, atlikus 18-a krovos operacijų, atitinkamai sumažėjo $10,01 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, arba 2,3 proc., nuo $430,58 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ iki $420,57 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (a) periodo metu ir $3,55 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, arba 0,8 proc., nuo $425,23 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ iki $421,68 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (b) periodo metu, atlikus 15 krovos į autocisterną operacijų. Tuo tarpu trečiojo krovinio SkGD tankis (a) periodo metu sumažėjo daugiausia iš visų nagrinėjamų laikotarpių, atlikus 20 krovos į autocisterną operacijų, – net $17,17 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, arba 3,9 proc., nuo $445,94 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ iki $428,77 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, ir $4,72 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, arba 1,1 proc., nuo $435,15 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ iki $430,43 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ (b) periodo metu, atlikus 15-a krovos į autocisterną operacijų.

Analizuojant pirmojo krovinio (a) periodo krovos ciklą, matyti, kad SkGD temperatūrai pakilus $8 \text{ }^\circ\text{C}$, tankis sumažėjo $11,38 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, arba 2 proc. Palyginus su (b) krovos periodu, kur temperatūros pokytis išlieka stabilesnis ir keičiasi lėčiau, matyti, kad SkGD temperatūrai pakilus $6 \text{ }^\circ\text{C}$, tankis sumažėjo $3,13 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, arba 0,7 proc. Atliekant antrojo krovinio (a) periodo krovos ciklo analizę, matyti, kad SkGD tankis sumažėjo $10,01 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, arba 2,3 proc., krovinio temperatūrai pakilus $7 \text{ }^\circ\text{C}$, o (b) krovos periodo metu stebimas mažėjimas – $3,55 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, arba 0,8 proc., SkGD temperatūrai pakilus $2 \text{ }^\circ\text{C}$. Analogiškai analizuojant trečiojo krovinio (a) periodo krovos ciklą, stebimas didžiausias tankio sumažėjimas – net $17,17 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, arba 3,9 proc., SkGD temperatūrai įšilus $11 \text{ }^\circ\text{C}$. Palyginus su (b) periodu, kai temperatūros pokytis sudarė $5 \text{ }^\circ\text{C}$ ir išliko stabilesnis, matyti, kad tankis sumažėjo $4,72 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, arba 1,9 proc.

Apibendrinus visų nagrinėjamų SkGD krovos atvejų temperatūros ir SkGD tankio kitimo tendencijas, galima teigti, kad dėl senėjimo proceso (lengvesni komponentai pradeda garuoti) šiluma, patenkanti į viršutinę talpyklos dalį per jos sienelės, spartina BOG susidarymą nuo laisvojo SkGD paviršiaus ploto. Dėl šilumos patekimo padidėja skysčio temperatūra, krovinys įšyla, o padidėjus SkGD temperatūrai, padidėja ir tūris, todėl tankis atitinkamai sumažėja.

SkGD tankis ir skysčio tūris saugojimo metu talpykloje taip pat yra vienas iš pagrindinių parametrų, dėl kurių išsiskiria nugaravusios dujos (Ebenzer et al., 2010). Reikia stebėti azoto kiekio praradimą talpykloje (15 pav.), nes dėl jo sumažėja likusio skysčio tankis. Svarbu pabrėžti, kad SkGD, kurios neturi azoto, metano garavimas lemia temperatūros ir likusio skysčio tankio padidėjimą. Ši azoto charakteristika suskystintose gamtinėse dujose sudaro „rollover“ fenomeną (GIIGNL, 2015). Šis fenomenas ypač svarbus vykdant perpylimą tarp talpyklų ar priimant naują krovinį, kai talpykloje yra kito SkGD krovinio likutis. SkGD gali pasiskirstyti sluoksniais, dėl to po tam tikro laiko stratifikacija gali nutrūkti dėl stiprios šiluminės konvekcijos, susidarančios talpyklos dugne, ir pradeda išsiskirti didesni BOG kiekiai nei įprasta per trumpą laiką tarpą.

IŠVADOS

1. Nustatyta, kad SkGD paskirstymo stotyje krovinio senėjimo procesui ir nugaravusių dujų valdymui įtakos turi pradinė krovinio komponentinė sudėtis, laikas, per kurį produktas buvo iškrautas iš talpyklos į autocisternas, ir perpylimai iš vienos talpyklos į kitą, kurie dėl šilumos nuostolių technologinėje linijoje ir skirtingo jos ilgio turi įtakos SkGD temperatūrai.
2. Nustatyta, kad azoto ir metano koncentracijos SkGD per analizuojamus krovos ciklus praktiškai nesikeitė, o viršutinis šilumingumas svyravo paklaidų ribose. Išanalizavus duomenis nustatyta, kad kai talpykla iškraunama per ilgesnį laikotarpį ir krovinio lygis talpykloje sumažėja apie 50 proc., vyksta spartus SkGD šilimas:

- Pirmojo krovinio krovimo metu, kai krovins buvo perkraunamas iš laivo į talpyklą per 12 dienų, atlikus 17 krovos operacijų, SkGD sušilo 8 °C, o SkGD tankis per visą periodą sumažėjo 2 proc. Antrojo krovinio krovimo metu, kai krovins buvo iškrautas per 17 dienų, ir atlikus 18 krovos operacijų, SkGD sušilo 7 °C, kas apskritai sudarė SkGD tankio sumažėjimą 2,3 proc. Iškrovus trečią krovinį per 18 dienų ir atlikus 20 krovos operacijų, SkGD išilo labiausiai, net 11 °C, kas nulėmė didžiausią SkGD tankio sumažėjimą talpykloje – 3,9 proc.
- Tuo tarpu vykdant pirmo krovinio perpylimą iš vienos talpyklos į kitą per 27 dienas, atlikus 15 krovos operacijų, dėl ilgiausio saugojimo laikotarpio talpykloje SkGD sušilo 6 °C, tačiau SkGD tankis sumažėjo neženkliai – apie 0,7 proc. Atlikus antro krovinio perpylimą iš vienos talpyklos į kitą per 11 dienų, esant vienodam krovos operacijų skaičiui, SkGD išilo 2 °C, tačiau SkGD tankio sumažėjimas stebimas didesnis – 0,8 proc., lyginant su pirma krova. Perpilant trečią krovinį, analogiškai esant vienodam krovos skaičiui į autocisternas, per 12 dienų SkGD sušilo 5 °C. SkGD tankis per visą periodą sumažėjo 1,9 proc.

3. Nustatyta, kad atliekant SkGD perpylimą iš T4 talpyklos į T2, pirmasis analizuojamas krovins patyrė šilumos nuostolių ir sušilo 2 °C – nuo –153 °C iki –151 °C; antrojo krovinio perpylimo iš T3 talpyklos į T2 metu krovins sušilo 4 °C – nuo –151 °C iki –147 °C; trečiojo krovinio perpylimo iš T4 talpyklos į T2 metu krovins sušilo net 6 °C – nuo –154 °C iki –148 °C. Rekomenduojama vengti produkto perpylimo tarp talpyklų operacijų, nes tai užtikrintų minimalų temperatūros nuostolį jo saugojimo metu.

LITERATŪRA

Accurate determination of LNG quality unloaded in Receiving Terminals: An Innovative Approach. Jan 2009. Prieiga internete: <<http://www.iapg.org.ar/WGC09/admin/archivosNew/Special%20Projects/4.%20IGU%20Best%20Practices/4.%20IGU%20Best%20Practices%20final%20-%20cd%20contents/8.%20Ing%20-%20Accurate%20determination%20of%20LNG%20quality%20unloaded%20in%20receiving%20terminals.pdf>> [žiūrėta 2019-09-01].

An Overview of LNG Import Terminals in Europe. 2018. Prieiga internete: <https://www.kslaw.com/attachments/000/006/010/original/LNG_in_Europe_2018_-_An_Overview_of_LNG_Import_Terminals_in_Europe.pdf?1530031152> [žiūrėta 2019-08-19].

Boil-Off Gas Reliquefaction. Recovering of BOG at LNG import and export terminals. 2019. Prieiga internete: <<https://www.engineering-airliquide.com/boil-gas-reliquefaction>> [žiūrėta 2019-09-03].

BP Statistical Review of World Energy. 2019. Prieiga internete: <<https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>> [žiūrėta 2019-08-12].

Calderón, M., Illing, D., Veiga, J. Facilities for bunkering of liquefied natural gas in ports. 2016. Prieiga internete: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146516302940>> [žiūrėta 2019-08-17].

Composition and Physical Properties of the Natural Gas Supplied for Domestic Use through the Distribution Network. 2018. Prieiga internete: <http://www.journalrepository.org/media/journals/jenrr_133/2018/may/feal112018jenrr40952.pdf> [žiūrėta 2019-08-13].

Cryogenic transfer pumps for liquefied gases. 2018. Prieiga internete: <<https://cryostar.com/datas-pdf/booklet/en/cryogenic-transfer-pumps-for-liquefied-gases-web.pdf>> [žiūrėta 2019-11-25].

Dobrota, D., Lalic, B., Komar, I. Problem of Boil-off in LNG Supply Chain. 2013. Prieiga internete: <<https://pdfs.semanticscholar.org/e752/5088c710c1955b67679e12851ba3948b9b0c.pdf>> [žiūrėta 2019-08-20].

Ebenezer, A., Sheikh, Z. I., Xianda, J. Modelling of Boil-Off Gas in LNG Tanks: A Case Study. *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 2 (4), 2010. Prieiga internete: <https://www.researchgate.net/publication/50422350_Modelling_of_Boil-off_Gas_in_LNG_tanks_A_case_study/link/0f3170913829de221603a45c/download> [žiūrėta 2019-09-13].

Egashira, S. Takasago Equipment Plant, Energy & Nuclear Equipment Div., Machinery Business. LNG Vaporizer for LNG Re-gasification Terminal. 2013. Prieiga internete: <https://www.kobelco.co.jp/english/ktr/pdf/ktr_32/064-069.pdf> [žiūrēta 2019-08-19].

Estimated Uncertainty of Calculated Liquefied Natural Gas Density from a Comparison of NBS and Gaz de France Densimeter Test Facilities. 1983. Prieiga internete: <<https://pdfs.semanticscholar.org/a430/529085e73249b6351c4afaf50212e0c72ed1.pdf>> [žiūrēta 2019-09-27].

Euromot Position – Requirements on the quality of natural gas. 2017. Prieiga internete: <<https://www.euromot.eu/wp-content/uploads/2018/02/EUROMOT-Position-Gas-Quality-2017-11-09-.pdf>> [žiūrēta 2019-08-27].

Gas and LNG Storage: The Future of Modular LNG Tanks. 2017. Prieiga internete: <https://www.arup.com/-/media/arup/files/publications/t/future-of-lng_arup_april17.pdf> [žiūrēta 2019-09-02].

GIIGNL. Basic properties of LNG. 2017. Prieiga internete: <<http://files.engineering.com/download.aspx?folder=606c105a-6a4d-4942-871a-aeeef239004b1&file=GIGNL.pdf>> [žiūrēta 2019-08-19].

GIIGNL. Rollover in LNG storage tanks. 2015. Prieiga internete: <https://giignl.org/sites/default/files/public_area/publications/rollover_in_lng_storage_tanks_public_document_low-res.pdf> [žiūrēta 2019-12-15].

GIIGNL. The LNG Process Chain, LNG information paper #2. 2019. Prieiga internete: <https://giignl.org/sites/default/files/public_area/about_lng/4_lng_basics/giignl2019_infopapers2.pdf> [žiūrēta 2019-08-17].

Global LNG fundamentals. 2018. Prieiga internete: <<https://energy.gov/ia/articles/understanding-natural-gas-and-lng-options>> [žiūrēta 2019-09-01].

Guidance on LNG Bunkering to Port Authorities and Administrations. 2018. Prieiga internete: <<https://www.parismou.org/sites/default/files/EMSA%20Guidance%20on%20LNG%20Bunkering.pdf>> [žiūrēta 2019-08-25].

Handbook of Liquefied Natural Gas, Pages 1-106. LNG Fundamentals. 2014. Prieiga internete: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124045859000015>> [žiūrēta 2019-08-17].

Huerta, F., Vesovic, V. A realistic vapour phase heat transfer model for the weathering of LNG stored in large tanks. 2019. Prieiga internete: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544219303809>> [žiūrēta 2019-11-29].

IGU, World LNG Report. 2019. Prieiga internete:
 <https://www.igu.org/sites/default/files/node-news_item-field_file/IGU%20Annual%20Report%202019_23%20loresfinal.pdf> [žiūrėta 2019-08-12].

Klimentyev, A., Knizhnikov, A., Grigoryev, A. Prospects and opportunities for using LNG for bunkering in the Arctic Regions of Russia. 2017. Prieiga internete:
 <<https://arcticwwf.org/site/assets/files/1855/lng-bunkering-russia.pdf>> [žiūrėta 2019-08-25].

Li, Yajun, Li, Yue. Dynamic optimization of the Boil-Off Gas (BOG) fluctuations at an LNG receiving terminal. 2016. Prieiga internete: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/>> [žiūrėta 2019-08-12].

Lin, Y., Ye, C., Yu, Y., Bi, S. An Approach to Estimating the Boil-Off Rate of LNG in Type C Independent Tank for Floating Storage and Regasification Unit under Different Filling Ratio. 2018. Prieiga internete:
 <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359431117371818>> [žiūrėta 2019-09-28].

Linde. LNG technology. 2018. Prieiga internete: <https://www.linde-engineering.com/en/images/LNG-Technology_tcm19-4577.pdf> [žiūrėta 2019-10-02].

LNG – Liquefied Natural Gas Technologies. 2018. Prieiga internete:
 <<https://www.engineering-airliquide.com/lng-liquefied-natural-gas-technologies>> [žiūrėta 2019-09-03].

LNG Blue Corridors. Studies regarding ageing of fuel. 2017. Prieiga internete:
 <http://lngbc.eu/system/files/deliverable_attachments/lng%20bc_d_3.11_studies%20regarding%20Ageing%20of%20Fuel.pdf> [žiūrėta 2019-09-02].

LNG bunkering procedures in ports and terminals. 2015. Prieiga internete:
 <<http://www.kmtp.lt/old/uploads/Tyrimai/LNG%20%20bunkering%20procedures%20in%20ports%20and%20terminals.pdf>> [žiūrėta 2019-08-26].

LNG Bunkering: Technical and Operational Advisory. 2015. Prieiga internete:
 <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/ABS_LNG_Bunkering_Advisory.pdf> [žiūrėta 2019-08-25].

LNG ship to ship bunkering procedure. 2016. Prieiga internete: <
<http://www.lngbunkering.org/sites/default/files/smtf,%20ship%20to%20ship%20bunkering.pdf>>
 [žiūrėta 2019-09-21].

McKinsey. Global Gas and LNG outlook to 2035. 2018. Prieiga internete:
 <https://www.mckinsey.com/solutions/energy-insights/global-gas-lng-outlook-to-2035/~/_media/3c7fb7df5e4a47e393af0cdb080fad08.ashx> [žiūrėta 2019-09-01].

Methane Emissions: from blind spot to spotlight. Oxford Institute for Energy Studies. 2017. Prieiga internete: <<https://www.oxfordenergy.org/wpcms/wp-content/uploads/2017/07/methane-emissions-from-blind-spot-to-spotlight-ng-122.pdf>> [žiūrėta 2019-08-22].

Method development for gas quality determination in the LNG storage of a LNG/LCNG refuelling station. 2013. Prieiga internete: <<http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC288.pdf>> [žiūrėta 2019-11-27].

MOZAH, the world's largest LNG vessel – Qatar gas. 2008. Prieiga internete: <<https://www.qatargas.com/english/MediaCenter/The%20Pioneer/The%20Pioneer%20-%20July%20-%20August%2008.pdf>> [žiūrėta 2019-09-12].

Natural gas – Calculation of calorific values, density, relative density and Wobbe indices from composition. ISO 6976, 2016. Prieiga internete: <<https://www.sis.se/api/document/preview/920813/>> [žiūrėta 2019-08-27].

Natural gas – Determination of composition with defined uncertainty by gas chromatography. ISO 6974-4. 2000. Prieiga internete: <<https://www.evs.ee/preview/iso-6974-4-2000-en.pdf>> [žiūrėta 2019-09-13].

Neverovič, J. Lietuvos Respublikos energetikos ministro įsakymas. Dėl gamtinių dujų kokybės reikalavimų patvirtinimo, Nr. 1-194, 2013. Prieiga internete: <<https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalact/lt/tad/tais.457419/vkqxbazzfn>> [žiūrėta 2019-09-10].

NIIGATA. Marine Loading Arms, Tokyo Boeki Machinery. 2017. Prieiga internete: <http://www.tokyo-boeki-eng.co.jp/technology/pdf/marine%20loading%20arms_E.pdf> [žiūrėta 2019-09-15].

Operation Guidelines for Truck to Ship LNG Transfer. 2014. Prieiga internete: <<http://www.mlit.go.jp/common/001173461.pdf>> [žiūrėta 2019-09-21].

Practical Onshore Gas Field Engineering. 2017. Prieiga internete: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128130223000092>> [žiūrėta 2019-08-25].

Randeep, A., Rainey, T. J., Ashrafur, R. S. M., Steinberg, T., Perrons, R. K., Brown, R. J. LNG Regasification Terminals: The Role of Geography and Meteorology on Technology Choices. 2017. Prieiga internete: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/10/12/2152/pdf>> [žiūrėta 2019-09-20].

Risk Focus: Safe LNG Bunkering Operations. 2019. Prieiga internete: <https://www.ukpandi.com/fileadmin/uploads/uk-pi/LP%20Documents/2019/LNGBunkering_UK_Club_Final.pdf> [žiūrėta 2019-09-05].

Small Scale LNG. 2015. Prieiga internete: <http://www.igu.org/sites/default/files/node-page-field_file/SmallScaleLNG.pdf> [žiūrėta 2019-12-22].

Smith, R., Jaffe, N. LNG for 2020: IMO Sulfur Limits and the LNG Alternative. 2019.

Prieiga internete: <<https://www.hellenicshippingnews.com/lng-for-2020-imo-sulfur-limits-and-the-lng-alternative/>> [žiūrēta 2019-11-27].

Study on the Completion of an EU Framework on LNG-fueled Ships and its Relevant Fuel Provision Infrastructure. Analysis of the LNG market development in the EU. 2017. Prieiga internete: <<https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2015-12-lng-lot3.pdf>> [žiūrēta 2019-08-21].

Tenkrať, D., Hlincik, T., Prokes, O. Institute of Chemical Technology Prague Czech Republic. Natural gas odorization. 2010. Prieiga internete: <http://cdn.intechopen.com/pdfs/11460/intech-natural_gas_odorization.pdf> [žiūrēta 2019-08-25].

Theodore, S., Ioannis, K. LNG Operations: safety issues and procedures, 2015. Prieiga internete: <<https://www.onthemosway.eu/wp-content/uploads/2015/06/lng-operations.pdf>> [žiūrēta 2019-08-18].

Transportation of Liquefied Natural Gas, 1977. Prieiga internete: <<https://www.princeton.edu/~ota/disk3/1977/7712/7712.PDF>> [žiūrēta 2019-11-25].

Wartsila. Small and medium-scale LNG terminals. 2018. Prieiga internete: <https://www.wartsila.com/docs/default-source/Power-Plants-documents/lng/small-and-medium-scale-lng-terminals_wartsila.pdf> [žiūrēta 2019-10-01].

INVESTIGATION OF LIQUIFIED NATURAL GAS AGEING AT JC „KN“

Jevgenij Murašov

Darbo vadovė prof. dr. Tatjana Paulauskienė

SUMMARY

Liquefied natural gas (LNG) due to its physical and chemical properties that are more attractive for its higher energy density values, compared to petroleum products, might be a decisive factor for choosing LNG as a more cost-effective alternative to diesel in most electricity, heating and transport sectors. Because of that LNG will become the fuel of the next decade that can be transported safely and efficiently over long distances to locations where no pipelines are available.

In addition, the use of LNG as compared to petroleum fuels can reduce emissions of air pollutants and greenhouse gases. More than one hundred billion cubic meters of new LNG supply capacity will be commissioned between 2018 and 2023. Europe is currently becoming one of the largest importers of gas, which can be transported in two ways: natural gas via pipelines or liquid, which is later re-gasified at LNG import terminals.

The main aim of this research work was to evaluate liquefied natural gas ageing and management of boil-off gas during technological processes at JC „KN“ LNG terminal. Determination of key factors that are influencing LNG ageing process and peculiarities of boil-off gas management were analyzed in order to provide practical recommendations for further supplementary control on LNG ageing and boil-off gas process care.

The research was based on scientific literature sources and data that were provided by JC „KN“. It has been determined that ageing process of LNG and the management of evaporated gas in storage tanks were mostly influenced by the initial composition of the cargo, the time it was fully discharged from the tank to the tanker trucks and transfers between the tanks that lead to LNG temperature increase due to heat exchange in the process line and its different lengths.

It is recommended to avoid transfusions of liquefied natural gas between storage tanks, as this would ensure a minimum temperature loss during storage.

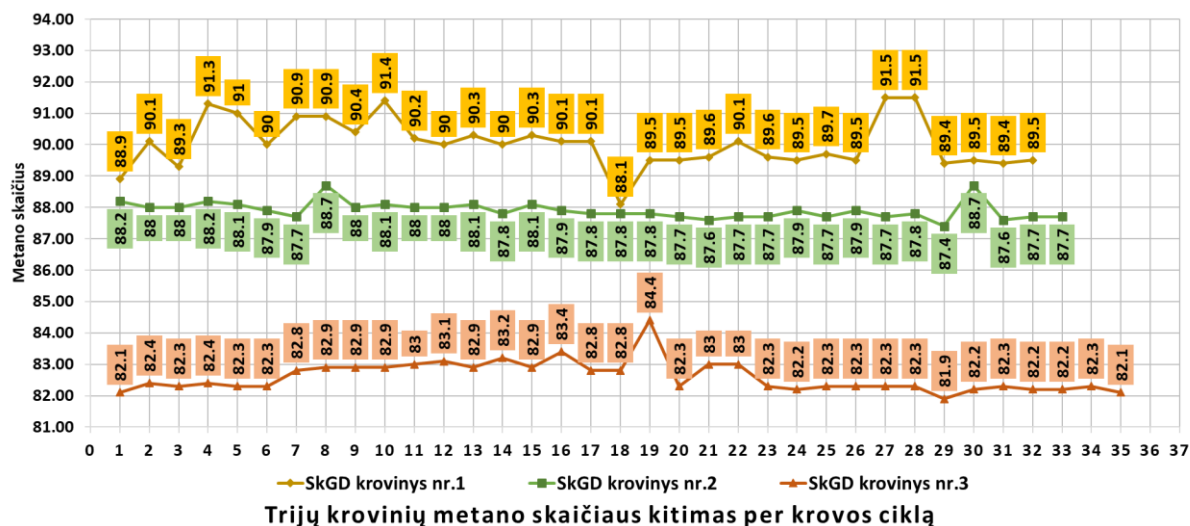
Key words: LNG evaporation, boil-off gas, LNG composition, methane, nitrogen, calorific value, LNG ageing.

P R I E D A I

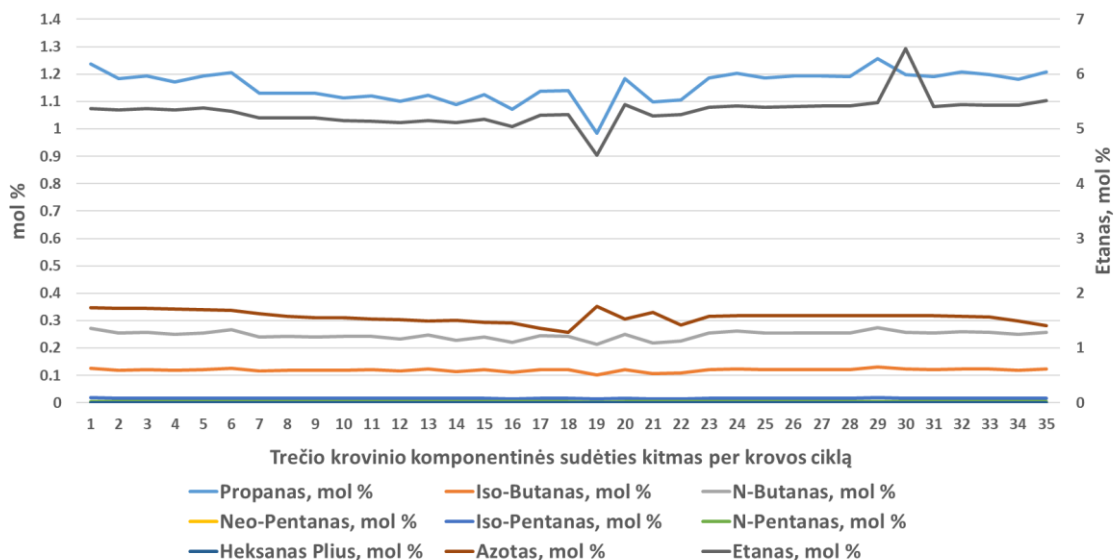
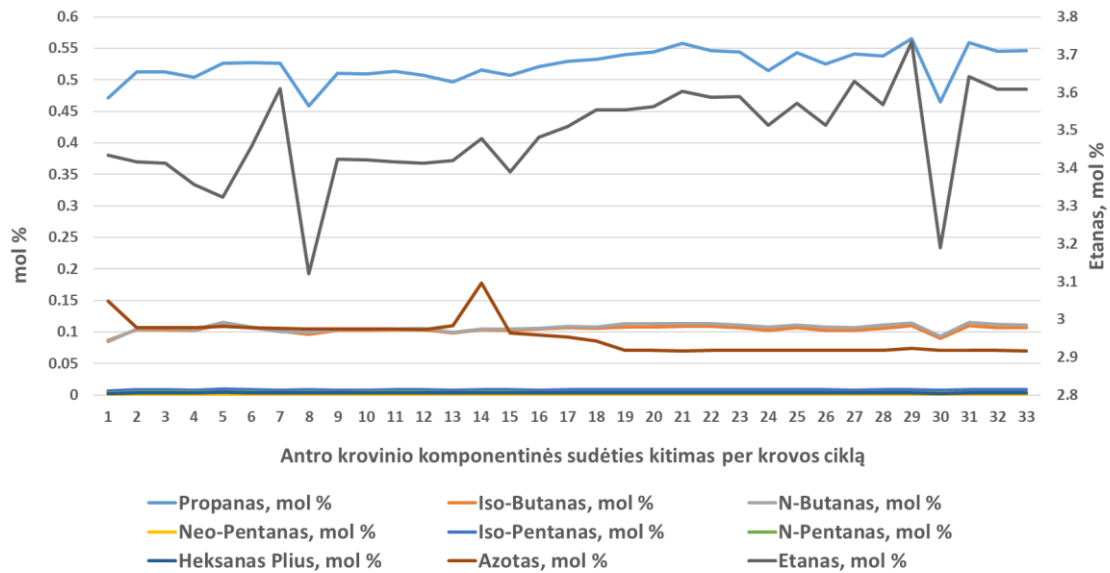
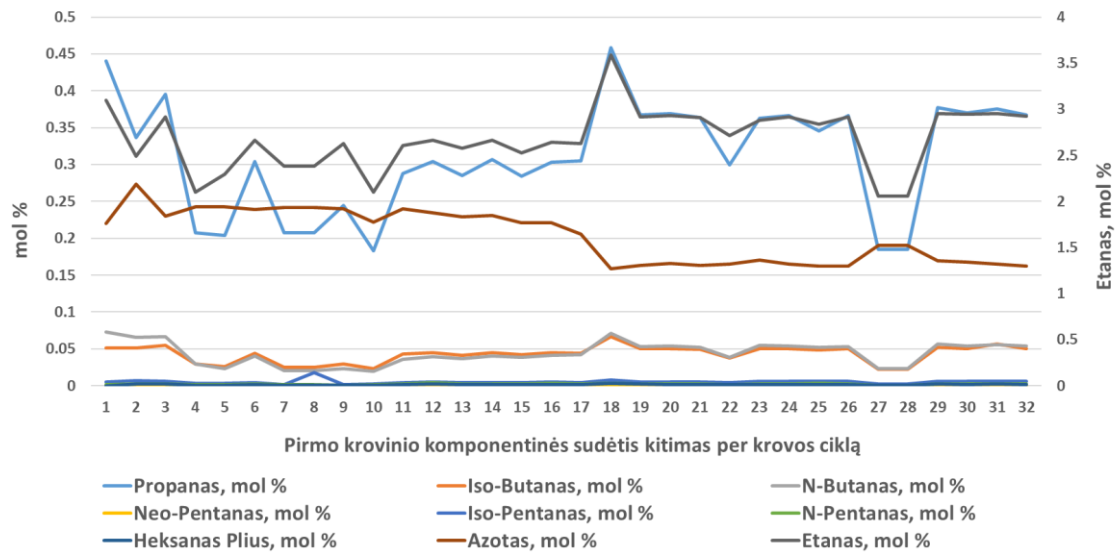
1 priedas. SkGD krovinio komponentinė sudėtis

	Laivas 1 - Pirmas krovinys 2019.04.03	Laivas 2 - Antras krovinys 2019.05.16	Laivas 3 - Trečias krovinys 2019.07.07	Laivas 4 - Ketvirtas krovinys 2019.08.27
Komponentinė sudėtis:				
Metanas, [mol %]	96.9957	97.402	92.4	91.7437
Etanas, [mol %]	2.4523	2.0524	5.5422	6.0304
Propanas, [mol %]	0.24	0.2176	1.26	1.4071
Iso-Butanas, [mol %]	0.0369	0.0469	0.1207	0.1381
N-Butanas, [mol %]	0.0242	0.0313	0.2718	0.3111
Neo-Pentanas, [mol %]	0	0	0	0
Iso-Pentanas, [mol %]	0.0038	0.0068	0.0175	0.0168
N-Pentanas, [mol %]	0.0026	0.0033	0.0031	0.0032
Heksanas Plius, [mol %]	0.002	0.006	0	0
Azotas, [mol %]	0.2422	0.2323	0.3791	0.3474
Anglies dioksidas, [mol %]	0.0001	0	0.0017	0.0022
SkGD temperatūra, [C]	-158	-156.5	-156.7	-156.8
SkGD tankis, [kg/m3]	427.15	423.84	442.35	444.86

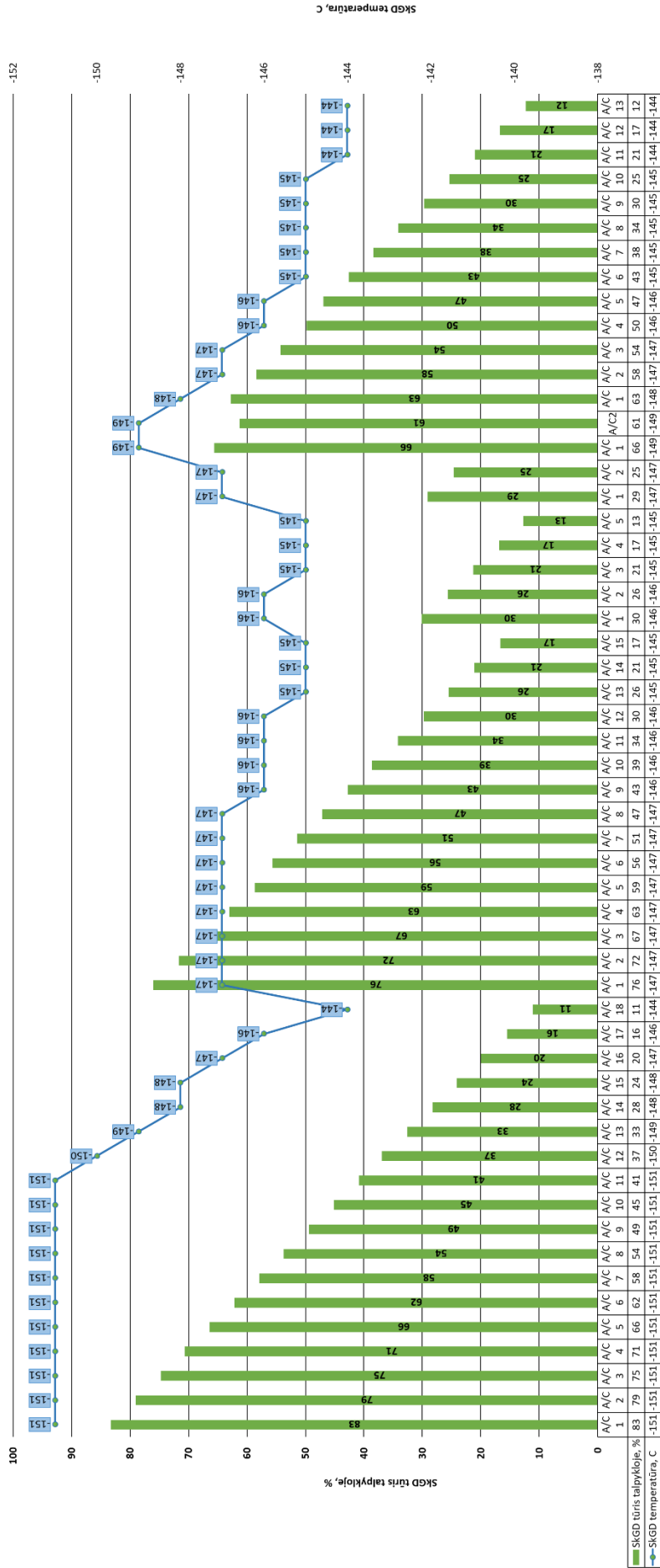
2 priedas. Metano skaičiaus kitimo priklausomybė nuo krovos į autocisterną operacijų skaičiaus, vykdant tris krovas iš laivų operacijas



3 priedas. SkGD komponentinės sudėties kitimo priklausomybė nuo krovos į autocisterną operacijų skaičiaus, vykdant tris krovas iš laivų operacijas.



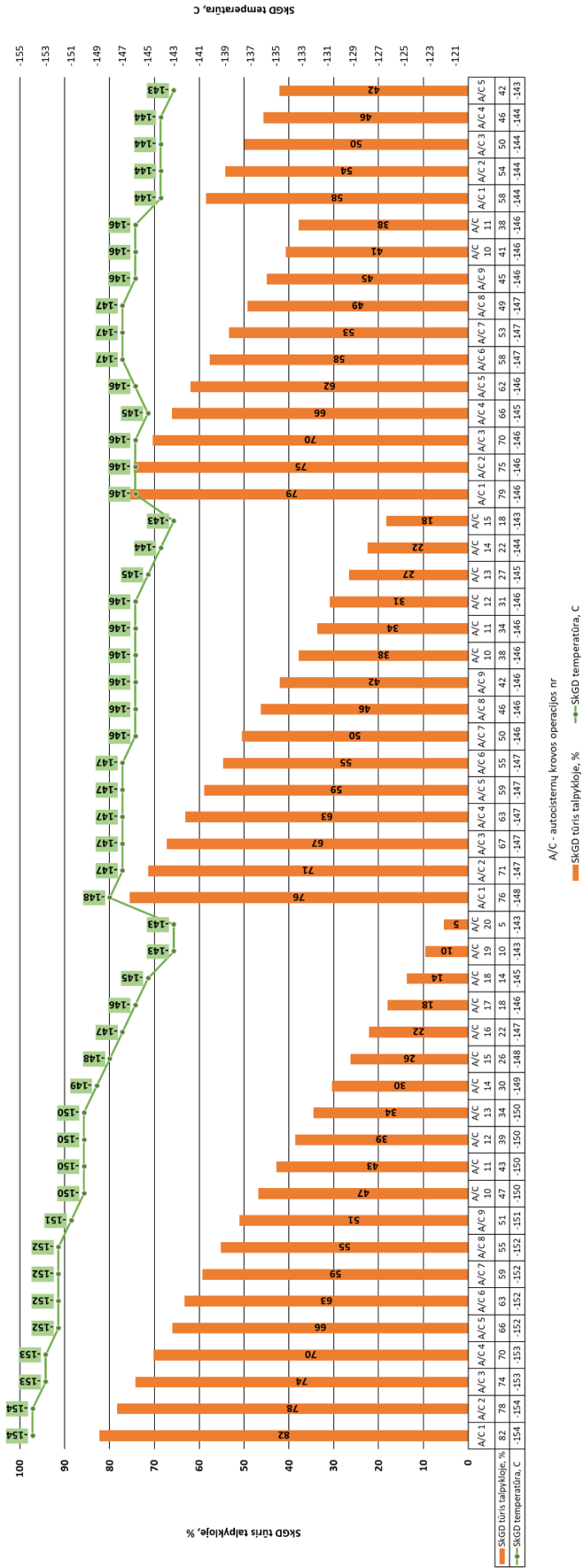
4 priedas. SkGD temperatūra ir SkGD tūris talpykloje (visas renkamu duomenų laikotarpis)



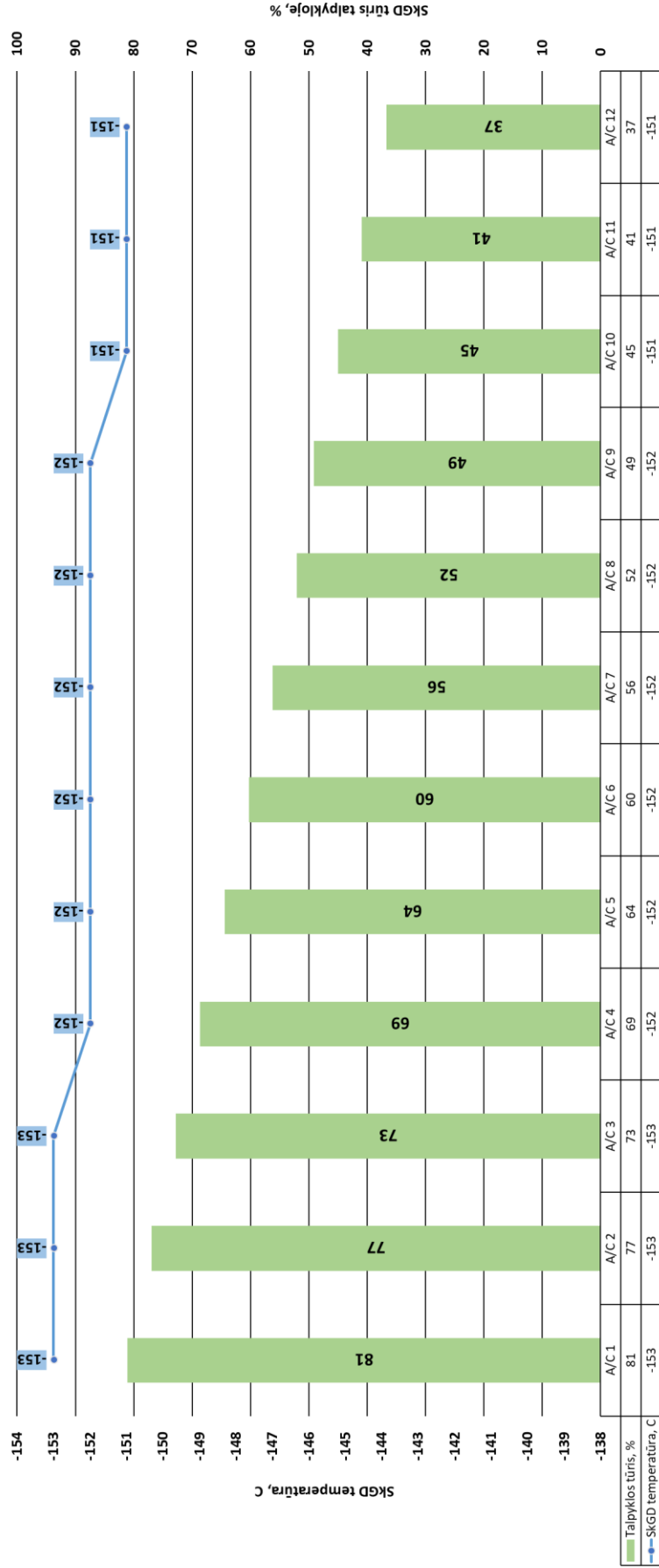
A/C - autocisternų krovos operacijos nr.
 ■ SkGD tūris talpykloje, %
 ● SkGD temperatūra, C

Antro krovinio temperatūros ir produkto lygio (T2) talpykloje kitimas.

4 priedo tęsinys



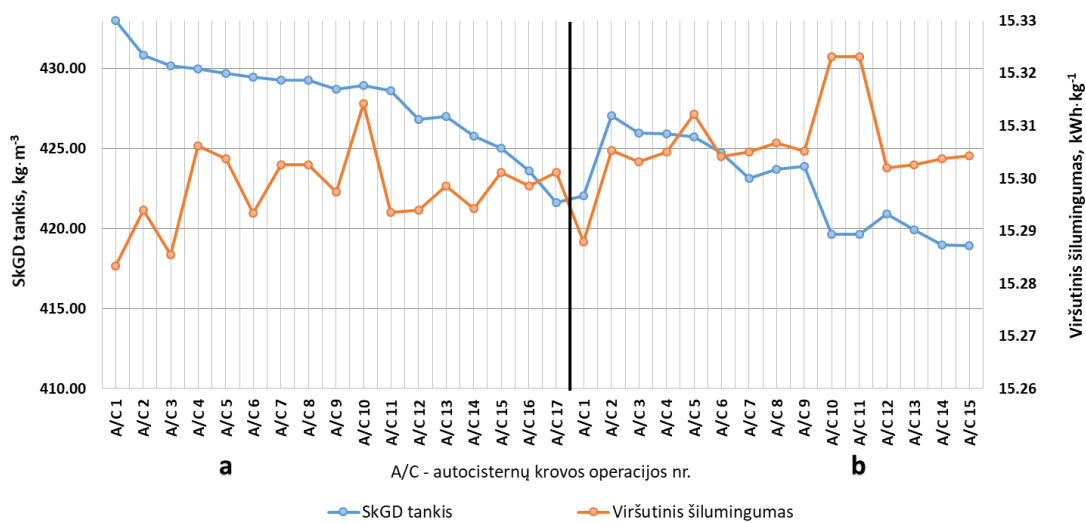
Trečio krovinio temperatūros ir produkto lygio (T2) talpykloje kėtimas



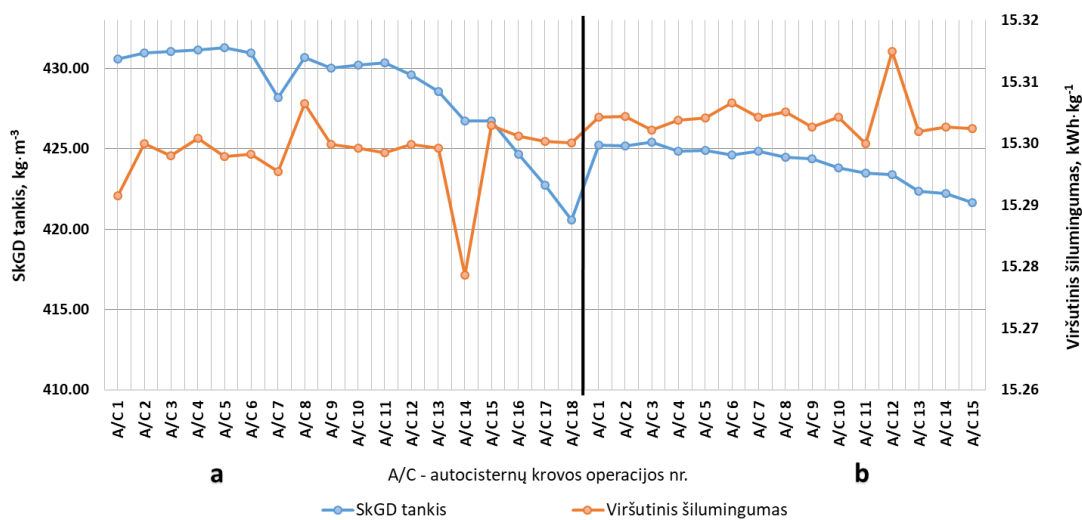
A/C - autocisternų krovos operacijos nr.

Ketvirto krovinio temperatūros ir produkto lygio talpykloje kitimas, po krovos iš T2 į A/C

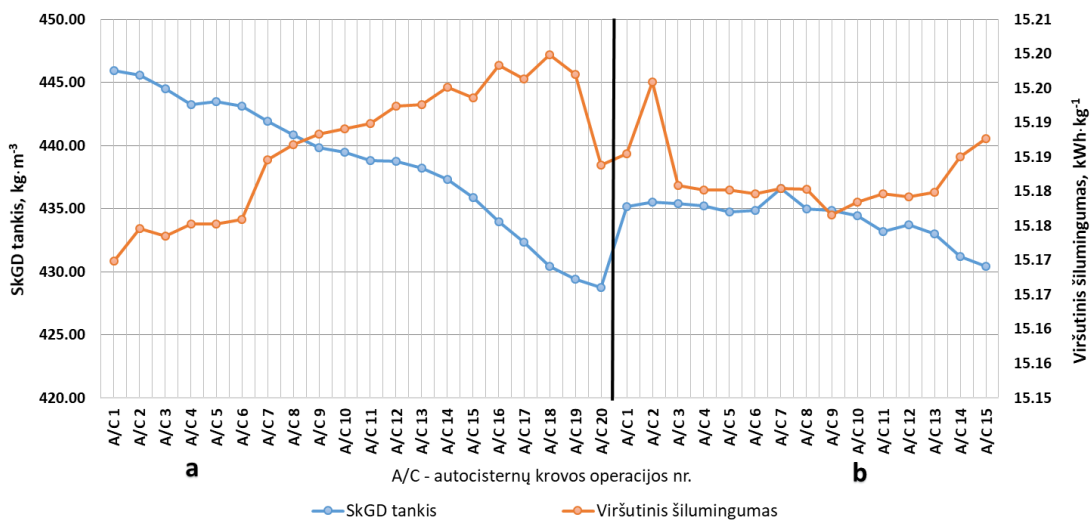
5 priedas. SkGD tankio ir viršutinio šilumingumo kitimo SkGD tendencija, vykdant krovą į autocisternas



Pirmas krovynys a) po krovos iš T2 į A/C; b) po krovos iš T4 į T2 ir kraunant A/C.

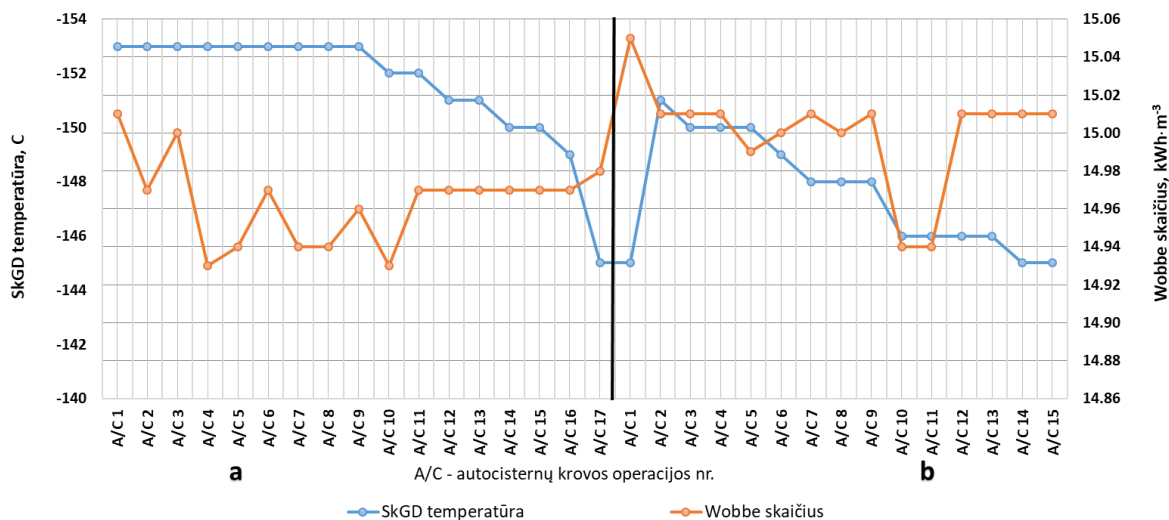


Antras krovynys: a) po krovos iš T2 į A/C; b) po krovos iš T3 į T2 ir kraunant A/C.

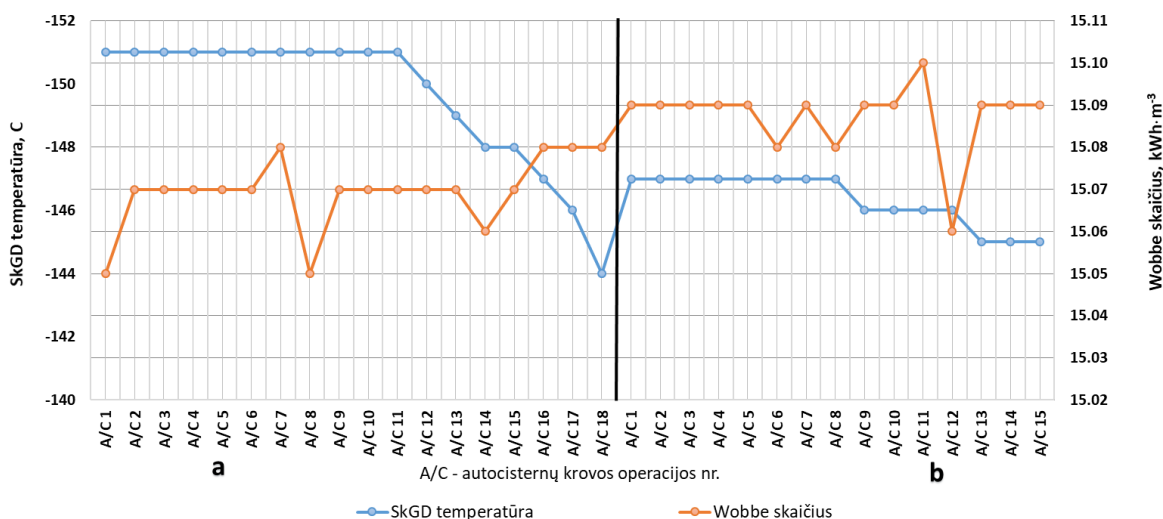


Trečias krovynys: a) po krovos iš T2 į A/C; b) po krovos iš T4 į T2 ir kraunant A/C.

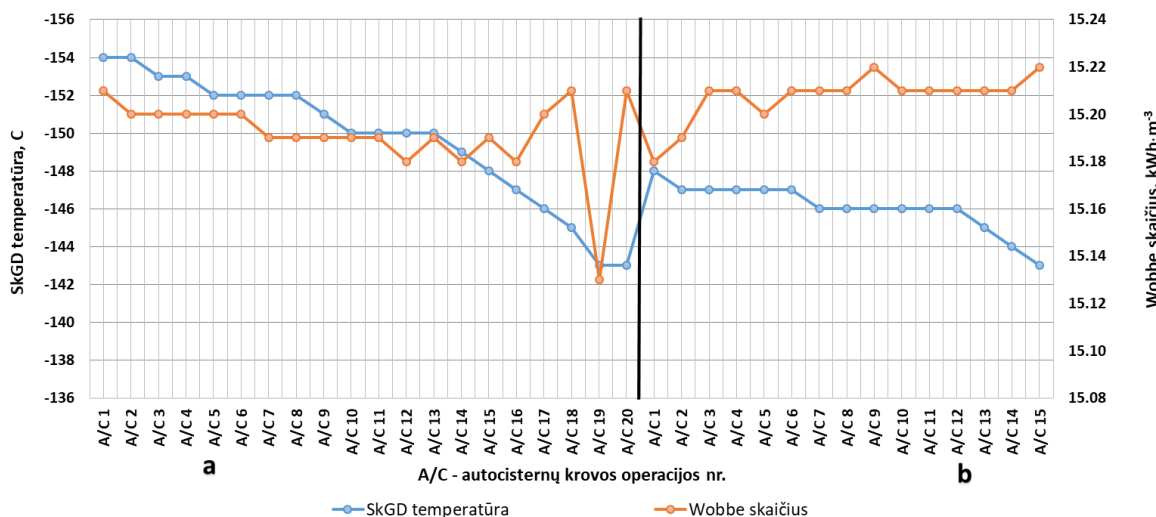
6 priedas. SkGD temperatūros ir Wobbe skaičiaus kitimo SkGD tendencija, vykdant krovą į autocisternas



Pirmas krovinys: a) po krovos iš T2 į A/C; b) po krovos iš T4 į T2 ir kraunant A/C.

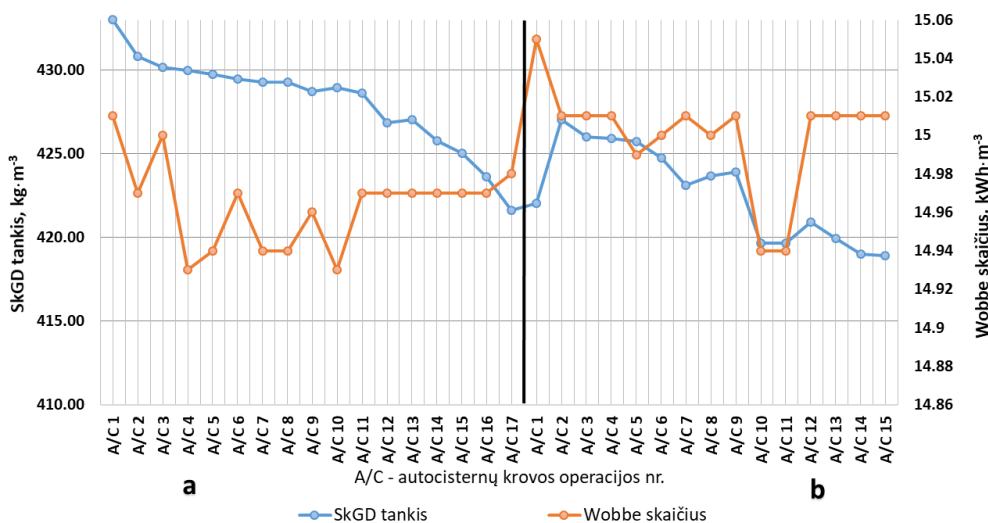


Antras krovinys: a) po krovos iš T2 į A/C; b) po krovos iš T3 į T2 ir kraunant A/C.

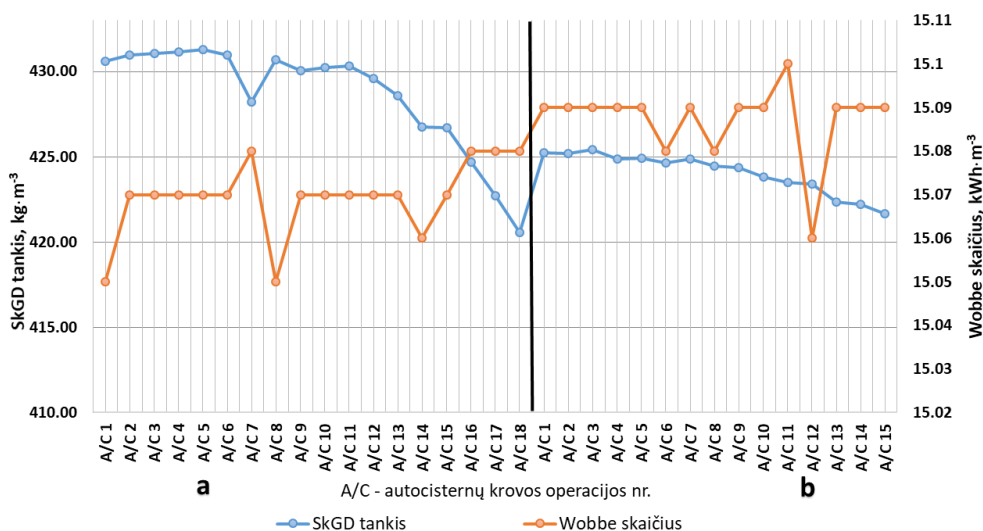


Trečias krovinys: a) po krovos iš T2 į A/C; b) po krovos iš T4 į T2 ir kraunant A/C.

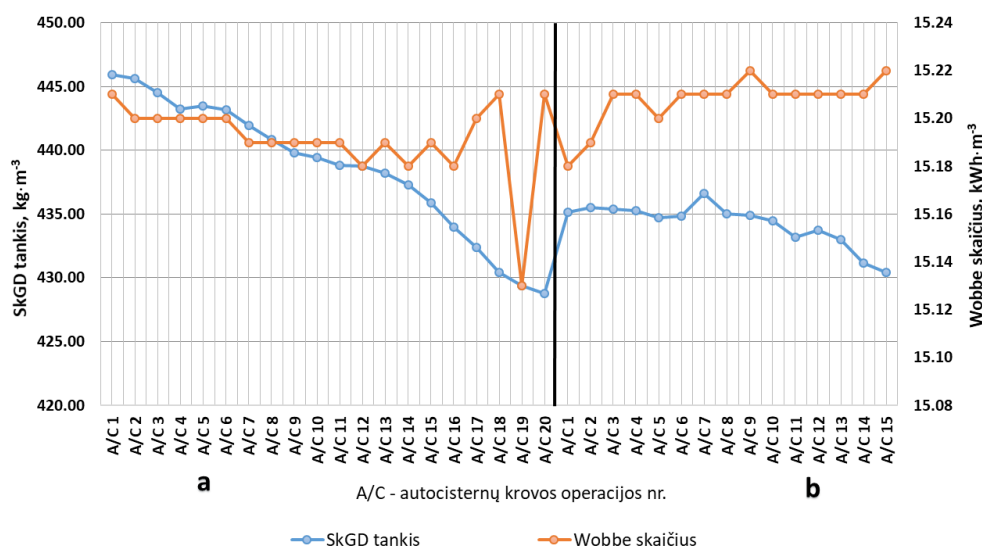
7 priedas. SkGD tankio ir Wobbe skaičiaus kitimo SkGD tendencija, vykdant krovą į autocisternas



Pirmas krovins: a) Po krovos iš T2 į A/C; b) Po krovos iš T4 į T2 ir kraunant A/C.



Antras krovins: a) po krovos iš T2 į A/C; b) po krovos iš T3 į T2 ir kraunant A/C.



Trečias krovins: a) po krovos iš T2 į A/C; b) po krovos iš T4 į T2 ir kraunant A/C.