



VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
MOBILIŲJŲ MAŠINŲ IR GELEŽINKELIŲ TRANSPORTO KATEDRA

Andrius Kaveckas

**NAFTOTIEKIO VAMZDYNE VYKSTANČIŲ HIDRODINAMINIŲ
PROCESŲ TYRIMAI ĮVERTINANT KAVITACIJĄ**

**INVESTIGATION OF HYDRODYNAMIC PROCESSES IN AN OIL
PIPELINE BY ASSESSING THE IMPACT OF CAVITATION**

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX058

Transporto inžinerijos vadybos specializacija

Transporto inžinerijos studijų kryptis

Vilnius, 2020

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
MOBILIŲJŲ MAŠINŲ IR GELEŽINKELIŲ TRANSPORTO KATEDRA

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)

Marijonas Bogdevičius

(Data)

Andrius Kaveckas

**NAFTOTIEKIO VAMZDYNE VYKSTANČIŲ HIDRODINAMINIŲ
PROCESŲ TYRIMAI ĮVERTINANT KAVITACIJĄ**

**INVESTIGATION OF HYDRODYNAMIC PROCESSES IN AN OIL
PIPELINE BY ASSESSING THE IMPACT OF CAVITATION**

Baigiamasis magistro darbas

Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas 6211EX058

Transporto inžinerijos vadybos specializacija

Transporto inžinerijos studijų kryptis

Vadovas	prof. habil. dr. Marijonas Bogdevičius	_____ (parašas)	_____ (data)
Konsultantas	_____	_____	_____
Konsultantas	_____	_____	_____
Lietuvių kalbos konsultantė	lekt. Angelika Petrėtienė	_____ (parašas)	_____ (data)

Vilnius, 2020

Vilniaus Gedimino technikos universiteto
egzaminų sesijų ir baigiamųjų darbų rengimo bei
gynimo organizavimo tvarkos aprašo 2011–2012
m. m.
2 priedas

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Andrius Kaveckas, 20171960

(Studento vardas ir pavardė, studento pažymėjimo Nr.)

Transporto inžinerijos fakultetas

(Fakultetas)

Transporto inžinerijos vadyba, TIVfm-18 grupė

(Studijų programa, akademinė grupė)

**BAIGIAMOJO DARBO
SĄŽININGUMO DEKLARACIJA**

2020 m. gegužės 28 d.
(Data)

Patvirtinu, kad mano baigiamasis darbas tema Naftotiekio vamzdyne vykstančių hidrodinaminių procesų tyrimai įvertinant kavitaciją patvirtintas 2017 m. gruodžio 11 d. dekanų potvarkiu Nr. 520ti, yra savarankiškai parašytas. Šiame darbe pateikta medžiaga nėra plagijuota. Tiesiogiai ar netiesiogiai panaudotos kitų šaltinių citatos pažymėtos literatūros nuorodose.

Mano darbo vadovas: _____ **prof. Habil. dr. Marijonas Bogdevičius** _____.

Kitų asmenų indėlio į parengtą baigiamąjį darbą nėra. Jokių įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

(Parašas)

ANDRIUS KAVECKAS
(Vardas ir pavardė)

Vilnius Gediminas Technical University Faculty of Transport Engineering Department of Mobile Machinery and Railway Transport	ISBN ISSN Copies No. Date-....-....
Transport Engineering study programme master thesis. Title: Investigation of Hydrodynamic Processes in an Oil Pipeline by Assessing the Impact of Cavitation Author Andrius Kaveckas Academic supervisor prof. habil. dr. Marijonas Bogdevičius	
Thesis language ☒ Lithuanian ☐ Foreign (English)	
Annotation The aim of this master thesis is to theoretically determine system's parameters which have an impact to the efficiency of an oil pipeline. Scholarly papers on the efficiency of oil pipelines, centrifugal pumps and a phenomenon of cavitation were overviewed. The characteristics of centrifugal pumps, technical parameters of an oil pipeline and its elements were described. Mathematical models of the pipeline and its elements were determined. The pressure, velocity and efficiency of the flow in each point of the pipeline were obtained by solving a system of nonlinear algebraic equations, which were solved utilizing the characteristics method. Structure: introduction, overview of scholarly papers, five chapters, conclusions, references. Thesis consist of 48 p. text without appendixes, 43 pictures, 8 tables, 33 bibliographical entries.	
Keywords: cavitation, centrifugal pump, oil, pipeline, efficiency.	

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS
TRANSPORTO INŽINERIJOS FAKULTETAS
MOBILIŲJŲ MAŠINŲ IR GELEŽINKELIŲ TRANSPORTO KATEDRA

Transporto inžinerijos studijų kryptis
Transporto inžinerijos studijų programa, valstybinis kodas
6211EX058
Transporto inžinerijos vadybos specializacija

TVIRTINU
Katedros vedėjas

(Parašas)
Marijonas BOGDEVICHIUS
(Vardas, pavardė)

(Data)

BAIGIAMOJO MAGISTRO DARBO
UŽDUOTIS

.....Nr.
Vilnius

Studentui Andriui Kaveckui.....
(Vardas, pavardė)

Baigiamojo darbo tema:
Naftotiekio vamzdyne vykstančių hidrodinaminių procesų tyrimai įvertinant kavitaciją

patvirtinta 2017 m. gruodžio 11 d. dekanų potvarkiu Nr. 520ti.

Baigiamojo darbo užbaigimo terminas 20.....m. d.

BAIGIAMOJO DARBO UŽDUOTIS:

Atlikti mokslinių darbų analizę nagrinėjama tematika. Susipažinti su Būtingės terminalo struktūra ir naudojamų įrenginių techniniais parametrais bei transportuojamos naftos fizinėmis savybėmis. Sukurti sistemos „talpa – įsiurbimo magistralė – pirmas siurblys“ ir magistralinio naftotiekio matematinius modelius. Atlikti nagrinėjamų sistemų teorinius tyrimus. Pateikti išvadas.

Baigiamojo darbo rengimo konsultantai:

.....
.....
.....
.....

(Moksl. laipsnis/pedag. vardas, vardas, pavardė)

Vadovas
(Parašas)

.....hab. dr. prof. Marijonas Bogdevičius.....
(Moksl. laipsnis/pedag.vardas, vardas, pavardė)

Užduotį gavau

.....
(Parašas)
.....Andrius Kaveckas.....
(Vardas, pavardė)
.....
(Data)

Turinys

Paveikslų sąrašas	4
Lentelių sąrašas.....	4
Įvadas.....	5
1. Mokslinių darbų analizė.....	7
2. Transportuojamos naftos fizinės ir mechaninės savybės	11
3. Magistralinio vamzdyno sudėtis.....	16
3.1. Išcentriniai siurbiai ir jų charakteristikos	16
3.2. Naftos rezervuarų ir įsiurbimo magistralių techniniai parametrai	20
3.3. Magistralinio vamzdyno techniniai parametrai, lemiantys kavitacijos reiškinių atsiradimą	21
4. Magistralinio vamzdyno ir jo elementų matematiniai modeliai.....	23
4.1. Sistemos REZERVUARAS–ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIS SIURBLYS matematiniai modeliai	23
4.2. Sistemos ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIAI SIURBLIAI–MAGISTRALINIS NAFTOTIEKIS matematinis modelis	27
5. Magistralinio vamzdyno teorinių tyrimų rezultatai ir analizė	28
5.1. Sistemoje REZERVUARAS–ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIS SIURBLYS vykstančių hidrodinaminių procesų tyrimo rezultatai ir analizė	28
5.2. Sistemoje REZERVUARAS–ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIAI SIURBLIAI–MAGISTRALINIS NAFTOTIEKIS vykstančių hidrodinaminių procesų tyrimo rezultatai ir analizė	35
Išvados	46
Literatūra	47

Paveikslų sąrašas

3.1 pav.	Slėgio priklausomybė nuo keturių siurblių sistemos charakteristikos.....	19
4.1 pav.	Sistema REZERVUARAS–ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIAI SIURBLIAI–MAGISTRALINIS NAFTOTIEKIS.....	23
4.2 pav.	Taško koordinatčių nustatymo, naudojant charakteristikų metodą, schema.....	26
4.3 pav.	Magistralinio vamzdžio Būtingės terminalas–Mažeikių naftos perdirbimo produktų gamykla profilis.....	27
5.1 pav.	Slėgio kitimas nuo greičio, kai $v = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $p_L = 0 \text{ Pa}$	28
5.2 pav.	Slėgio kitimas nuo greičio, kai $v = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $p_L = -0,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$	29
5.3 pav.	Slėgio kitimas nuo greičio, kai $v = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $p_L = 0,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$	29
5.4 pav.	Slėgio kitimas nuo greičio, kai $v = 20,583 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $p_L = 0 \text{ Pa}$	30
5.5 pav.	Slėgio kitimas nuo greičio, kai $v = 20,583 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $p_L = -0,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$	30
5.6 pav.	Slėgio kitimas nuo greičio, kai $v = 20,583 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $p_L = 0,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$	30
5.7 pav.	Slėgio kitimas nuo greičio, kai $v = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $p_L = 0 \text{ Pa}$	31
5.8 pav.	Slėgio kitimas nuo greičio, kai $v = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $p_L = -0,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$	31
5.9 pav.	Slėgio kitimas nuo greičio, kai $v = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $p_L = 0,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$	31
5.10 pav.	Slėgio kitimas įsiurbimo magistralėje, kai $H = 1 \text{ m}$	33
5.11 pav.	Slėgio kitimas įsiurbimo magistralėje, kai $H = 16,5 \text{ m}$	34
5.12 pav.	Greičio kitimas įsiurbimo magistralėje, kai $H = 1 \text{ m}$	34
5.13 pav.	Greičio kitimas įsiurbimo magistralėje, kai $H = 16,5 \text{ m}$	34
5.14 pav.	Naftos tankio priklausomybė nuo santykinio dujų tūrio.....	36
5.15 pav.	Tūrinio tamprumo modulio priklausomybė nuo santykinio dujų tūrio.....	36
5.16 pav.	Slėgio kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $v = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0$	36
5.17 pav.	Slėgio kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $v = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0$	37
5.18 pav.	Našumo kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $v = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0$	37
5.19 pav.	Našumo kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $v = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0$	38
5.20 pav.	Slėgio kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $v = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,1$	38
5.21 pav.	Slėgio kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $v = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,1$	38
5.22 pav.	Našumo kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $v = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,1$	39
5.23 pav.	Našumo kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $v = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,1$	39
5.24 pav.	Slėgio kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $v = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,2$	40
5.25 pav.	Slėgio kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $v = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,2$	40
5.26 pav.	Našumo kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $v = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,2$	40
5.27 pav.	Našumo kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $v = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,2$	41
5.28 pav.	Slėgio kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $v = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0$	41
5.29 pav.	Slėgio kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $v = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0$	41
5.30 pav.	Našumo kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $v = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0$	42
5.31 pav.	Našumo kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $v = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0$	42
5.32 pav.	Slėgio kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $v = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,1$	42
5.33 pav.	Slėgio kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $v = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,1$	43
5.34 pav.	Našumo kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $v = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,1$	43
5.35 pav.	Našumo kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $v = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,1$	43
5.36 pav.	Slėgio kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $v = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,2$	44
5.37 pav.	Slėgio kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $v = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,2$	44
5.38 pav.	Našumo kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $v = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,2$	44
5.39 pav.	Našumo kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $v = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,2$	45

Lentelių sąrašas

1 lentelė.	Naftos rūšių klampa, atsižvelgiant į temperatūrą.....	14
2 lentelė.	Elektros variklių pagrindiniai parametrai.....	18
3 lentelė.	Vamzdinių ilgiai nuo rezervuarų iki pirmojo siurblio.....	20
4 lentelė.	Tekėjimo greičio ir debito reikšmės, kai $p_L = 0 \text{ Pa}$	32
5 lentelė.	Tekėjimo greičio ir debito reikšmės, kai $p_L = -0,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$	32
6 lentelė.	Tekėjimo greičio ir debito reikšmės, kai $p_L = 0,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$	33
7 lentelė.	Vamzdžio koordinatės (metrais), kuriose pateikiami slėgių ir debitų kitimai laike.....	35
8 lentelė.	Vamzdžio našumas, esant skirtingoms santykinio dujų tūrio ir naftos klamos reikšmėms.....	45

Ivadas

Nafta iš žemės gelmių išgaunama gręžiant gavybos gręžinius, dažnai iki 3–5 km gylio. Kadangi žemės gelmėse naftos telkiniai būna gana dideli ir nafta yra veikiamą didelio slėgio, išgręžus gręžinį iš pradžių ji dažniausiai trykšta savaime, o naftos telkinyje ima mažėti, krinta jos slėgis ir naftos gavyba iš tokio telkinio tęsiama naudojant įvairias priverstines technines ir technologines priemones – svirtinius arba kito tipo naftos siurblius, dujų liftinį pakėlimą ir pan.

Naftotiekiu paprastai yra vadinamas vamzdynas, kuriuo transportuojama ne tik nafta, bet ir įvairūs naftos produktai: mazutas, žibalas, benzinai. Magistraliniais naftotiekiais priimta vadinti didelio ilgio vamzdynus, kurių ilgis daugiau kaip 50 kilometrų, o skersmuo nuo 219 iki 1420 milimetrų, ir kuriais transportavimas atliekamas panaudojant siurblius.

2006 m. į Lietuvą atėjus lenkiško kapitalo energetikos koncernui PKN ORLEN S.A., kuris tuo metu valdė beveik 85 proc. AB „Mažeikių nafta“ akcijų, 2009 m. šis koncernas tapo vieninteliu akcininku ir bendrovė pervadinta į AB „ORLEN Lietuva“. Akcinę bendrovę „ORLEN Lietuva“ sudaro nuo 1980 m. dirbanti Mažeikių naftos perdirbimo produktų gamykla, nuo 1999 m. pradėjęs veikti Būtingės terminalas bei nuo 1970 m. naftą ir jos produktus pumpuojantis Biržų naftotiekis. Mažeikių naftos perdirbimo produktų gamykla yra 18 km į šiaurės vakarus nuo Mažeikių miesto, netoli (apie 90 km) nuo veikiančių Būtingės, Klaipėdos ir Ventspilio (Latvija) terminalų. Nuo 2002 m. pavasario į vieną – vamzdynų ir terminalo – padalinį sujungti šiauriausiam Lietuvos rajone įsikūrus Biržų filialas, kurį su Mažeikių naftos perdirbimo produktų gamykla jungia 220 km naftotiekio atšaka, ir Būtingės filialas, ant Baltijos jūros kranto pastatytas reversinis naftos eksporto ir importo terminalas, kurį su Mažeikių naftos perdirbimo produktų gamykla jungia 91,5 km ilgio naftotiekis.

Būtingės terminalas – reversinis naftos eksporto ir importo terminalas, skirtas žaliavinei naftai kaupti, saugoti ir transportuoti nuo kranto į tanklaivį jūroje (eksportuoti), arba atvirkščiai – iš tanklaivio į krantą (importuoti). Naftai saugoti Būtingės terminale skirtos 6 talpos: trys talpos po 50 000 kubinių metrų ir trys talpos po 52 000 kubinių metrų. Naftą iš šių talpų pumpuoja 7 išcentriniai siurbliai, iš kurių du yra dvigubo įsiurbimo, užtikrinantys reikalingą įsiurbimo slėgį. Siurbliai sujungti vamzdžiais taip, kad galėtų veikti lygiagrečiai arba nuosekliai. Eksporto režimu šie siurbliai dirba lygiagrečiai ir pumpuoja naftą 36 colių skersmens povandeniniu vamzdynu per vienataškį švartavimosi plūdūrą (SPM) į tanklaivius. Importui nafta gaunama iš tanklaivio į Būtingės terminalo talpas, iš čia nuosekliai sujungtais naftos siurbliais pumpuojama magistraliniu vamzdynu į Mažeikių naftos perdirbimo įmonės talpas (Jonikas, 2009).

Problemos aktualumas

Naftos ir jos produktų transportavimas bei naftos perdirbimo specifiškumas suponuoja tai, jog naftos perdirbimo įmonės privalo vis didesnę reikšmę skirti logistikai. Naftos perdirbimo įmonės negali kontroliuoti nei žaliavinės naftos, nei naftos produktų kainų, kadangi pastarosios priklauso nuo

pasaulinių ekonominių pokyčių, pasiūlos ir paklausos, OPEC (angl. *The Organization of the Petroleum Exporting Countries*) sprendimų, ir t. t.

Mažėjant pasaulinei naftos produktų paklausai, naftos perdirbimo įmonės yra priverstos mažinti gamybos apimtis, arba konkuruoti mažesne produktų kaina. Atsižvelgdamos į tai, naftos perdirbimo įmonės iškelia siekį mažinti visų veiklos sričių išlaidas, kur didžiausią įtaką naftos transportavimo magistraliniu naftotiekiu kainai turi išlaidos elektros energijai.

Drastiškas transportavimo išlaidų mažinimas kelia riziką transportavimo našumui, kadangi tokiu atveju kiltų rizika nepakankamai aprūpinti naftos perdirbimo gamyklą žaliavine nafta. Atsižvelgiant į tai, didėjant naftos perdirbimo apimtims tikslinga didinti vamzdynų našumą ir efektyviai naudoti energijos išteklius.

Vienas iš būdų sumažinti naftos transportavimo vamzdynais energijos išlaidas yra antiturbulentinių polimerinių naftos priedų naudojimas. Šie priedai, galintys pakeisti naftos reologines charakteristikas, sumažina hidraulinį pasipriešinimą ir reikšmingai sumažina naftą pumpuojančių išcentrinių siurblių sunaudojamos elektros energijos išlaidas (Bogdevičius, Janutėnienė, Jonikas, Guseinovienė ir Drakšas, 2013).

Kita vertus, naftos perdirbimo įmonės, siekdamos mažinti naftos transportavimo vamzdynais išlaidas ir didinti naftotiekių našumą, transportuoja kelių naftos rūšių mišinius, taip reguliuodamos transportuojamos naftos klampą, kuri daro didelę įtaką naftotiekio našumui.

Pažymėtina, kad tam tikrose naftotiekio vamzdžio dalyse ar atšakose susiformuoja vidinės parafino, dervų sankaupos, kurios, sumažindamos naftos tekėjimo vamzdžiu skersmenį, daro įtaką magistralinio vamzdžio našumui.

Tyrimo objektas – sistema REZERVUARAS – ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ – IŠCENTRINIAI SIURBLIAI – MAGISTRALINIS NAFTOTIEKIS.

Darbo tikslas – nustatyti sistemos REZERVUARAS–ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIAI SIURBLIAI–MAGISTRALINIS NAFTOTIEKIS parametrus, kurie daro įtaką naftotiekio našumui.

Pagrindiniai uždaviniai:

- 1) Atlikti naftos transportavimo magistraliniu naftotiekiu mokslinių darbų analizę.
- 2) Susipažinti su Būtingės terminalo talpyklų parko struktūra, sistemos REZERVUARAS–ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIS SIURBLYS–MAGISTRALINIS NAFTOTIEKIS techniniais parametrais ir transportuojamos naftos fizikinėmis bei cheminėmis savybėmis.
- 3) Sukurti sistemos REZERVUARAS–ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIAI SIURBLIAI–MAGISTRALINIS NAFTOTIEKIS matematinius modelius.
- 4) Išnagrinėti sistemoje REZERVUARAS–ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIS SIURBLYS vykstančius hidrodinaminius procesus.
- 5) Išnagrinėti sistemoje ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIAI SIURBLIAI–MAGISTRALINIS NAFTOTIEKIS vykstančius hidrodinaminius procesus.

6) Suformuluoti apibendrintas išvadas.

Uždavinių sprendimo metodai:

Uždaviniams spręsti naudojami pagrindiniai skysčių mechanikos teiginiai. Naftos judėjimo vamzdyne lygčių sistemai spręsti naudojamas charakteristikų metodas.

Mokslinis naujumas. Atlikti naftos tekėjimo greičio ir debito įsiurbimo magistralėje skaičiavimai, esant skirtingiems rezervuarų modeliams, jų užpildymo aukščiams, vamzdžių skersmenims, naftos klampai, temperatūrai, bei įvertinant santykinio dujų tūrio naftos mišinyje reikšmę.

1. Mokslinių darbų analizė

Energetiniai naftos transportavimo vamzdynais kaštai yra vienas iš svarbiausių aspektų naftos gavybos bendrovėms, kadangi naftos gavybos ir transportavimo procesas reikalauja didelių energijos sąnaudų (Bogdevičius et al., 2013). Siurbliams tenkančios apkrovos nuolat keičiasi, taip sunaudojant didelius kiekius elektros energijos. Naftos pumpavimo režimų optimizavimas gali padidinti tiek naftos tekėjimo pralaidumą, tiek elektrinių variklių našumą. Išaugusius energijos suvartojimo kaštus labiausiai veikia tos vamzdynų dalys ir atkarpos, kuriose susiformuoja vidinės smėlio, parafino ar dervų sankaupos. Būtent ši problema tampa aktualiausia transportuojant didelės klampos, neapdirbtą naftą (Bogdevičius et al., 2013). Susikaupęs parafinas (kietų sočiųjų naftos angliavandenilių mišinys) daro neigiamą įtaką naftos transportavimui. Nusėdamas ant vamzdžio sienelių, parafinas sumažina naftos tekėjimo skerspjūvį bei transportavimo našumą, todėl vidinės magistralinio naftotiekio ertmės (sienelės) valymas yra neatsiejamas technologinio proceso elementas. Dėl sumažėjusio vamzdžio vidinio skersmens tam tikrais atvejais vamzdyne gali susidaryti kamščiai, dėl kurių atsiranda gamybiniai ir ekonominiai nuostoliai, ypač tais atvejais, kai vamzdynų priežiūra yra netinkama (Obaseki and Paul, 2020).

Naftos ir jos produktų transportavimo procesams tobulinti pasiūlyta naudoti chemines priemones (priedus ir reagentus), kurios labai pagerina pumpuojamos naftos ir jos produktų reologines savybes, sumažina energijos sąnaudas. Cheminių priemonių panaudojimas vamzdynuose prasidėjo nuo naftos perdirbimo produktų, tokių kaip žibalo ir benzino distiliatų panaudojimo vamzdynų plovimui. 1950 m. pradžioje didelės klampos naftą buvo pasiūlyta transportuoti kartu su vandeniniais tirpalais.

Vėliau šią naftą pradėta transportuoti karštuoju būdu. Toks būdas yra paremtas tuo, kad didėjant temperatūrai mažėja klampa, dėl ko naftos pumpavimas reikalauja mažiau energetinių išteklių. Naftos kaitinimas padeda užtikrinti reikiamus žaliavinės naftos tekėjimo vamzdynu parametrus, sumažinti tekėjimo trintį, tačiau, norint sumažinti naftos klampą bei pagerinti naftos tekėjimą, būtina kaitinti ne tik naftą, bet ir patį vamzdyną (Hart, 2014). Vis dėlto, kaitinimas pakeičia naftos struktūrą makromolekuliniu lygmeniu, dėl ko naftos tekėjimas tampa nestabilus. Be to, transportuojant naftą patiriami šilumos nuostoliai, todėl kaitinimas reikalauja papildomų ekonominių išteklių, užtikrinant pakankamą kiekį tarpinių stočių, skirtų palaikyti vamzdžio kaitinimo temperatūrą (Ibrahim, Odah and Al-Mufti, 2019).

Chemijos pramonės raida ir moksliniai tyrimai šioje srityje padėjo sukurti depresantus (tai medžiagos, silpninančios koki nors procesą), kurie labai pakeitė pumpuojamos naftos su padidintu parafino kiekiu reologines savybes. Naftai ir jos produktams skirti depresantai – tai naftoje tirpūs sintetiniai polimeriniai produktai, kurie nedideliais kiekiais sumaišyti su mazutu ar didesnį parafino kiekį turinčia nafta geba pakeisti jos reologines savybes, ypač klampą ir pajudėjimo įtempimą. Šio priedo panaudojimas iš esmės pakeičia daug parafino turinčios naftos kristalizacijos procesą. Naftos temperatūrai artėjant prie stingimo temperatūros, jos, kaip ir neniutoninių skysčių, klampa keičiasi priklausomai nuo slėgio. Taip atsitinka dėl tirpių parafinų ir asfalteninės medžiagos, sudarančios tarp molekulinis ryšius ir formuojančios struktūrą.

Pagrindinės problemos, kylančios perpumpuojant didelės klampos naftą, susijusios su mažų jų paslankumu, aukšta stingimo temperatūra, o jei didelė klampa nulemta didelio parafino kiekio – parafino nusėdimu ant vamzdyno sienelių. Siekiant sumažinti energijos sąnaudas šiai naftai transportuoti, XX a. 6-ajame dešimtmetyje buvo atlikti hidraulinio pasipriešinimo mažinimo tyrimai, numatantys naftos pumpavimą kartu su vandeniu. Šis metodas pagrįstas pasienio sluoksnio slydimo efektu, kai vienas skystis slysta kito skysčio paviršiumi. Vis dėlto, dėl didelio naftos ir vandens tankių skirtumo, nafta vamzdyje yra keliama virš vandens, todėl ypač sunku sudaryti vandens žiedą vamzdyje. Be to, skysčių greičių skirtumai sąlygoja bangavimo naftos ir vandens sąlyčio paviršiuje atsiradimą, o tai dar labiau apsunkina žiedinio tekėjimo stabilumą (Ibrahim et al., 2019). Šis metodas nepasitvirtino dėl naftos su vandeniu sudarančių emulsijų patvarumo bei sunkumų sudarant vandens žiedą vamzdyje, kadangi stabilus žiedinis tekėjimas gali egzistuoti tik su panašaus tankio skysčiais.

Vienas iš būdų minimizuoti klampios naftos transportavimo vamzdynais kaštus, yra pasitelkti elektrinį ar magnetinį lauką. Pasitelkiant elektrinį lauką, išskirtinumas yra toks, kad laikinai sujungiamos parafino ir asfalteno dalelės į trumpas grandines išilgai tekėjimo krypties. Toks dalelių sujungimas pakeičia žaliavinės naftos reologines savybes ir mažina klampą. Eksperimentų metu (Du, Zhao, Xiao, Cai and Tao, 2018) didelį kiekį asfalteno turinčią žaliavinę naftą veikiant 1,612 kV/mm elektros lauko stipriui ir esant 23 °C temperatūrai, pastebėta, kad naftos dinaminė klampa sumažėjo beveik dvigubai – nuo 715,8 mPa·s iki 383,4 mPa·s, o veikiant 1,704 kV/mm elektros lauko stipriui ir esant 16 °C temperatūrai – dinaminė klampa sumažėja nuo 1821,2 mPa·s iki 1022 mPa·s. Vis dėlto, klampos sumažėjimas yra laikinas, trunka iki kelių valandų, todėl šį procesą reikia kartoti, be to, daug asfalto turinčioje žaliavinėje naftoje yra tam tikras kiekis vandens, todėl gali kilti elektros iškrovos sukeltos kibirkštys (Ibrahim et al., 2019). Atsižvelgiant į tai, pasitelkti magnetinį lauką yra saugiau.

Pirmieji išcentrinų siurblių veikimo pumpuojant klampius skysčius tyrimai XX amžiaus antrojoje pusėje buvo atliekami neturint pakankamų žinių apie pačių klampių skysčių tekėjimą išcentrinuose siurbliuose. Eksperimentiniai tyrimai patys savaime nėra pakankami, jie reikalauja nemažų laiko ir finansinių išteklių, be to, jie turi būti paremti teoriniais tyrimais tam, kad būtų išsiaiškinti siurblio viduje vykstantys procesai. Be to, turi būti atlikti išsamūs išcentrinio siurblio ir jo komponentų tyrimai, pradedant rotoriumi, turinčiu mentes, kurios perduoda iš variklio gautą energiją skysčiui padidindamos slėgį ir greitį (Omar, Khaldi and Ladouani, 2017).

Vis dėlto, siurbLIAI patiria mechaninių gedimų, hidraulinių nuostolių, kurie turi neigiamos įtakos siurblių veikimui ir našumui. Visa tai rodo, kad siurblių našumo prognozavimas yra ypač svarbus siurblių gamybos stadijoje.

Hidrauliniai nuostoliai išcentriname siurblyje ir jo komponentuose atsiranda dėl trinties ir skysčio turbulentinės tėkmės. Trinties nuostoliai priklauso nuo darbinės skysčio klampios, kuri daro įtaką siurblio našumui. Atkreiptinas dėmesys, jog tai yra todėl, kad labai klampių skysčių tekėjimas paprastai yra laminarinis, tad siurblio rotorius šoninių sienelių bei hidraulinių kanalų šiurkštumas neturi didelės reikšmės darbui su klampiais skysčiais (Shojaeefard, Salimian Rizi, Khalkhali and Tahani, 2015).

Mokslininkams tyrinėjant skysčių klampumo įtaką išcentrinio siurblio veikimui, Shojaeefard et al. (2007, 2012) atliko tyrimus, siekdami optimizuoti išcentrinio siurblio geometriją klampių skysčių pumpavimui. Eksperimentiškai ir pasitelkiant matematinius skaičiavimus buvo tiriami tokie parametrai, kaip siurblio rotorius paviršiaus šiurkštumas, rotorius menčių skaičius, tekėjimo skerspjūvio dydis, menčių sukimosi kampas bei paties rotorius tipas (uždaras ar pusiau uždaras). Kitų tyrimų (Shojaeefard et al., 2015) metu mokslininkai pasiūlė naują metodą (kompiuterinį kodą), skirtą apskaičiuoti slėgio aukštį (H), našumą (η) ir įėjimo galią (P_{in}), remiantis pramoninę naftą pumpuojančių siurblių nuostolių analize.

Išcentriname siurblyje beveik neišvengiami yra kavitacijos procesai, kurie mažina siurblio našumą, sukuria papildomų vibracijų, kelia triukšmą (Bogdevičius P., Prentkovskis ir Bogdevičius M., 2017). Šie procesai tiriami daugybės mokslininkų. Duplaa, Coutier-Delgosha, Dazin, Caignaert ir Roussette (2008) nagrinėjo kavitacijos poveikį išcentriniam siurbliui variklio paleidimo metu. Timouchev, Panaiotti, Knyazev ir Soldatov (2009) nagrinėjo naują metodą, siekdami įvertinti kavitacijos sukeltus pažeidimus ant siurblio rotorius paviršiaus. Hou-lin, Wang J., Wang Y., Zhang ir Huang (2014) ištyrė, kokia yra išcentrinio siurblio kavitacijos srautui daroma kavitacijos modelio koeficientų įtaka, ir nustatė, jog tik tiksliai nustačius kondensacijos koeficientą gaunami tikslesni rezultatai.

Kavitacija ir su ja susiję vyksmai yra sudėtingas reiškinys, kuris egzistuoja daugelyje hidraulinių įrenginių. Pagrindinės problemos, kurias sukelia kavitacija siurbliuose, yra susijusios su nestabiliu skysčių tekėjimu, išcentrinio siurblio darbinio veikimo laiko sumažėjimu, vibracija ir triukšmingu darbu, siurblio našumo sumažėjimu bei erozijos sukeltais pažeidimais vidinėse vamzdžių sienelėse. Atsižvelgiant į tai, yra svarbu žinoti ir identifikuoti kavitacijos pradžią bei visą procesą siurblyje tam, kad nebūtų leista siurbliui veikti kavitacijos sąlygomis (Lu et al., 2017).

Li, Yuan, Pan, Juan ir Fu (2013) bei Lu et al. (2016) nustatė, kad siurblio kavitacijos laipsnis gali būti efektyviai stebimas tiriant slėgio pulsacijas siurblio įsiurbimo ir pakėlimo vietose. Triukšmo signalai taip pat yra laikomi efektyviu metodu nustatyti kavitacijos susidarymą ir vyksmą išcentrinuose siurbliuose (Chudina, 2003).

Mokslinėje literatūroje šiuo metu išskiriami keletas kavitacijos susidarymo nustatymo metodų: energijos metodas, optinis metodas, paviršiaus dangos metodas, atsparumo elektrai metodas, akustinė emisijos technologija ir vibroakustinis metodas. Pastaruoju metu nemažai mokslininkų pagrindinį dėmesį ima skirti dviem iš jų – akustinei emisijos technologijai ir vibroakustiniam metodui. Akustinės emisijos technologijos ypatybė yra ta, kad keliama ypač aukšti reikalavimai foniniam triukšmui, todėl dėl aplinkos faktoriaus sumažėja šio metodo pritaikymo galimybių laukas. Vibroakustinis metodas sulaukė didesnio mokslininkų dėmesio dėl savo pritaikymo galimybių

realiuoju laiku, didesnio atsparumo aplinkos faktoriams, mažesnių kaštų ir platesnio pritaikomumo (Dong, Zhao and Dai, 2019).

Iki šiol atliktuose tyrimuose mokslininkai Zhao W. ir Zhao G. (2017) išskiria keturis pagrindinius metodus, kaip kontroliuoti kavitaciją. Pirmasis metodas yra sudaryti dirbtines kliūtis kavitacijos vyksmo paviršiuje siekiant sulaikyti pasikartojančią srovę (Kawanami, Kato, Yamaguchi, Tanimura and Tagaya, 1997); antrasis – paleisti priešinio oro srovę siekiant sumažinti impulsinių paviršiaus slėgių dydžius (Kuiper, 2010); trečiasis – sienelės šiurkštumą priversti būti atsakinga už tai, kad kavitacijos atsiradimas būtų pristabdomas (Coutier–Delgosha, Devillers, Leriche and Pichon, 2005); ketvirtasis – pasitelkti „J-grooved“ geometriją, kad būtų sumažinamas kavitacijos tūris (Choi, Kurokawa and Imamura, 2007).

Išcentriniam siurblyje vykstančios kavitacijos sukelta vibracija ir proceso nestabilumas buvo tyrinėjami eksperimentiniais ir skaitiniais metodais. Rezultatai parodė, kad kavitacijos formavimasis, burbuliukų sproginimas bei rotorius – statoriaus sąveika yra atsakingi už skysčio tėkmės nestabilumų atsiradimą ir intensyvėjimą. Akivaizdus ryšys tarp kavitacijos reiškinių ir vibracijos intensyvėjimo buvo aptiktas sumažėjus siurblio bendram teigiamam slėgio aukščiui (NPSHa). Vibracijos signalai laikytini išcentrinuose siurbliuose atsirandančios kavitacijos atsiradimą ir vyksmą charakterizuojančiais signalais (Lu et al., 2017).

2. Transportuojamos naftos fizinės ir mechaninės savybės

Nafta yra skysta, iškastine laikoma kuro žaliava, kuri gali būti išgaunama iš žemės gelmių sausumoje ar jūroje, sudaryta iš plataus spektro angliavandenilių junginių ir kitų medžiagų mišinio. Angliavandenilių junginiai sudaryti tik iš anglies ir vandenilio elementų, vienas nuo kito besiskiriančių anglies ir vandenilio atomų skaičiumi molekulėje bei jų ryšiais. Be angliavandenilių naftoje yra ir neangliavandenilių junginių, kuriuose su anglimi ir vandeniliu yra azoto, deguonies ir sieros. Tiriant elementinę naftos sudėtį, pagal masę randama 83–87 proc. anglies, 10–14 proc. vandenilio, 0,1–2 proc. azoto, 0,1–1,5 proc. deguonies, 0,5–7 proc. sieros bei <1000 ppm metalų. Iš giluminių sluoksnių, kur yra gana didelis slėgis, išgaunamoje naftoje randama ištirpusių naftos dujų – tai dažniausiai metano, etano, propano ir butano dujų bei lengvojo (dujų) benzino komponentų mišiniai.

Kadangi nafta išgaunama iš skirtingų telkinių, ji skiriasi ir savo fizikinėmis-cheminėmis savybėmis. Paprastai prieš transportavimą skirtingų telkinių naftos yra maišomos ir sudaromos vadinamosios maišytos naftos rūšys. Plačiausiai žinomos yra FLOTTA – Šiaurės jūros naftos rūšis, Saudi Arabian Light – Lengvoji Saudo Arabijos naftos rūšis, REBCO (Russian Export Blend Crude Oil) – Rusijos naftų mišinys, tiekiamas eksportui ir kt. Kiekviena naftos rūšis apibūdinama konkrečiais fizikiniais–cheminiais parametrais.

Pagrindinės fizinės naftos savybės ir charakteristikos, ypač svarbios naftą perdirbant, laikant ir transportuojant, yra šios:

- medžiagos tankis;
- molekulinė masė;
- tamprumas;
- klampumas;
- garų slėgis;
- temperatūra;
- stingimo temperatūra;
- pliūpsnio temperatūra;
- dinaminė ir kinematinė klampa;
- frakcinė sudėtis;
- vandens kiekis;
- sieros kiekis;
- nuosėdų kiekis ir pan.

Medžiagos tankis

Medžiagos tankis yra medžiagos masė tūrio vienetu, išreiškiamas formule:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

čia: m – medžiagos masė (kg),

V – medžiagos tūris (m^3).

Atkreiptinas dėmesys į tai, kad naftos tankis ρ yra ypač jautrus temperatūros pokyčiams – didėjant temperatūrai, naftos tankis mažėja ir atvirkščiai. Tai labai svarbi naftos ir naftos produktų charakteristika, į kurią atsižvelgiama ne tik apskaičiuojant termohidromechanines charakteristikas, bet ir tvarkant naftos produktų apskaitą.

Naftos tankis kinta įvairiai ir yra matuojamas hidrometriniu būdu, naudojant densimetrus (areometrus). Dažniausiai yra taikomas LST EN ISO 3675 standartu nustatytas metodas (Lietuvos standartas LST EN ISO 3675:1999. Žalia nafta ir skystieji naftos produktai. Laboratorinis tankio nustatymas. Hidrometrinis metodas). Taip pat gali būti taikomas ir vibracinis U vamzdelio metodas (Lietuvos standartas LST EN ISO 12185:1999. Žalia nafta ir skystieji naftos produktai. Tankio nustatymas. Vibracinis U vamzdelio metodas). Atliekant įvairius skaičiavimus, taip pat yra taikomi santykinio tankio vienetai. Santykinio tankiu yra vadinamas produkto tankio sutartinėje 15 °C temperatūroje ir vandens tankio toje pačioje temperatūroje santykis, žymimas ρ_{15}^{15} . Jeigu žinomas naftos tankis tam tikroje temperatūroje ρ_{t_1} , tankį temperatūroje t_2 galima apskaičiuoti pagal šią formulę:

$$\rho_{t_2} = \rho_{t_1} - \alpha(t_2 - t_1)$$

čia α – vidutinė temperatūrinė pataisa.

Molekulinė masė.

Naftos, taip pat ir naftos frakcijų molekulinė masė nustatoma eksperimentiškai. Tačiau, kai nebūtini tikslūs rezultatai, molekulinė masė gali būti apskaičiuojama apytikriai, pagal supaprastintą formulę:

$$M = 60 + 0,3t_{vid} + 0,001t_{vid}^2$$

čia t_{vid} – vidutinė distiliavimo temperatūra, apskaičiuojama kaip frakcijos atskirų n ėminių temperatūrų vidurkis.

Apskaičiuoti molekulinę masę pagal chemines formules yra labai keblu, kadangi turi būti nustatyti visi naftą sudarantys angliavandeniliai ir kitos medžiagos, taip pat jų procentinės dalys.

Tamprumas

Tai skysčio savybė keisti tūrį, kintant temperatūrai ir (arba) slėgiui. Tamprumą apibūdina temperatūrinio plėtimosi ir tūrinio suspaudimo koeficientai. Temperatūrinio plėtimosi koeficientas α_0 – tai nykstančiai mažas santykinis skysčio tūrio pokytis $\frac{dV}{V}$, pakitus jo temperatūrai nykstamai mažu dydžiu dt :

$$\alpha_0 = \frac{dV}{Vdt}$$

Tūrinio suspaudimo koeficientu β_0 laikomas nykstamai mažas santykinis skysčio tūrio pokytis $\frac{dV}{V}$, pakitus slėgiui nykstamai mažu dydžiu dp :

$$\beta_0 = -\frac{dV}{Vdp}$$

Naftos tūrinio suspaudimo koeficientas β_0 , esant atmosferos slėgiui ir 20 °C temperatūrai yra $0,77 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \text{ N}^{-1}$.

Dydis, priešingas skysčių tūrinio suspaudimo koeficientui β_0 , vadinamas skysčių tamprumo modulių E_0 :

$$E_0 = \frac{1}{\beta_0}$$

Klampa

Klampus (arba vidinę trintį) vadinama skysčių ir dujų savybė priešintis vieno sluoksnio judėjimui kitų sluoksnių atžvilgiu. Kiekybinis medžiagos klampus rodiklis vadinamas klampa.

Judančio skysčio gretimi sluoksniai slysta vienas kito atžvilgiu, sukeldami vidaus trinties arba klamos jėgas. Skysčių vidaus trinties jėga:

$$T = \mu A \frac{du}{dh}$$

čia: T – trinties jėga;

A – tekančio skysčio gretimų sluoksnių paviršiaus plotas;

du – gretimų skysčio sluoksnių judėjimo greičių skirtumas;

dh – atstumas tarp sluoksnių sunkio centrų;

$\frac{du}{dh}$ – greičio gradientas;

μ – proporcingumo koeficientas, apibūdinantis skysčio klampą.

Kuo skystis yra ramybės būsenos ($\mu = 0$) ir gretimi skysčio sluoksniai juda vienodu greičiu ($u = \text{const}$), trinties jėgų nėra ($\frac{du}{dh} = 0$ ir $T = 0$).

Abi lygties pusės padalijus iš tekančio skysčio gretimų sluoksnių paviršiaus ploto A , gaunamas tangentinių įtempių, veikiančių gretimų tekančio skysčio sluoksnių lietimosi plokštumoje, dydis:

$$\tau = \frac{T}{A} = \mu \frac{du}{dh}$$

Iš šios lygties gaunama:

$$\mu = \tau \frac{dh}{du}$$

Proporcingumo koeficientas μ ($\text{Pa} \cdot \text{s}$) vadinamas dinaminės klamos koeficientu. Praktikoje dažnai vartojama kinematinės klamos koeficiento ν (m^2/s) sąvoka:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

Skysčių klampa labai priklauso nuo temperatūros. Didėjant temperatūrai, lašelių skysčių klampa mažėja, o dujinių didėja.

Magistralinių naftotiekių našumo skaičiavimo tikslumui didelę įtaką turi transportuojamos naftos kinematinės klamos (ν_T) nepastovumas kintant srauto temperatūrai (T) ir tankiui (ρ_{20}). AB „ORLEN Lietuva“ per Būtingės terminalą dažniausiai importuojamos naftos rūšys ir jų kinematinė klampa esant atitinkamai temperatūrai pateikta 1 lentelėje.

1 lentelė. Naftos rūšių klampa, atsižvelgiant į temperatūrą

Nafta	Tankis, kg/m ³	Klampa, m ² /s				
	20 °C	5 °C	15 °C	20 °C	25 °C	37.8 °C
REBCO	870	31,04·10 ⁻⁶	20,583·10 ⁻⁶	17,12·10 ⁻⁶	14,417·10 ⁻⁶	9,749·10 ⁻⁶
GAS CONDENSATE	736	1,226·10 ⁻⁶	1,018·10 ⁻⁶	0,94·10 ⁻⁶	0,881·10 ⁻⁶	0,766·10 ⁻⁶
ARABIAN LIGHT	856	18,11·10 ⁻⁶	12,424·10 ⁻⁶	10,495·10 ⁻⁶	8,967·10 ⁻⁶	6,27·10 ⁻⁶
ARABIAN EXTRA LIGHT	829	21,536·10 ⁻⁶	10,389·10 ⁻⁶	7,681·10 ⁻⁶	5,87·10 ⁻⁶	3,32·10 ⁻⁶
CPC BLEND	790	3,501·10 ⁻⁶	2,951·10 ⁻⁶	2,727·10 ⁻⁶	2,53·10 ⁻⁶	2,1234·10 ⁻⁶

Naftai ir naftos produktų klampumui apibūdinti naudojama kinematinė, dinaminė ir sąlyginė klampa. Kinematinė ir dinaminė klamos yra svarbios nagrinėjant tekėjimą ir hidraulinį pasipriešinimą ir yra nustatomos laboratoriniais tyrimais bei skaičiavimais, vadovaujantis Europos standartuose įtvirtintomis metodikomis (Lietuvos standartas LST EN ISO 3104+AC. Naftos produktai. Šviesūs ir tamsūs skystieji naftos produktai. Kinematinės klamos nustatymas ir dinaminės klamos apskaičiavimas). Kinematinė klampa nustatoma laboratoriniais prietaisais – viskozimetrais, o dinaminė klampa apskaičiuojama pagal kinematinę klampą. Matuojant viskozimetru, kinematinė klampa nustatoma pagal naftos ar naftos produkto ištekėjimo iš viskozimetro pro kalibruotą skylutę laiko trukmę. Žinant ištekėjimo trukmę t ir viskozimetro konstantą C , kinematinė klampa apskaičiuojama pagal šią formulę:

$$\nu = C \cdot t$$

Dinaminės ir kinematinės klampų tarpusavio priklausomybė, $mPa \cdot s$, išreiškiama formule:

$$\mu = \nu \cdot \rho \cdot 10^{-3}$$

Sąlyginė klampa matuojama sąlyginės klamos (SK) laipsniais, naudojant atitinkamos konstrukcijos viskozimetra pagal GOST 6258 pateiktą metodiką. Naftos ir naftos produktų klampa priklauso nuo temperatūros, todėl, atliekant skaičiavimus, ypač analizuojant hidraulinius procesus, į tai būtina atsižvelgti. Sąlyginės klamos vienetai dažnai naudojami mazuto klampai apibūdinti.

Kadangi transportuojama nafta yra įvairių telkinių naftos mišinys, kurio sudėtis nuolat kinta, jos klampa taip pat keičiasi. Be to, naftos klampa labai priklauso nuo temperatūros. Temperatūrai didėjant, naftos klampa mažėja. Kinematinės klamos priklausomybė nuo temperatūros gali būti apskaičiuojama pagal Reinoldso ir Filonovo formulę:

$$\nu = \nu_0 \cdot e^{-k(T-T_0)}$$

čia: v_0 – skysčio kinematinė klampa, kai temperatūra T_0 ;

T_0 – skysčio temperatūra normaliose sąlygose ($T_0 = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$);

k – koeficientas, kuris apskaičiuojamas pagal formulę:

$$k = \frac{\ln\left(\frac{v_0}{v_i}\right)}{T_i - T_0}$$

čia v_i – skysčio kinematinė klampa, kai temperatūra T_i .

Garų slėgis

Visi skysčiai turi savybę garuoti ir pereiti į dujų (garų) fazę, o visos dujos, temperatūrai sumažėjus, kondensuojasi atgal į skysčio fazę. Garavimo metu tam tikroje temperatūroje nusistovi dinaminė pusiausvyra, kai išgaravusių ir susikondensavusių medžiagų kiekiai susilygina. Esant šiai būsenai, nusistovi ir garų slėgis.

Medžiagos fazinis virsmas iš vienos būsenos į kitą termodinamikoje yra nusakomas Klauzijaus ir Klapeirono lygtimi. Grafiškai šis virsmas interpretuojamas kaip pusiausvyroje esančių skysčio ir jo garų slėgio p ir temperatūros T priklausomybė. Dažniausiai ši lygtis išreiškiama tokia formule:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T\Delta V}$$

čia: $\frac{dp}{dT}$ – priklausomybės linijos nuolydžio fraktorius;

L – slaptoji skysčio garavimo šiluma;

T – temperatūra, K;

ΔV – tūrio pokytis fazinio virsmo metu.

Esant virimo temperatūrai, garų slėgis tampa pakankamas, kad būtų įveiktas atmosferos slėgis ir skystis pradėtų išskirti dujų fazės burbuliukus.

Naftos sočiųjų garų slėgis eksploatacinėmis sąlygomis paprastai yra nustatomas laboratoriniais tyrimais. Dažnai, ypač Jungtinėse Amerikos Valstijose, taikomas Reido garų slėgio nustatymo būdas (Lietuvos standartas LST EN 12:1999. Naftos produktai. Garų slėgio nustatymas pagal Reidą. Drėgnasis metodas). Šio būdo išskirtinumas yra tas, kad naftos ir naftos produktų garų slėgis nustatomas, kai produkto temperatūra yra $37,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (arba $100\text{ }^{\circ}\text{F}$), ir taikomas tiems produktams, kurių virimo temperatūra normaliosiomis sąlygomis yra aukštesnė kaip $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Norint rasti garų slėgį reikiamoje temperatūroje, jis yra perskaičiuojamas.

3. Magistralinio vamzdyno sudėtis

Magistralinis vamzdynas – linijinio tipo statinys, kurį sudaro vientisas vamzdis, išilgai kuriuo išdėstyti statiniai, kurie užtikrina produktų transportavimą su iš anksto nustatytais parametrais (slėgis, temperatūra, našumas ir t. t.). Skirtingai negu kiti linijiniai statiniai, tokie kaip automobiliniai keliai, geležinkeliai, magistralinis vamzdynas, visą savo eksploatavimo laikotarpį iš vidaus apkrautas transportuojamo produkto slėgiu būna sudėtingame įtempimų būvyje ir dirba kaip didelio slėgio indas.

Kai magistraliniu vamzdynu transportuojama nafta, dujos, benzinas ir t. t., vamzdynas tampa energetiškai imliu statiniu. Statinių sudėtis ir jų paskirtis priklauso nuo transportuojamo produkto rūšies. Magistralinį naftotiekį sudaro pagrindinė siurblinė ir vamzdynai, kuriais naftos produktai patenka į pagrindinės siurblinės talpyklas.

Magistralinio naftotiekio pagrindinės siurblinės teritorijoje yra talpyklų parkas, pagrindinė ir pagalbinė siurblinės, vamzdynai, skaitiklių įranga, gramdiklio paleidimo aikštelė, smulkaus valymo filtrų patalpa, bendrojo vandentiekio sistema, kanalizacija, elektros tiekimas, administracinis ir buitinis pastatas, eksploatacinis ir buitinis pastatas (laboratorija, remonto dirbtuvės, kuro ir tepimo medžiagų sandėlis). Talpyklų parkas skirtas priimti ir išduoti naftą ar naftos produktus, išskirstyti produktus pagal rūšis, taip pat priimti produktus avarijos metu. Linijinė dalis susideda iš vamzdyno su išsišakojimais ir lupingu (lupingas – vamzdynas, einantis tam tikrame ruože lygiagrečiai pagrindiniam); armatūros; perėjimų per dirbtines ir natūralias kliūtis; elektrocheminės apsaugos įrenginių; technologinių ryšių linijų; eksploatacinės tarnybos pastatų; išilgai trasos einančių kelių ir elektros linijų.

Tarpinės siurblinės priima ir perduoda transportuojamą produktą toliau vamzdynu iki kitos stoties, galutiniams ar tarpiniams paskirstymo punkтам. Svarbus tarpinės siurblinės darbo momentas yra transportuojamo produkto judėjimo organizavimas.

3.1. Išcentriniai siurbliai ir jų charakteristikos

Išcentrinių siurblių yra gaminama daug rūšių. Visi jie gali būti klasifikuojami pagal tam tikras grupes (Vyčius ir Kustienė, 2008):

1. *Pagal siurbliaračių skaičių*: vienračiai ir daugiaračiai.
2. *Pagal skysčio įtekėjimo į siurbliarati pobūdį*: vienpusio ir dvipusio įtekėjimo.
3. *Pagal slėgio aukštį*: žemo ($H < 20$ m), vidutinio ($H = 20\text{--}60$ m), aukšto ($H > 60$ m).
4. *Pagal veleno padėtį*: horizontalūs ir vertikalūs.
5. *Pagal greitaeigiškumo koeficientą ns*: lėtaeigiai, normalūs ir greitaeigiai.
6. *Pagal pumpuojamą skystį*: švariam vandeniui, vandeniui su mechaninėmis priemaišomis, naftai, klampiams skysčiams ir pan.

Pagrindinės išcentrinio siurblio dalys: siurbliaratis su mentėmis, velenas, korpusas, siurbimo ir slėgimo (pakėlimo) vamzdžiai.

Besisukant siurbliaračiui, išcentriniame naftos siurblyje atsiranda išcentrinė jėga, dėl kurios nafta juda iš mažesnio slėgio skerspjūvio į didesnio slėgio skerspjūvį.

Paprasčiausiu siurblio matematiniu modeliu yra lygtis:

$$\Delta H = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} = F(Q) \quad (3.1)$$

Ši lygtis sujungia siurblio sukuriama diferencialinio slėgio ΔH priklausomybę nuo skysčio debito Q . Priklausomybė $\Delta H = F(Q)$ nusako siurblio charakteristiką ($Q - \Delta H$). Šios išcentrinių siurblių charakteristikos gali būti išreiškiamos priklausomybe:

$$\Delta H = a - bQ^2 \quad (3.2)$$

čia: a , (m), b , $\left(\frac{m}{m^3/h}\right)$ – siurblio charakteristikos koeficientai;

ΔH – slėgio aukštis, m;

Q – našumas, m^3/h .

Išcentriniai siurbliai gali būti jungiami dviem būdais: nuosekliai ir lygiagrečiai. Nuosekliai sujungus du išcentrinius siurblius, jų charakteristikos sudedamos, be to, $Q = Q_1 = Q_2$ ir $\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2$. Kai pirmojo siurblio charakteristika yra $\Delta H_1 = a_1 - b_1 Q_1^2$, o antrojo siurblio charakteristika – $\Delta H_2 = a_2 - b_2 \cdot Q_2^2$, dviejų išcentrinių siurblių sistemos charakteristika yra:

$$\Delta H = (a_1 + a_2) - (b_1 + b_2)Q^2 = a - bQ^2 \quad (3.3)$$

čia: $a = (a_1 + a_2)$; $b = (b_1 + b_2)$.

Dviejų lygiagrečiai sujungtų išcentrinių siurblių charakteristika gaunama kitaip, būtent, slėgių aukštis nesikeičia $\Delta H = \Delta H_1 = \Delta H_2$, o našumai sudedami $Q = Q_1 + Q_2$. Kai pirmojo siurblio charakteristika yra $\Delta H_1 = a_1 - b_1 \cdot Q_1^2$, o antrojo siurblio charakteristika $\Delta H_2 = a_2 - b_2 \cdot Q_2^2$, dviejų išcentrinių siurblių sistemos charakteristika yra:

$$\frac{\sqrt{a_1 - \Delta H}}{b_1} + \frac{\sqrt{a_2 - \Delta H}}{b_2} = Q \quad (3.4)$$

čia $a = (a_1 + a_2)$; $b = (b_1 + b_2)$.

Būtingės terminale sumontuoti 7 horizontalūs išcentriniai naftos siurbliai:

- P-117, P-118, P-121, P-122 ir P-123 (kiekvieno pajėgumas $1687 \text{ m}^3/h$ prie 1,4 MPa slėgio perkričio);
- P-124 (pajėgumas $2050 \text{ m}^3/h$ esant 2,94 MPa slėgio perkričiui),
- P-119 (pajėgumas $500 \text{ m}^3/h$ esant 0,5 MPa slėgio perkričiui).

Siurbliuose veikia apsaugos nuo aukštos siurblio guolių temperatūros bei vibracijos, kurios, pasiekus tam tikras aukštas ribas, perduoda perspėjimo signalą arba stabdo siurblio variklį. Siurbliuose taip pat veikia apsauga nuo aukštos variklio apkrovos, kuri perduoda perspėjimo signalą arba stabdo siurblio variklį, kai variklio apkrova pasiekia jai neleistiną reikšmę, bei apsauga nuo

netyčinio siurblio sklendžių uždarymo, kai automatiškai sustoja atitinkamo siurblio variklis uždarius sklendę siurblio įsiurbimo linijoje arba sklendę išmetimo linijoje.

Naftos siurbLIAI P-117, P-118, P-121, P-122, P-123, P-124

Naftos siurbLIAI P-117, P-118, P-121, P-122 ir P-123 sujungti vamzdžiais taip, kad galėtų veikti lygiagrečiai arba nuosekliai. Eksporto režimu dirbama lygiagrečiai sujungus tarpusavyje 1–3 siurbLIUS, importo režimu dirbama nuosekliai sujungus tarpusavyje 2–5 siurbLIUS. Laivo pakrovimo metu naudojant P-118, tuo pačiu metu vykdyti eksporto iš Mažeikių naftos perdirbimo produktų gamyklos negalima. Naftos siurblys P-124 nuosekliai sujungiamas vamzdžiais su 2 arba 3 kitais naftos siurbLIAIS (iš P-117, P-118, P-121, P-122, P-123) importui į Mažeikių naftos perdirbimo produktų gamyklą. Eksportui siurblys P-124 nenaudojamas.

Importo atveju priklausomai nuo to, kiek ir kokie siurbLIAI dirba, pasiekiamas skirtingas naftos srautas.

Naftos siurblys P-119

Naftos siurblys P-119 sujungtas vamzdžiais taip, kad galėtų pumpuoti naftą iš rezervuarų 16 colių naftos vamzdynų ir pumpuoti pasirinktu našumu arba į siurbLIų P-117/118 arba į siurbLIų P-121/122/123 įsiurbimo kolektorių.

Šie išcentriniai naftos siurbLIAI yra sukami trifazių elektros variklių, kurių parametrai pateikiami 2 lentelėje.

2 lentelė. Elektros variklių pagrindiniai parametrai

Eil. Nr.	Variklio modelis	Galia, kW	Įtampa, kV	Srovė, A	Naudingumo koeficientas	Galios koeficientas	Sukimosi dažnis, aps./min
1.	Siemens CGII 4410	900	3,3	181	0,96	0,85	1485
2.	Siemens CGII 6813	2000	3,3	393	0,96	0,89	2980

Pagal turimus siurbLIų P-117, P-118, P-121, P-122 ir P-123, kurių modelis „14×25 DVS“, parametrus nustatoma tokio modelio išcentrinio siurblio charakteristikos priklausomybė.

Kai $Q = 0$, o $\Delta H = 165$ m, šias reikšmes įrašius į (3.2) lygtį gaunama:

$$\Delta H = a,$$

$$a = 165 \text{ m.}$$

Kai $Q = 1546 \text{ m}^3/\text{h}$, o $\Delta H = 136$ m, šias reikšmes įstačius į (3.2) lygtį gaunama:

$$136 = 165 - b \cdot 1546^2,$$

$$b = \frac{165 - 136}{1546^2} = 1,22 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{(\text{m}^3 / \text{h})^2}$$

Gautos siurbLIų P-117, P-118, P-121, P-122 ir P-123 charakteristikų priklausomybės:

$$\Delta H_{P-117} = 165 - 1,22 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2 .$$

Analogiškai nustatoma ir siurblio P-124, kurio modelis „10x14x19 DVS“, charakteristikos priklausomybė:

Kai $Q = 0$, o $\Delta H = 354$ m, šias reikšmes įrašius į (3.2) lygtį gaunama:

$$\Delta H = a,$$

$$a = 354 \text{ m.}$$

Kai $Q = 2042 \text{ m}^3/\text{h}$, o $\Delta H = 302$ m, šias reikšmes įstačius į (3.2) lygtį gaunama:

$$302 = 354 - b \cdot 2042^2 ,$$

$$b = \frac{354 - 302}{2042^2} = 1,25 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}}{(\text{m}^3 / \text{h})^2} .$$

Gauta siurblio P-124 charakteristikos ($Q - \Delta H$) priklausomybė:

$$\Delta H_{P-124} = 354 - 1,25 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2 .$$

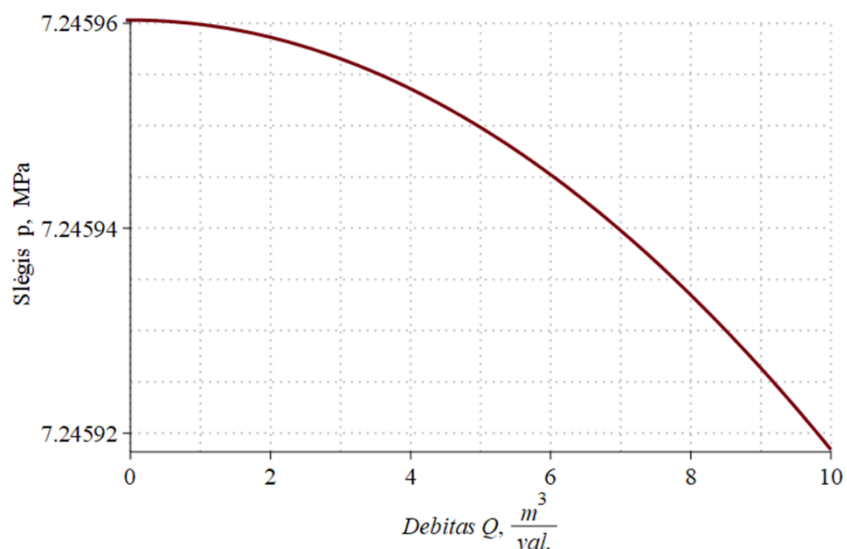
Būtingės terminale paprastai transportavimo į Mažeikių naftos perdirbimo produktų gamyklą režimu naftą pumpuoja nuosekliai sujungti vienas „10x14x19 DVS“ modelio ir trys „14x25 DVS“ modelio išcentriniai siurbliai. Apskaičiuojama keturių nuosekliai sujungtų išcentrinų siurblių sistemos charakteristika:

$$\Delta H = (a_1 + a_2 + a_3 + a_4) - (b_1 + b_2 + b_3 + b_4)Q^2;$$

$$\Delta H = (3 \cdot 165 + 354) - (3 \cdot 1,22 + 1,25) \cdot 10^{-5} \cdot Q^2 ;$$

$$\Delta H = 849 - 4,91 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2 . \quad (3.5)$$

Slėgio priklausomybė nuo šios siurblių sistemos bendros charakteristikos pavaizduota 3.1 paveiksle.



3.1 pav. Slėgio priklausomybė nuo keturių siurblių sistemos charakteristikos

3.2. Naftos rezervuarų ir įsiurbimo magistralių techniniai parametrai

Būtingės terminale naftos sandėliavimui naudojami šeši rezervuarai su plaukiojančiais stogais: TK-101, TK-102, TK-103, TK-104, TK-105, TK-106. Rezervuarų skersmuo – 60,7 m.

AB „ORLEN Lietuva“ parengtoje Būtingės naftos terminalo saugos ataskaitoje (Akcinės bendrovės „ORLEN Lietuva“ Vamzdynų ir terminalo operacijų padalinio Būtingės naftos terminalo saugos ataskaita, 2013, 2017) pateikiama informacija apie terminalo sudėtinių technologinių įrenginių techninius parametrus.

Kiekvienas rezervuaras turi vieną stogo lietaus vandens drenažą, mėginių paėmimo bei lygio matavimo liniuote angas, tris naftos maišykles bei keturias drenažines linijas, skirtas vandens ar naftos išleidimui.

Kiekvienas rezervuaras sujungtas su 914,4 mm (36 colių), 609,6 mm (24 colių), 457,2 mm (18 colių) ir 406,4 mm (16 colių) nominalaus skersmens naftos vamzdynais (3 lentelė).

3 lentelė. Vamzdynų ilgiai nuo rezervuarų iki pirmojo siurblio

	Vamzdyno ilgis nuo rezervuaro iki pirmojo išcentrinio siurblio, m					
Vamzdyno skersmuo, m (in)	TK-101	TK-102	TK-103	TK-104	TK-105	TK-106
0,9144 (36)	69	81	84	174	69	89
0,6096 (24)	480	280	275	260	265	270
0,4064 (16)	6	6	6	6	6	6
0,4572 (18)	5	5	5	5	5	5
Iš viso:	560	372	370	445	345	370

Rezervuarus nuo šių vamzdynų skiria elektrinės sklendės, valdomos iš dispečerinės arba vietoje. Plaukiojantys talpyklų stogai, kurių skersmuo – 60,7 m, sumažina angliavandenilių garavimą - tarp stogo ir naftos paviršiaus nėra tuštumos, stogas juda kartu su naftos paviršim ir alsuokliai lieka užsidarę. Jei naftos lygis tampa mažesnis už stogo atraminių kojų ilgį ir stogas atsistoja ant talpyklos dugno, atsidaro alsuokliai (kad po stogu nesusidarytų vakuumas naftos lygiui krentant toliau). Alsuokliai taip pat išleidžia angliavandenilių garus, kai naftos lygis kyla iki minėto minimalaus lygio. Siekiant išvengti naftos garavimo nuostolių bei stogo deformacijų (kojoms atsiremiant į dugną), naftos lygis rezervuaruose neturi būti mažesnis už:

Rezervuarams TK-101, TK-102, TK-103 – 2,350 m,

Rezervuarams TK-104, TK-105, TK-106 – 1,500 m.

Plaukiojančios stogo dangos svoris (su sandarinimo priedais):

Rezervuarų TK-101, TK-102, TK-103 – 288 500 kg,

Rezervuarų TK-104, TK-105, TK-106 – 280 100 kg.

Rezervuarai TK-101, TK-102, TK-103

Kiekvieno rezervuaro nominalus tūris – 50 000 m³.

Maksimalus rezervuarų užpildymo lygis yra 16,8 m. Pasiekus šią lygio reikšmę, nedelsiant stabdomas naftos tiekimas į rezervuarą (stabdant pumpavimą iš siurblynės, tanklaivio ar kitos talpos arba pervedant srautą į kitą rezervuarą, kurio lygis mažesnis negu 16,8 m). Aukščiausias darbinis rezervuarų TK-101, TK-102 ir TK-103 lygis yra 16,5 m, žemiausias – 2,4 m.

Rezervuarų apsaugai nuo perpylimo įrengti aukšto lygio jutikliai, kurie suveikia naftos lygiui rezervuare pasiekus 16,7 m ribą. Šiems jutikliams suveikus dirbant eksporto režimu, užsidaro sklendės ir stabdomi siurbliai. Jutikliams suveikus dirbant importo režimu, sklendės neužsidaro ir siurbliai nestoja, tik įsijungia signalizacija, kurią galima išjungti tik sumažinus lygį rezervuare.

Rezervuarai TK-104, TK-105, TK-106

Kiekvieno rezervuaro nominalus tūris – 52 000 m³.

Maksimalus rezervuarų užpildymo lygis yra 19,38 m. Pasiekus šią lygio reikšmę, nedelsiant stabdomas naftos tiekimas į rezervuarą (stabdant pumpavimą iš siurblynės, tanklaivio ar kitos talpos arba pervedant srautą į kitą rezervuarą, kurio lygis mažesnis už 19,38 m). Aukščiausias darbinis rezervuarų TK-104, TK-105, TK-106 lygis yra 19 m, žemiausias – 1,6 m.

Rezervuarų apsaugai nuo perpylimo įrengti aukšto lygio jutikliai, kurie suveikia lygiui pasiekus 19,2 m. Šiems jutikliams suveikus dirbant eksporto režimu, stabdomi siurbliai ir užsidaro sklendės. Jutikliams suveikus dirbant importo režimu, sklendės neužsidaro ir siurbliai nestoja, tik įsijungia signalizacija, kurią galima išjungti tik sumažinus lygį rezervuare.

3.3. Magistralinio vamzdyno techniniai parametrai, lemiantys kavitacijos reiškinių atsiradimą

Kavitacija vadinamas toks reiškinys, kai tam tikrose skysčio vietose susidaro garų arba dujų zonos. Kavitacija atsiranda, kai tam tikrose hidraulinės sistemos vietose slėgis yra mažesnis už prisotintų garų slėgį, t. y. slėgį, kuriam esant skystis pradeda virti prie esamos temperatūros. Kavitacijos reiškinys gali atsirasti, pavyzdžiui, siurblio įsiurbimo magistralėse, greitaeigėse hidraulinėse turbinose, išcentrinuose siurbliuose ir t. t. Šiais atvejais kavitacijos atsiradimo priežastis yra dideli vietiniai greičiai ir slėgio sumažėjimas. Jeigu slėgis yra mažesnis už prisotintų garų slėgį, skystis pradeda intensyviai garuoti ir atsiranda kavitacijos zonos. Skysčiui judant toliau, šiose zonose slėgis didėja, vyksta garų kondensacija ir kavitacijos zonos išnyksta. Kavitacijos zonose atsiranda didesnis triukšmo lygis ir vibracija.

Kavitacijos reiškinys yra pavojingas išcentriniam siurbliams, nepaisant didelio jų pajėgumo. Šis reiškinys įvyksta, kai statinis slėgis skystyje yra mažesnis už skysčių garų slėgį, kurį dažniausiai sukelia didelis siurblio rotorius sukimosi greitis (Bogdevičius, P. et al., 2017).

Kavitacijos reiškiniui atsirasti nagrinėjamu atveju įtakos turi keletas magistralinio vamzdyno techninių parametru.

Didelę reikšmę turi išcentrinų siurblių charakteristikos ir jų sūkliai, naftos įsiurbimo ir išmetimo magistralių techniniai parametrai, skirtingi naftos užpildymo rezervuaruose aukščiai,

atstumai nuo rezervuarų iki pirmojo išcentrinio siurblio, skirtingi vamzdyno skersmenys bei vietiniai nuostoliai.

Būtingės terminale sumontuotus išcentrinius naftos siurblius suka trifaziai elektros varikliai, kurių pagrindiniai parametrai nurodyti 2 lentelėje. Šių variklių, kurie ir yra daugiausia elektros energijos naftotiekyje sunaudojantis šaltinis, energijos sąnaudas lemia vamzdyno hidraulinių nuostoliai h_w , kurie atsiranda dėl naftos pumpavimo režimų ir hidraulinio pasipriešinimo, kuris paprastai mažinamas cheminiais reagentais ir priedais. Hidrauliniams pasipriešinimui mažinti ne mažiau svarbus yra ir periodiškasis vamzdyno vidinio paviršiaus valymas.

Visiems skysčiams galioja Paskalio dėsnis, pagal kurį slėgiami skysčiai ir dujos perduoda slėgį į visas puses vienodai. Nespūdziam ir tėkmėje tolygiai pasiskirsčiusiam skysčiui yra taikoma ši lygybė:

$$v_1 S_1 = v_2 S_2 \quad (3.6)$$

$$vS = Q \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (3.7)$$

Realiuosiuose tekančiuose skysčiuose didelę reikšmę turi klampa, dėl kurios tam tikra tekėjimo mechaninės energijos dalis, virtusi šilumos energija, įskaidoma į aplinką. Nagrinėjant du skirtingus tėkmės pjūvius, turi būti įvertinti ir hidrauliniai nuostoliai h_w . Esant nusistovėjusiam naftos tekėjimui vamzdyne, o transportuojama nafta yra nespūdi ir vienalytė, pritaikoma *Bernulio lygtis*:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha v_2^2}{2g} + h_w \quad (3.8)$$

čia: v – vidutinis tėkmės greitis skerspjūvyje;

α – Koriolio koeficientas, patikslinantis kinetinę tėkmės energiją;

z_1 ir z_2 – pirmojo ir antrojo skerspjūvio sunkio centro aukštis nuo palyginimo plokštumos;

p_1 ir p_2 – slėgiai pirmajame ir antrajame skerspjūvyje; h_w – hidrauliniai kelio nuostoliai.

Hidrauliniai nuostoliai h_w veikia slėgio kitimą tėkmėje. Bendrieji tėkmės hidrauliniai nuostoliai susideda iš hidraulinių kelio nuostolių h_L ir vietinių nuostolių h_v .

$$h_w = h_L + h_v \quad (3.9)$$

Kelio nuostoliai h_L atsiranda dėl skysčio dalelių vidinės trinties bei dėl skysčio trinties į kietuosius paviršius, pavyzdžiui, į vamzdžių sienes. Dėl trinties prarasta mechaninė energija virsta šilumos energija ir išsiskiria į aplinką.

Vietiniai nuostoliai h_v tėkmėje atsiranda vietose, kuriose keičiasi tekėjimo kryptis, greitis, vamzdžio skerspjūvio pokyčiai.

$$h_v = \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (3.10)$$

čia: ζ – vietinių nuostolių koeficientas,

v – skerspjūvio vidutinis greitis pjūvyje už kliūtis.

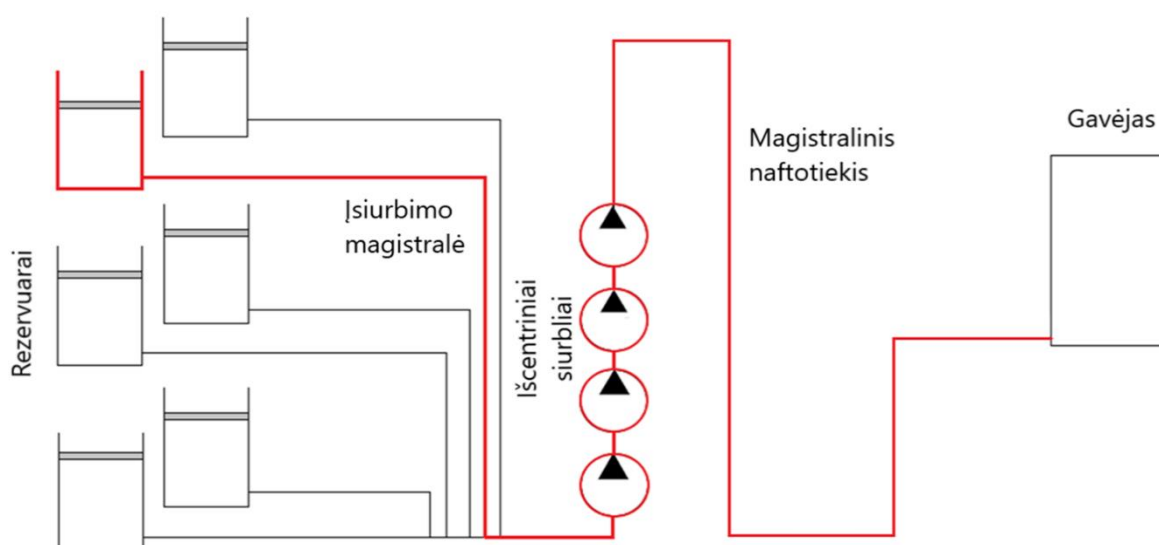
Nagrinėjamu atveju Būtingės terminale kiekvienas naftos sandėliavimui skirtas rezervuaras sujungtas su pirmuoju išcentrinio siurblio skirtingo ilgio vamzdynais, kurie savo ruožtu taip pat

sudaryti iš skirtingo skersmens vamzdžių. Vamzdynų parametrai ir atstumai nuo rezervuarų iki pirmojo išcentrinio siurblio nurodyti 3 lentelėje.

Remiantis (3.6) lygybe, naftai ėmus tekėti mažesnio skersmens vamzdžiu, jos tekėjimo greitis padidėja ir, pasinaudojant (3.10) formule, apskaičiuojami didesni vietiniai nuostoliai, parodantys slėgio kritimą tėkmėje.

4. Magistralinio vamzdyno ir jo elementų matematiniai modeliai

Nagrinėjant hidrodinaminius procesus, vykstančius sistemoje REZERVUARAS–ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIAI SIURBLIAI–MAGISTRALINIS NAFTOTIEKIS, sudaryti matematiniai modeliai, kuriais siekta nustatyti šios sistemos parametrus, kurie turi įtakos kavitacijos susidarymui ir naftotiekio našumui. Nagrinėjama sistema pavaizduota 4.1 paveiksle.



4.1 pav. Sistema REZERVUARAS – ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ – IŠCENTRINIAI SIURBLIAI – MAGISTRALINIS NAFTOTIEKIS

4.1. Sistemos REZERVUARAS–ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIS SIURBLYS matematiniai modeliai

Analizuojama sistema REZERVUARAS–ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIS SIURBLYS ir joje vykstantys hidrodinaminiai procesai.

Transportuojamos naftos tekėjimas šioje sistemoje aprašomas Bernulio lygtimi:

$$\Phi(v_1) = \left(\frac{m_{st}}{S_{st}}\right)g + \rho gH - p_L - \rho g\Delta z - \Phi_1(v_1) - \Phi_2(v_2) - \Phi_3(v_3) - \Phi_4(v_4) = 0 \quad (4.1)$$

čia: m_{st} – rezervuaro stogo masė,

S_{st} – rezervuaro stogo paviršiaus plotas,

ρgH – hidrostatinis slėgis,

p_L – slėgis įsiurbimo magistralės gale, atmosferinio slėgio atžvilgiu,

$\rho g\Delta z$ – slėgis, susidaręs dėl įsiurbimo magistralės pradžios ir pabaigos aukščių virš jūros lygio skirtumo,

v_1, v_2, v_3, v_4 – naftos tekėjimo greičiai atitinkamai d_1, d_2, d_3 ir d_4 skersmens vamzdžiuose. Greičiai v_2, v_3, v_4 yra priklausomi nuo v_1 ir yra išreiškiami šiomis lygybėmis:

$$v_2 = \frac{S_1 v_1}{S_2}; \quad v_3 = \frac{S_1 v_1}{S_3}; \quad v_4 = \frac{S_1 v_1}{S_4}, \text{ kur } S_1, S_2, S_3, S_4 - \text{vamzdžių, kurių skersmuo}$$

d_1 , skerspjūvių plotai;

$\Phi_1(v_1), \Phi_2(v_2), \Phi_3(v_3), \Phi_4(v_4)$ – pasipriešinimai įsiurbimo magistralėje naftai tekant d_1, d_2, d_3 ir d_4 skersmens vamzdžiais, ir randami pagal šias formules:

$$\Phi_1 = \rho \lambda_1 \frac{L_1 v_1^2}{d_1};$$

$$\Phi_2 = \rho \frac{v_2^2}{2} \left(\lambda_2 \frac{L_2}{d_2} + \frac{\left(1 - \frac{S_{v2}}{S_{v1}}\right)}{2} \right);$$

$$\Phi_3 = \rho \frac{v_3^2}{2} \left(\lambda_3 \frac{L_3}{d_3} + \frac{\left(1 - \frac{S_{v3}}{S_{v2}}\right)}{2} \right);$$

$$\Phi_4 = \frac{1}{2} \rho \left(\lambda_4 \frac{v_4^2}{d_4} + v_3^2 \left(1 - \frac{S_{v3}}{S_{v4}}\right)^2 \right).$$

čia: $\lambda = 0,11 \left(\frac{k}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}$ – hidraulinio pasipriešinimo koeficientas, skaičiuojamas pagal Altšulio formulę, kur $\frac{k}{d} = \Delta$ – vamzdžio vidinio paviršiaus santykinis šiurkštumas, k – ekvivalentinis absoliutus šiurkštumas, d – vamzdžio skersmuo, $Re = \frac{vd}{\nu}$ – Reinoldso skaičius, ν – naftos kinematinė klampa;

L – vamzdžio ilgis;

indeksai 1, 2, 3, 4, kuriais pažymėti kintamieji, rodo priklausomybę vamzdžių skersmenims atitinkamai d_1, d_2, d_3, d_4 .

Lygtis (4.1) užrašoma tokia forma:

$$\Phi(v_1) = 0. \quad (4.2)$$

Kai $\Phi(v_1) = 0$, randamas lygties sprendinys v_1 – naftos įtekėjimo į pirmąjį išcentrinį siurblių greitis.

Naftotiekio vamzdynų transporte dažniausiai naudojamas toks transportavimo proceso schematizavimas (Jonikas, 2009):

1. Nafta laikoma vientisa terpe, ištiesai užpildančia visą vamzdyno skerspjūvį, arba jo dalį;
2. Tekėjimas laikomas vienmačiu, kai visi tekėjimą nusakantys parametrai priklauso tik nuo vienos erdvinės koordinatės x , esančios išilgai vamzdyno ašies, ir visi įvykiai – nuo laiko t ;
3. Tekėjimo parametrai nusakomi vidutinėmis fizikinio parametro reikšmėmis;
4. Vamzdyno profilis nustatomas pagal vamzdyno ašies $z(x)$ aukštį nuo jūros lygio;
5. Vamzdyno skerspjūvio plotas S bendruoju atveju taip pat priklauso nuo x ir t . Jei vamzdyno skersmuo nekinta, tai $S(x) = S_0 = \text{const}$;
6. Pagrindiniai parametrai:

$\rho(x,t)$ – transportuojamos naftos tankis. Analizuojamos REBCO naftos tankis, esant normalioms sąlygoms, 870 kg/m^3 ;

$v(x,t)$ – naftos tekėjimo greitis, m/s ;

$p(x,t)$ – slėgis vamzdino skerspjūvyje, Pa ;

$T(x,t)$ – transportuojamos naftos temperatūra, $^{\circ}\text{C}$;

$\tau(x,t)$ – įtempimai (trinties jėga, tenkanti vamzdino vidinio paviršiaus ploto vienetui), Pa ;

$Q(x,t) = vS$ – transportuojamos naftos tūrio debitas, m^3/s ;

$M(x,t) = \rho vS$ – transportuojamos naftos masės debitas, kg/s .

Naftos tekėjimas vamzdyne laikomas vienmačiu, kadangi visi tekėjimą nusakantys parametrai priklauso tik nuo vienos erdvinės koordinatės x , esančios išilgai vamzdino ašies, ir visi įvykiai – nuo laiko t .

Atsižvelgiant į tai, tikslesnis sistemos REZERVUARAS–ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIS SIURBLYS matematinis modelis sudaromas iš pagrindinių vienmatį naftos tekėjimą charakterizuojančių lygčių – srauto vientisumo lygties ir judėjimo kiekio lygties, kuriomis aprašomas naftos tekėjimas įsiurbimo magistralėje.

Srauto vientisumo lygtis:

$$\frac{\partial}{\partial t} [S(x)\rho] + \frac{\partial}{\partial x} [S(x)\rho v] = 0; \quad (4.3)$$

čia: ρ – naftos tankis,

v – naftos tekėjimo greitis,

$S(x)$ – vamzdino skerspjūvio plotas.

Judėjimo kiekio lygtis:

$$\frac{\partial}{\partial t} [S(x)\rho v] + \frac{\partial}{\partial x} [S(x)(p + \rho v^2)] + \Pi(x)\tau + S(x)\rho a_x = p \frac{\partial S}{\partial x} \quad (4.4)$$

čia: ρ – naftos tankis,

v – naftos tekėjimo greitis,

p – naftos slėgis,

$S(x)$ – vamzdino skerspjūvio plotas.

$\Pi(x)$ – vamzdžio skerspjūvio perimetras,

$\tau = \frac{\rho \lambda (Re, \Delta) v |v|}{8}$ – skysčio tangentiniai įtempimai vamzdžio vidiniame paviršiuje, kur λ –

hidraulinio pasipriešinimo koeficientas, Δ – vamzdžio vidinio paviršiaus santykinis šiurkštumas, Re – Reinoldso skaičius.

a_x – pagreitis išilgai x ašies.

Norint įsitikinti, kaip sistemoje REZERVUARAS–ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIS SIURBLYS tam tikruose įsiurbimo magistralės skerspjūviuose (mazguose) kinta slėgis ir naftos tekėjimo greitis, lygtys (4.3) ir (4.4) sprendžiamos charakteristikų metodu. Kintamieji – slėgis ir greitis – tam tikruose mazguose yra randami esant tam tikroms x ir t reikšmėms (4.2 pav.). Įsiurbimo magistralė padalijama į elementus, kurių ilgis yra Δx . Greitis ir slėgis taške D laiko momentu t yra apskaičiuojami sprendžiant netiesinių algebrinių lygčių sistemą:

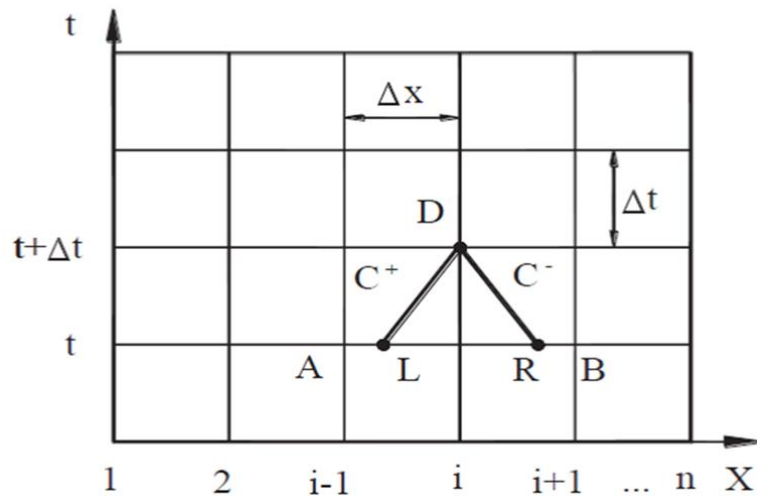
$$C^+: \Phi_1 = v_D - v_L + \frac{1}{2}(p_D - p_L) \left[\left(\frac{1}{\rho c} \right)_L + \left(\frac{1}{\rho c} \right)_D \right] - \frac{\Delta t}{2} \left[\left(\frac{f_1}{\rho c} \right)_L + \left(\frac{f_1}{\rho c} \right)_D \right] - \frac{\Delta t}{2} [(f_2)_L + (f_2)_D] = 0 \quad (4.5)$$

$$C^-: \Phi_1 = v_D - v_R + \frac{1}{2}(p_D - p_R) \left[\left(\frac{1}{\rho c} \right)_R + \left(\frac{1}{\rho c} \right)_D \right] - \frac{\Delta t}{2} \left[\left(\frac{f_1}{\rho c} \right)_R + \left(\frac{f_1}{\rho c} \right)_D \right] - \frac{\Delta t}{2} [(f_2)_R + (f_2)_D] = 0 \quad (4.6)$$

čia: $f_1(v, p) = \frac{c_2}{s(x)} \left(-\rho v \frac{\partial s}{\partial x} \right)$, S – vamzdžio skerspjūvio plotas,

$f_2(v, p) = -\frac{\tau \Pi(x)}{\rho S(x)} - a_x$, Π – vamzdžio skerspjūvio perimetras,

$\tau = \frac{\rho \lambda (Re, \Delta) v |v|}{8}$ – skysčio tangentiniai įtempimai vamzdžio vidiniame paviršiuje, kur λ – hidraulinio pasipriešinimo koeficientas, Δ – vamzdžio vidinio paviršiaus santykinis šiurkštumas, Re – Reinoldso skaičius.



4.2 pav. Taško koordinatų nustatymo, naudojant charakteristikų metodą, schema.

Kraštinės sąlygos skysčio srauto judėjimo lygtimis spresti:

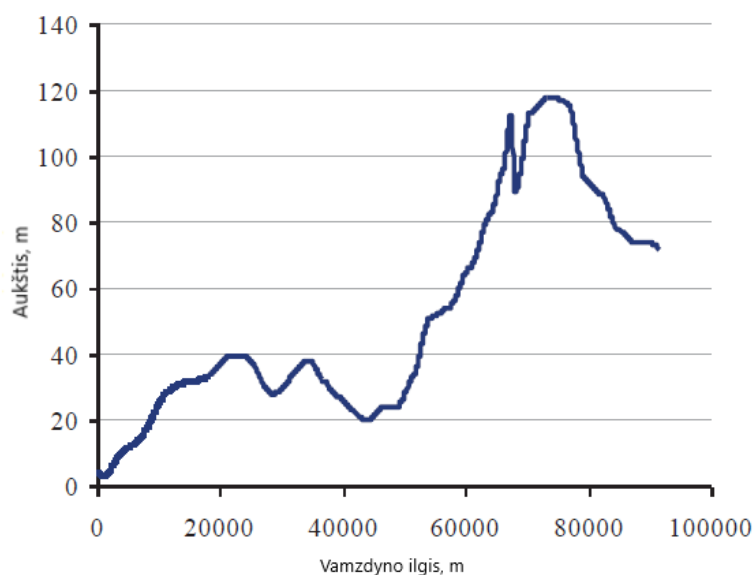
$$p(x = 0) = \left(\frac{m_{st}}{s_{st}} \right) g + \rho g H, \\ p(x = L) = p_L. \quad (4.7)$$

Uždavinio pradinės sąlygos:

$$v(x, t = 0) = 0, \\ p(x, t = 0) = p_0. \quad (4.8)$$

4.2. Sistemos ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIAI SIURBLIAI – MAGISTRALINIS NAFTOTIEKIS matematinis modelis

Iš Būtingės terminalo nafta transportuojama į Mažeikių naftos perdirbimo produktų gamyklą 91,5 km ilgio ir 22 colių skersmens vamzdynu. Naftos transportavimo magistraliniu naftotiekiu schema pateikta 4.1 paveiksle. Magistralinio vamzdyno nuo Būtingės terminalo iki Mažeikių naftos perdirbimo produktų gamyklos aukščio profilis pateikiamas 4.3 paveiksle.



4.3 pav. Magistralinio vamzdyno Būtingės terminalas–Mažeikių naftos perdirbimo produktų gamykla profilis.

Būtingės naftos terminalas atitinka 0 km žymę, jo aukštis virš jūros lygio – 4,8 m. Mažeikių naftos perdirbimo produktų gamyklos siurblinė atitinka 91,6 km aukščio žymę, o jos aukštis virš jūros lygio – 71,2 m. Aukščiausia vamzdyno vieta siekia 118 m. virš jūros lygio.

Siekiant nustatyti, kokiems sistemos ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIAI SIURBLIAI–MAGISTRALINIS NAFTOTIEKIS parametrams esant ir kaip kinta magistralinio vamzdyno našumas, iš lygčių (4.3) ir (4.4) sudaromas šios sistemos matematinis modelis, kuris sprendžiamas charakteristikų metodu.

Kraštinės sąlygos skysčio srauto judėjimo lygtimis spresti:

$$\begin{aligned}
 p_1(x = 0, t) &= p_L + p_{P1} + p_{P2} + p_{P3} + p_{P4}, \\
 v_1(x = 0, t) &= \frac{Q_1(t)}{S_1}, \\
 p_N(x = L, t) &= \rho g H_N.
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

Uždavinio pradinės sąlygos:

$$\begin{aligned}
 v(x, t = 0) &= v_0, \\
 p(x, t = 0) &= p_0.
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

5. Magistralinio vamzdyno teorinių tyrimų rezultatai ir analizė

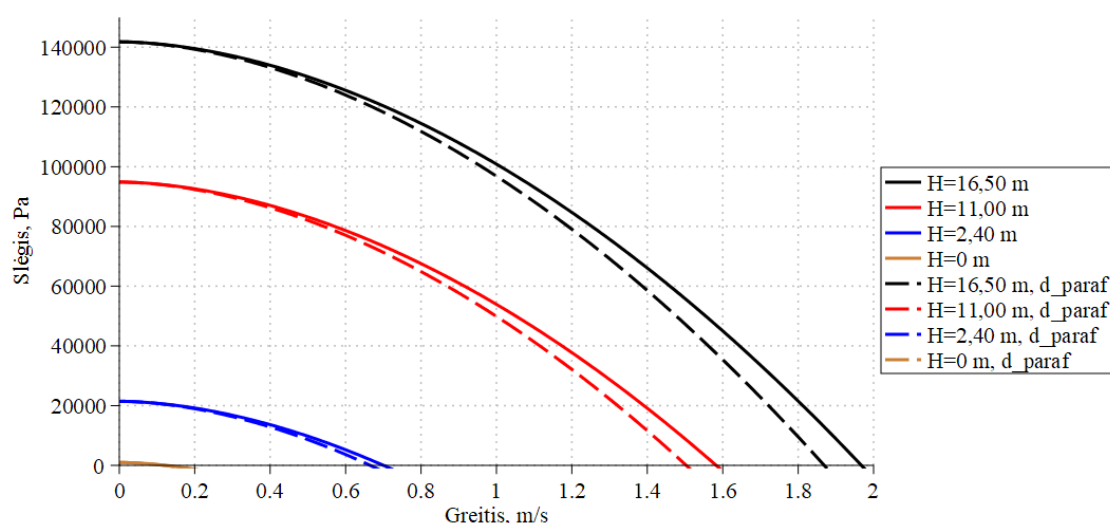
Pagal 4 skyriuje sudarytus hidrodinaminius procesus charakterizuojančius sistemų matematinius modelius buvo sprendžiami uždaviniai. Šiame skyriuje pateikiami hidrodinaminių procesų tyrimų rezultatai ir analizė.

5.1. Sistemoje REZERVUARAS–ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIS SIURBLYS vykstančių hidrodinaminių procesų tyrimo rezultatai ir analizė

Sprendžiant lygtį (4.1), kuri yra netiesinė algebrinė lygtis, MAPLE programine įranga apskaičiuotos naftos tekėjimo greičio reikšmės, keičiant tokius sistemos parametrus:

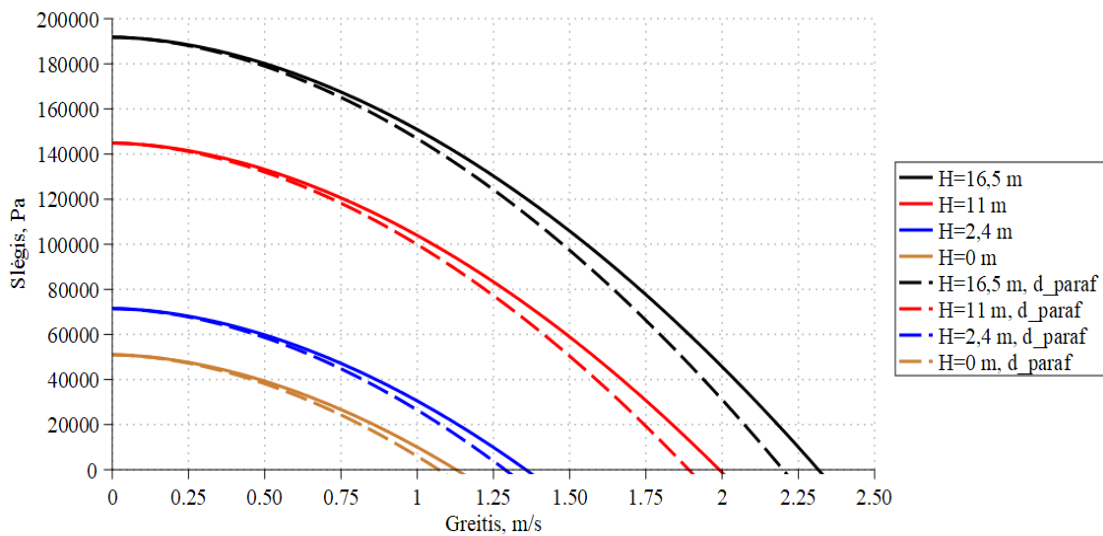
- Naftos rezervuare TK-101 aukštį H , kai $H=0$ m, $H=2,40$ m, $H=5,75$ m, $H=7,00$ m, $H=11,00$ m, $H=16,50$ m.
- Naftos rezervuarą TK-101 su pirmuoju išcentrinu siurbliu jungiantį vamzdyną sudarančių vamzdžių skersmenis d_1 , d_2 , d_3 ir d_4 su $0,01$ m parafino nuosėdų sluoksniu (d_{paraf}) ir be jo.
- REBCO naftos kinematinę klampą ν , esant 5 , 15 ir 25 °C temperatūroms.
- Slėgį įsiurbimo magistralės gale p_L , kai $p_L = 0$ Pa, $p_L = -0,05 \cdot 10^6$ Pa ir $p_L = 0,05 \cdot 10^6$ Pa atmosferinio slėgio atžvilgiu.

Iš 5.1 paveikslo matyti, kaip slėgis kinta nuo greičio, kai $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $T=25$ °C, $p_L = 0$ Pa, esant naftos rezervuare aukščiams $H=0$ m, $H=2,40$ m, $H=11,00$ m ir $H=16,50$ m. Iš 5.1 paveikslo taip pat matyti, kaip sumažėja naftos tekėjimo įsiurbimo magistralėje greitis, kai vamzdyno vidinis paviršius padengtas $0,01$ m parafino nuosėdų sluoksniu.



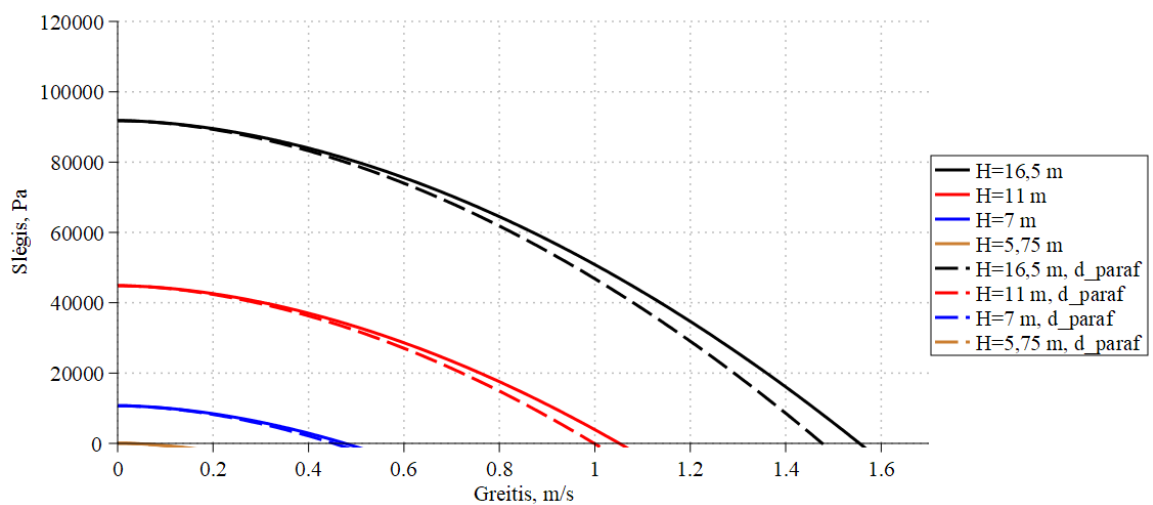
5.1 pav. Slėgio kitimas nuo greičio, kai $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $p_L = 0$ Pa

Kai $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $T=25$ °C, o $p_L = -0,05 \cdot 10^6$ Pa, esant naftos rezervuare aukščiams $H=0$ m, $H=2,40$ m, $H=11,00$ m ir $H=16,50$ m, fiksuojamas didesnis greitis įsiurbimo magistralėje (5.2 pav.).



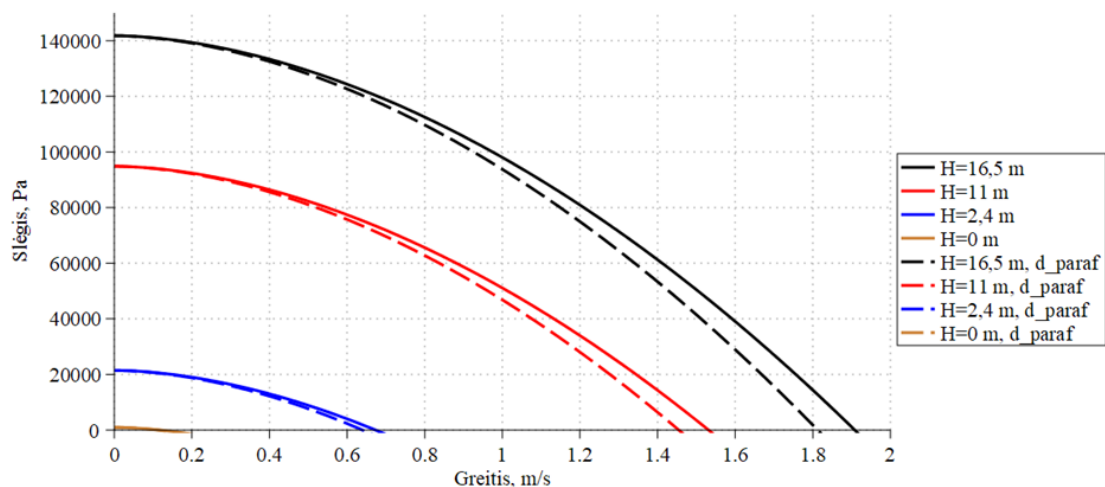
5.2 pav. Slėgio kitimas nuo greičio, kai $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $p_L = -0,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$.

Kai $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$, o $p_L = 0,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, esant naftos rezervuare aukščiams $H=11 \text{ m}$ ir $H=16,5 \text{ m}$, fiksuojamas mažiausias greitis įsiurbimo magistralėje, o kai $H=0 \text{ m}$ ir $H=2,4 \text{ m}$, kreivės nekerta koordinatės x ašies. Atsižvelgiant į tai, pasirinktos didesnės H reikšmės (5.3 pav.). Nustatyta, kad mažiausias naftos tekėjimo greitis randamas, kai $H=5,75 \text{ m}$.



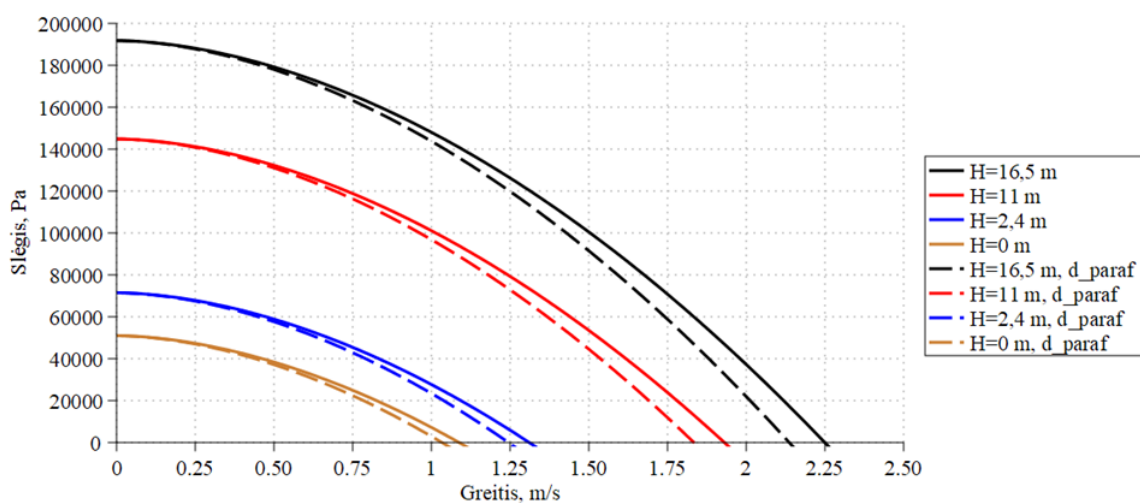
5.3 pav. Slėgio kitimas nuo greičio, kai $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $p_L = 0,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$

Išanalizavus didesnės klampos naftos tekėjimą, kai $\nu = 20,583 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $T=15 \text{ }^\circ\text{C}$, o $p_L = 0 \text{ Pa}$, esant naftos rezervuare aukščiams $H=16,5 \text{ m}$, $H=11 \text{ m}$, $H=2,4 \text{ m}$ ir $H=0 \text{ m}$, slėgio kitimo priklausomybė nuo tekėjimo greičio pavaizduota 5.4 paveiksle. Iš grafiko matyti, kad slėgis ir greitis įgyja mažesnes reikšmes negu esant mažesnės klampos naftos tekėjimui prie tų pačių sistemos parametrų.



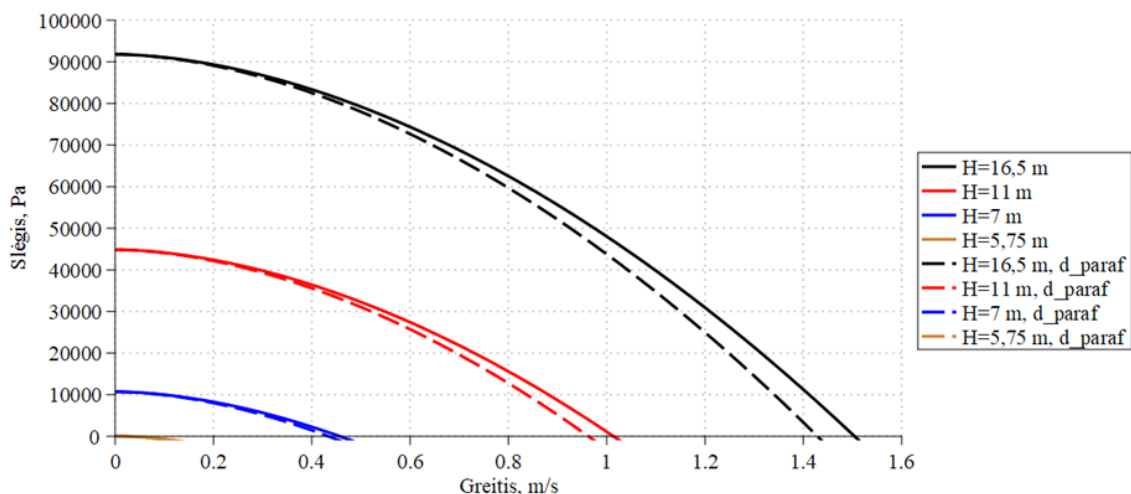
5.4 pav. Slėgio kitimas nuo greičio, kai $\nu = 20,583 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $p_L = 0 \text{ Pa}$

Kai $\nu = 20,583 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $T=15 \text{ }^\circ\text{C}$, o $p_L = -0,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, esant naftos rezervuare aukščiams $H=0 \text{ m}$, $H=2,40 \text{ m}$, $H=11,00 \text{ m}$ ir $H=16,50 \text{ m}$, rezultatai pateikiami 5.5 paveiksle.



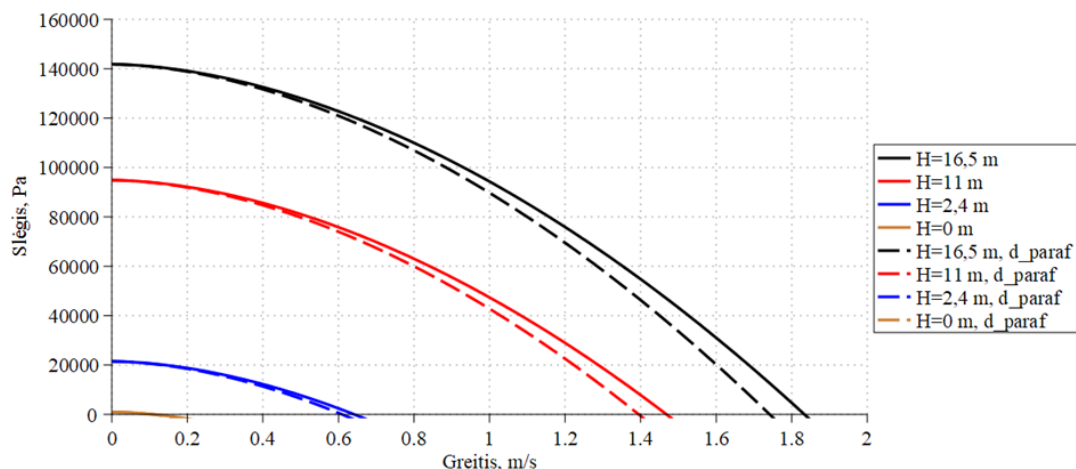
5.5 pav. Slėgio kitimas nuo greičio, kai $\nu = 20,583 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $p_L = -0,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$

Kai $\nu = 20,583 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $T=15 \text{ }^\circ\text{C}$, o $p_L = 0,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, esant naftos rezervuare aukščiams $H=11 \text{ m}$ ir $H=16,5 \text{ m}$ (kaip ir anksčiau analizuotu atveju, kai klampa buvo $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$), fiksuojamas mažiausias greitis įsiurbimo magistralėje, o kai $H=0 \text{ m}$ ir $H=2,4 \text{ m}$, kreivės nekerta koordinatės x ašies. Atsižvelgiant į tai, pasirinktos didesnės H reikšmės ($H=5,75 \text{ m}$ ir $H=7 \text{ m}$) ir rezultatai pateikti 5.6 paveiksle.



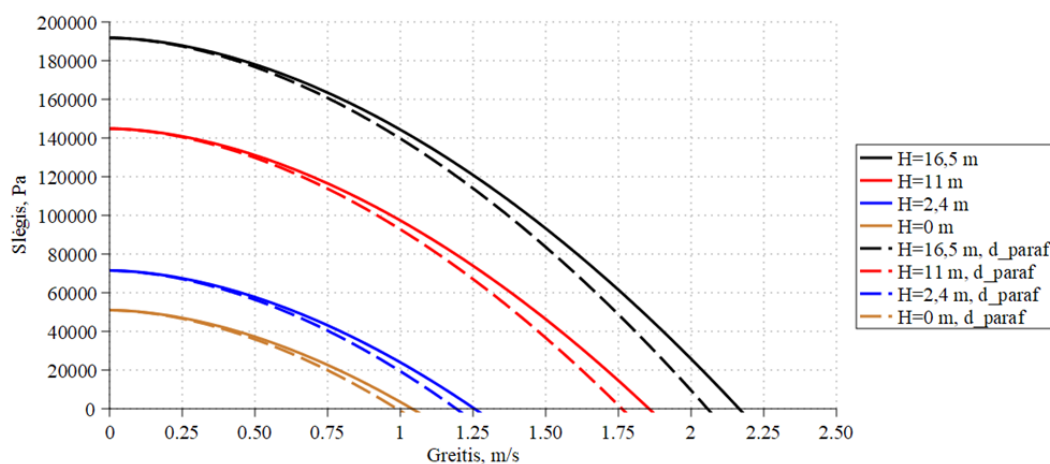
5.6 pav. Slėgio kitimas nuo greičio, kai $\nu = 20,583 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $p_L = 0,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$

Išanalizavus naftos tekėjimą, kai $\nu = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $T=5 \text{ }^\circ\text{C}$, o $p_L = 0 \text{ Pa}$, esant naftos rezervuare aukščiams $H=16,5 \text{ m}$, $H=11 \text{ m}$, $H=2,4 \text{ m}$ ir $H=0 \text{ m}$, slėgio kitimo priklausomybė nuo tekėjimo greičio pavaizduota 5.7 paveiksle. Grafike esanti informacija parodo, kad slėgis ir greitis įgyja dar mažesnes reikšmes negu esant anksčiau nagrinėtoms naftos klampoms.



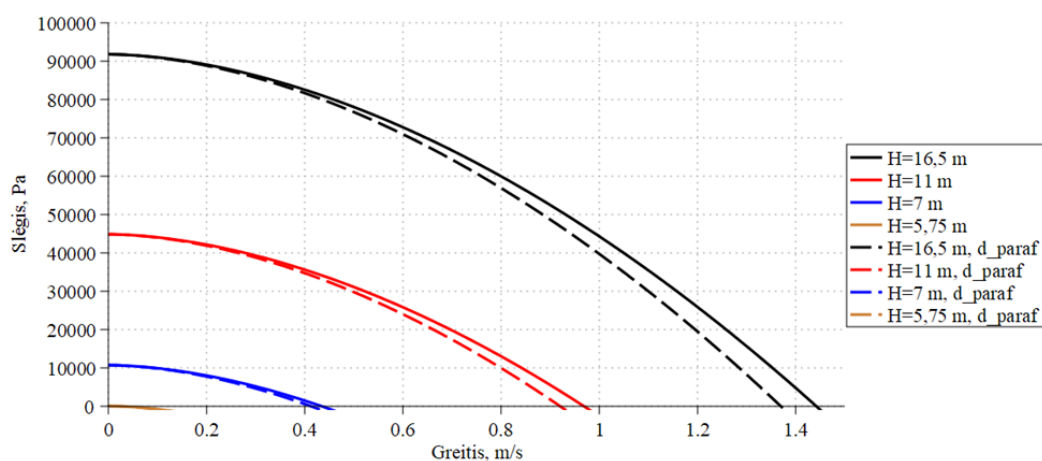
5.7 pav. Slėgio kitimas nuo greičio, kai $\nu = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $p_L = 0 \text{ Pa}$.

Kai $\nu = 30,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $T=5 \text{ }^\circ\text{C}$, o $p_L = -0,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, esant naftos rezervuare aukščiams $H=0 \text{ m}$, $H=2,40 \text{ m}$, $H=11,00 \text{ m}$ ir $H=16,50 \text{ m}$, rezultatai pateikiami 5.8 paveiksle.



5.8 pav. Slėgio kitimas nuo greičio, kai $\nu = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $p_L = -0,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$

Kaip ir anksčiau analizuotais atvejais, kai $p_L = -0,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, taip ir šiuo atveju, kai $\nu = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, mažiausias naftos tekėjimo greitis randamas, kai $H=5,75 \text{ m}$ (5.9 pav.).



5.9 pav. Slėgio kitimas nuo greičio, kai $\nu = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $p_L = 0,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$

Įsiurbimo magistralėje kintant greičiams, kinta ir išvystomas našumas. Atsižvelgiant į tai, keičiant minėtus sistemos parametrus, įvertinta slėgio priklausomybė nuo greičio bei rastos išvystomų debitų reikšmės, esant atitinkamoms greičių reikšmėms. Įsiurbimo magistralėje tekančios naftos greičiai ir į pirmąjį siurblių įtekančys debitai, kai $p_L = 0$ Pa, $p_L = -0,05 \cdot 10^6$ Pa ir $p_L = 0,05 \cdot 10^6$ Pa pateikiami atitinkamai 4, 5 ir 6 lentelėse.

4 lentelė. Tekėjimo greičio ir debito reikšmės, kai $p_L = 0$ Pa.

Kai $v=31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $T=5^\circ\text{C}$								
	H=0 m		H=2,40 m		H=11,00 m		H=16,50 m	
	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}
$v_{in}, \text{ m/s}$	0,112	0,107	0,642	0,610	1,468	1,395	1,834	1,742
$Q, \text{ m}^3/\text{h}$	266	242	1517	1379	3471	3155	4335	3939
Kai $v=20,583 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $T=15^\circ\text{C}$								
	H=0 m		H=2,40 m		H=11,00 m		H=16,50 m	
	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}
$v_{in}, \text{ m/s}$	0,119	0,113	0,673	0,640	1,531	1,455	1,908	1,813
$Q, \text{ m}^3/\text{h}$	281	255	1592	1447	3620	3290	4511	4100
Kai $v=14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $T=25^\circ\text{C}$								
	H=0 m		H=2,40 m		H=11,00 m		H=16,50 m	
	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}
$v_{in}, \text{ m/s}$	0,124	0,118	0,700	0,665	1,583	1,503	1,968	1,869
$Q, \text{ m}^3/\text{h}$	294	267	1655	1504	3741	3400	4652	4228

5 lentelė. Tekėjimo greičio ir debito reikšmės, kai $p_L = -0,05 \cdot 10^6$ Pa.

Kai $v=31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $T=5^\circ\text{C}$								
	H=0 m		H=2,40 m		H=11,00 m		H=16,50 m	
	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}
$v_{in}, \text{ m/s}$	1,040	0,988	1,255	1,192	1,855	1,762	2,165	2,057
$Q, \text{ m}^3/\text{h}$	2459	2235	2967	2697	4386	3986	5119	4652
Kai $v=20,583 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $T=15^\circ\text{C}$								
	H=0 m		H=2,40 m		H=11,00 m		H=16,50 m	
	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}
$v_{in}, \text{ m/s}$	1,088	1,033	1,311	1,245	1,931	1,834	2,249	2,137
$Q, \text{ m}^3/\text{h}$	2572	2337	3099	2816	4564	4148	5318	4833
Kai $v=14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $T=25^\circ\text{C}$								
	H=0 m		H=2,40 m		H=11,00 m		H=16,50 m	
	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}
$v_{in}, \text{ m/s}$	1,128	1,071	1,356	1,288	1,991	1,891	2,316	2,199
$Q, \text{ m}^3/\text{h}$	2666	2423	3207	2914	4706	4277	5475	4975

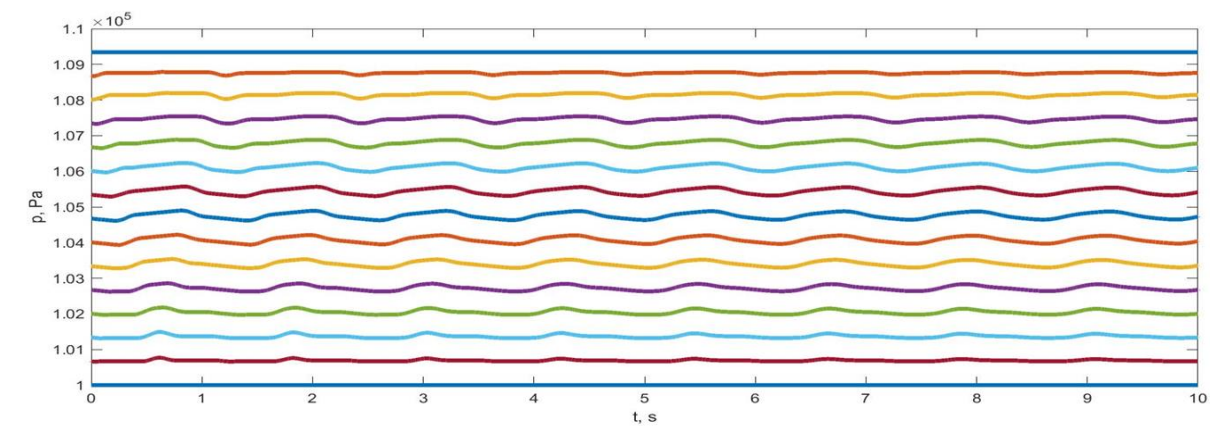
6 lentelė. Tekėjimo greičio ir debito reikšmės, kai $p_L = 0,05 \cdot 10^6$ Pa

Kai $v=31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $T=5^\circ\text{C}$								
	H=5,75 m		H=7,00 m		H=11,00 m		H=16,50 m	
	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}
$v_{in}, \text{ m/s}$	0,021	0,020	0,435	0,413	0,969	0,920	1,442	1,370
$Q, \text{ m}^3/\text{h}$	50	46	1028	934	2290	2081	3409	3098
Kai $v=20,583 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $T=15^\circ\text{C}$								
	H=5,75 m		H=7,00 m		H=11,00 m		H=16,50 m	
	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}
$v_{in}, \text{ m/s}$	0,022	0,021	0,457	0,434	1,014	0,963	1,504	1,429
$Q, \text{ m}^3/\text{h}$	53	48	1080	982	2397	2178	3556	3231
Kai $v=14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $T=25^\circ\text{C}$								
	H=5,75 m		H=7,00 m		H=11,00 m		H=16,50 m	
	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}	d	d _{paraf}
$v_{in}, \text{ m/s}$	0,024	0,022	0,476	0,452	1,051	0,999	1,555	1,477
$Q, \text{ m}^3/\text{h}$	56	51	1126	1023	2485	2259	3675	3340

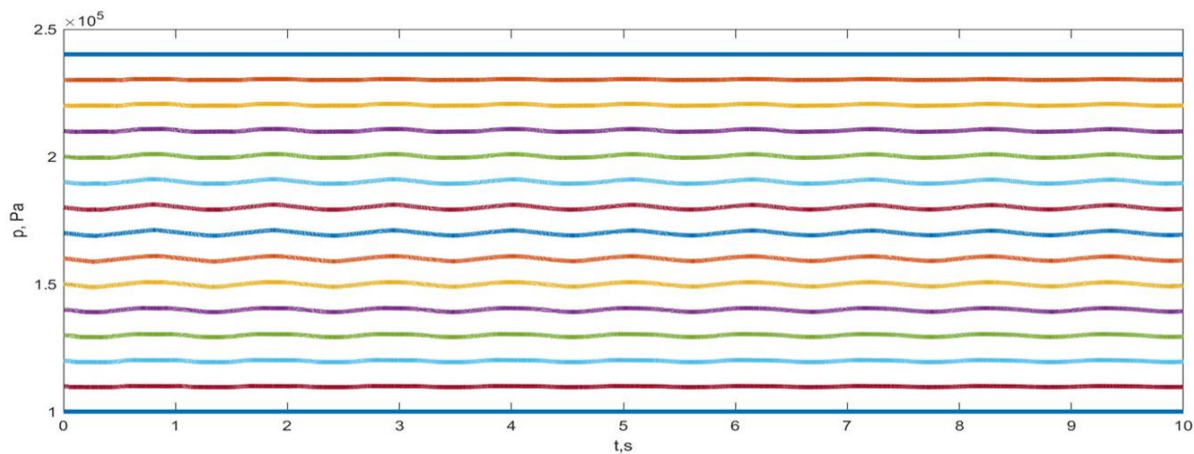
Pagal tikslesnį sistemos REZERVUARAS–ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIS SIURBLYS matematinį modelį, lygtys (4.3) ir (4.4), esant kraštinėms sąlygoms (4.7) ir pradinėms sąlygoms (4.8), spęstos charakteristikų metodu ir nustatytas slėgio bei greičio kitimas tam tikruose charakteringuose magistralės mazguose esant tam tikroms t reikšmėms.

Įsiurbimo magistralė, kurios ilgis yra 560 m, buvo padalyta į elementus, kurių ilgis $\Delta x = 1$ m. Sistema analizuota keičiant naftos rezervuare aukštį, kai $H = 1$ m ir $H = 16,5$ m. Slėgis įsiurbimo magistralės gale $p_L = 0$ Pa.

5.10 ir 5.11 paveiksluose pavaizduotas slėgio kitimas pagal laiką keturiolikoje charakteringų mazgų 10 sekundžių intervale, kai naftos rezervuare aukštis atitinkamai $H = 1$ m ir $H = 16,5$ m. Abiejuose grafikuose didžiausias slėgis fiksuotas pirmajame mazge (įtekėjime į magistralę), kur slėgiai atitinkamai yra $p = 1,095 \cdot 10^5$ Pa ir $p = 2,4 \cdot 10^5$ Pa. Mažiausia slėgio reikšmė abiejuose grafikuose – $p = 1 \cdot 10^5$ Pa – paskutiniajame mazge (ištekėjime iš magistralės).

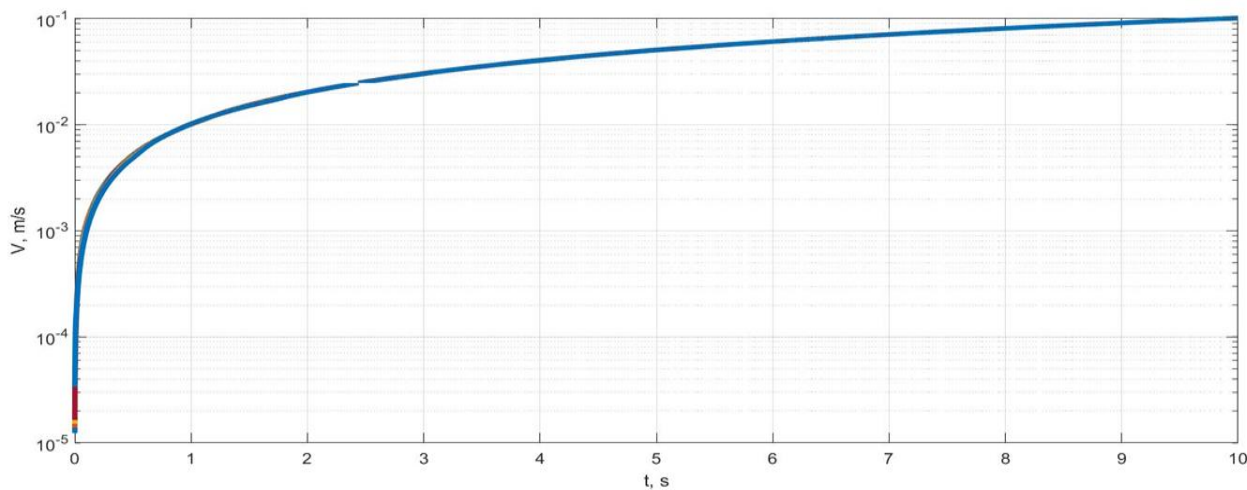


5.10 pav. Slėgio kitimas įsiurbimo magistralėje, kai $H = 1$ m

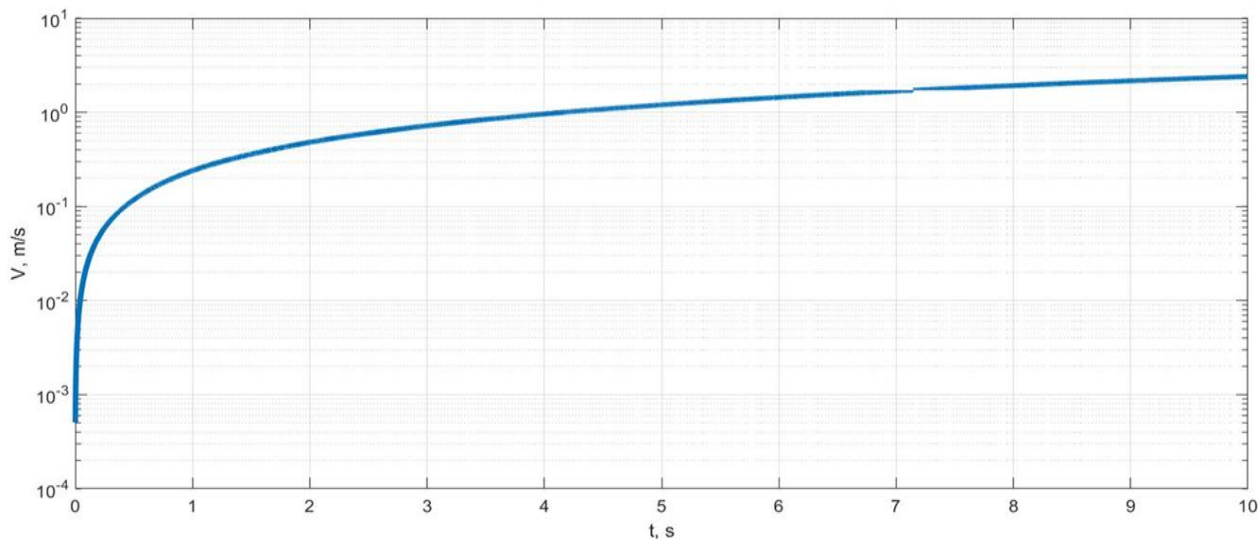


5.11 pav. Slėgio kitimas įsiurbimo magistralėje, kai $H = 16,5$ m

Naftos tekėjimo įsiurbimo magistralėje greičiai atitinkamuose mazguose kinta labai nežymiai. 5.13 ir 5.13 paveiksluose pateiktose logaritminėse skalėse pavaizduotas greičio kitimas, kai $H = 1$ m ir $H = 16,5$ m, tuo pačiu laikotarpiu, kuriose matyti, jog greitis po 10 sekundžių nusistovi atitinkamai ties 0,1 m/s ir 2,5 m/s reikšmėmis.



5.12 pav. Greičio kitimas įsiurbimo magistralėje, kai $H = 1$ m.



5.13 pav. Greičio kitimas įsiurbimo magistralėje, kai $H = 16,5$ m

5.2. Sistemoje REZERVUARAS–ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIAI SIURBLIAI–MAGISTRALINIS NAFTOTIEKIS vykstančių hidrodinaminių procesų tyrimo rezultatai ir analizė

Nagrinėjant sistemą ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIAI SIURBLIAI–MAGISTRALINIS NAFTOTIEKIS pagal iš lygčių (4.3) ir (4.4) sudarytą matematinį modelį ir taikomas kraštines sąlygas (4.9) bei pradines sąlygas (4.10), uždavinys sprendžiamas charakteristikų metodu. Siekta nustatyti, kokiems sistemos parametrams (naftos klampai, santykiniam dujų tūriui) esant ir kaip kinta magistralinio vamzdyno našumas.

Magistralinis vamzdynas padalytas į 18 200 mazgų (91 kilometro atkarpa padalyta į 5 metrų intervalus), o vamzdyno charakteringos koordinatės x nurodytos 7 lentelėje.

7 lentelė. Vamzdyno koordinatės (metrais), kuriose pateikiami slėgių ir debitų kitimai laike

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}
0	1000	2000	3000	4000	5000	10000	20000	50000	70000	80000	90000	91000

Kai į pirmąjį siurblių įtekantis debitas yra mažesnis už tą, kurį sugeneruoja siurblys, siurblio ertmėje atsiranda išretėjimas, kadangi šioje ertmėje sumažėja slėgis. Susidarius siurblio ertmėje išretėjimui, atsiranda tam tikras tūris dujų. Vadinasi vamzdynu transportuojamas mišinys, kuris sudarytas iš naftos ir dujų ir kurio tankis yra mažesnis už naftos tankį. Esant mažesniai tankiui, transportuojamas mišinys tampa spūdesnis, magistralinio vamzdyno gale išvystomas mažesnis debitas.

Santykis dujų kiekis pirmajame siurblyje, žemo slėgio ertmėje, yra lygus:

$$\kappa = \frac{V_g}{V_l + V_g}$$
$$\rho = \rho(\kappa), \quad K = K(\kappa).$$

čia: κ – santykinis dujų tūris,

V_g – dujų tūris,

V_l – skysčio tūris,

$V_l + V_g$ – mišinio tūris,

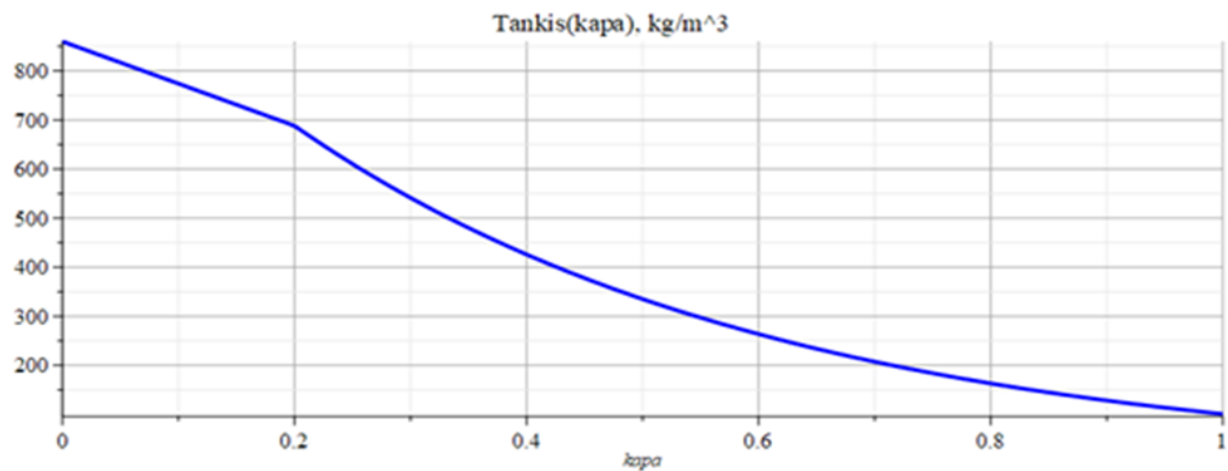
K – tūrinis tamprumo modulis,

5.14 ir 5.15 paveiksluose pavaizduotos atitinkamai tankio ir tūrinio tamprumo modulio priklausomybės nuo santykinio dujų tūrio.

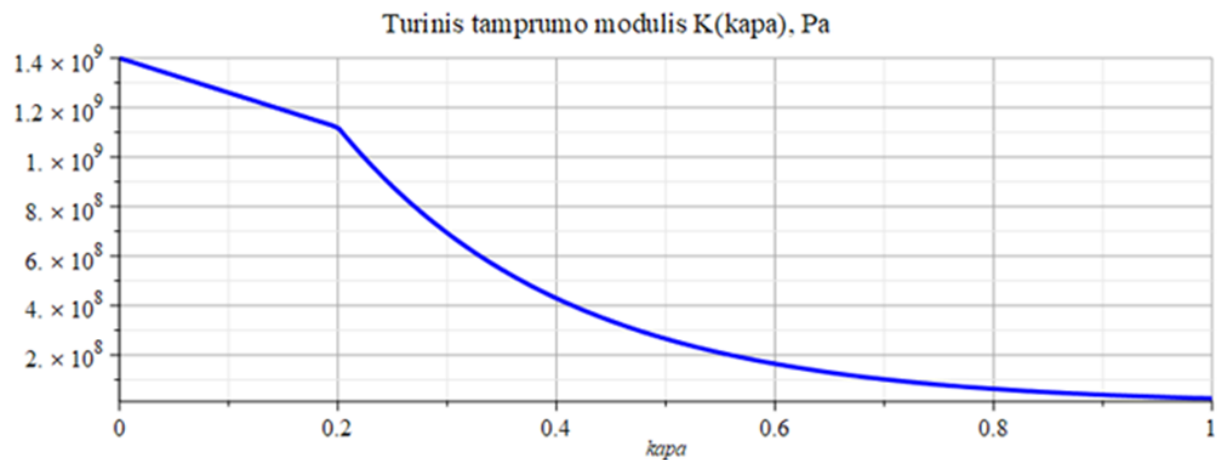
Sistema analizuota esant tokiems parametrams:

- Naftos rezervuare aukštis $H = 16,5$ m.
- Naftos kinematinė klampa $\nu = 31,04 \cdot 10^{-6}$ m²/s ir $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6}$ m²/s.
- Slėgis įsiurbimo magistralės gale $p_L = 0$ Pa.
- Nuosekliai sujungti vienas „10×14×19 DVS“ modelio siurblys ir trys „14×25 DVS“ modelio siurbLIAI.

- Santykinis dujų tūris $\kappa = 0, \kappa = 0,1, \kappa = 0,2$.

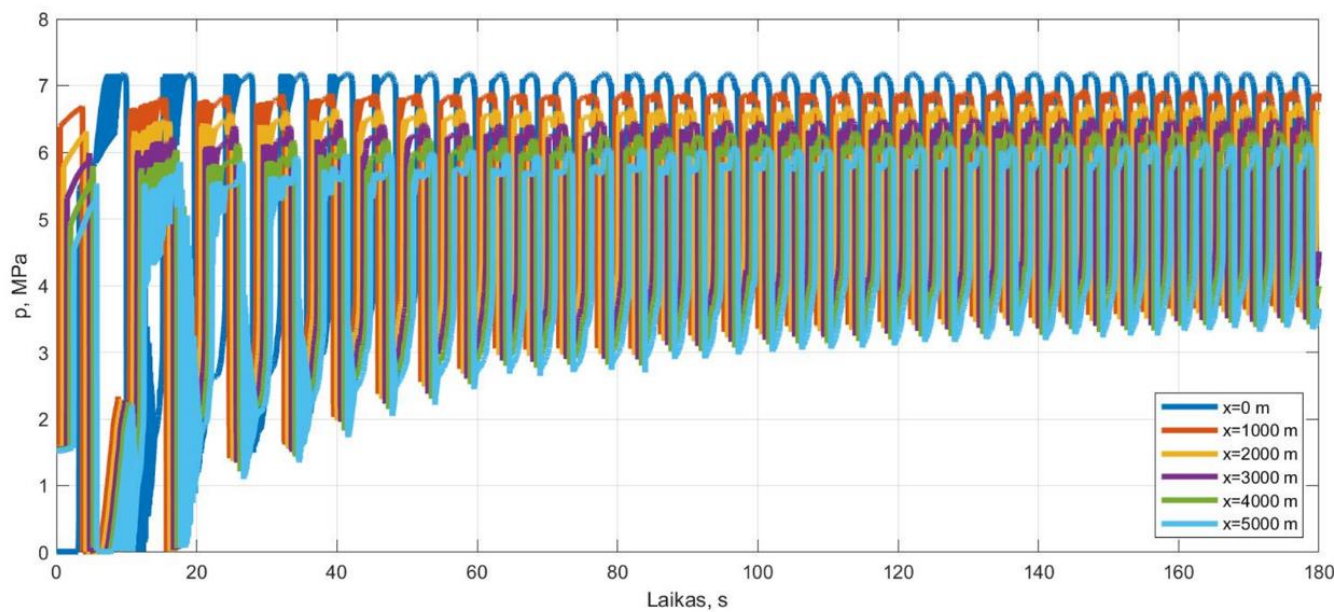


5.14 pav. Naftos tankio priklausomybė nuo santykinio dujų tūrio

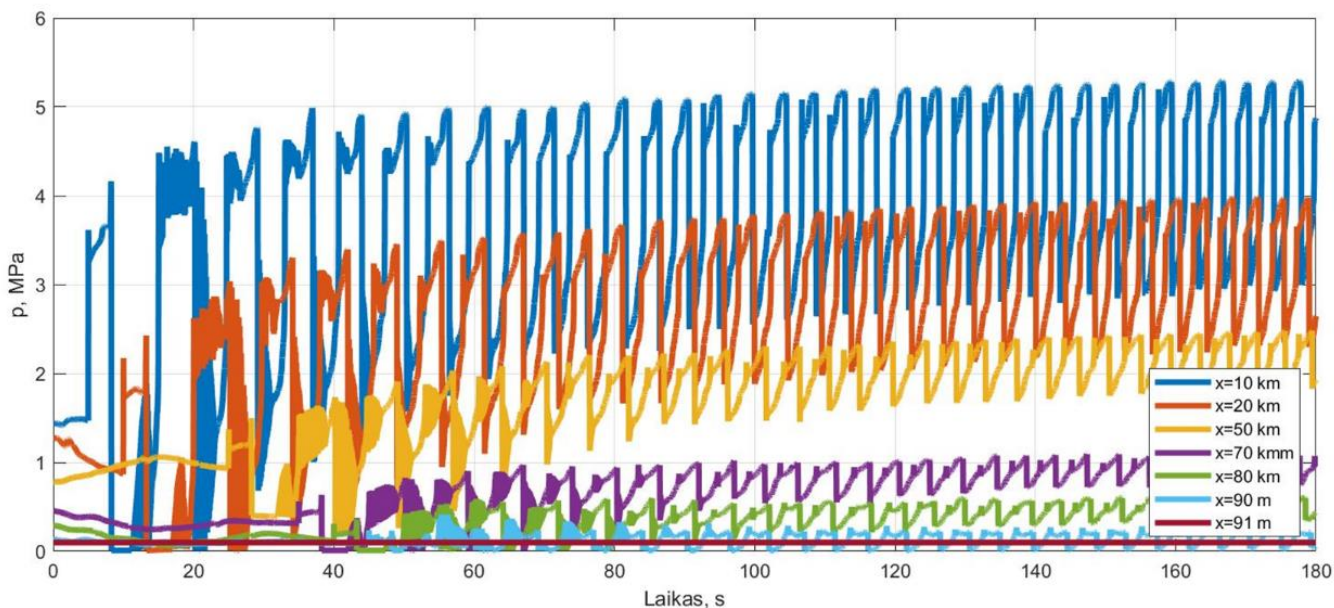


5.15 pav. Tūrinio tamprumo modulio priklausomybė nuo santykinio dujų tūrio

Kai $\kappa = 0$ ir $\nu = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, slėgio kitimas 13-oje koordinatėje ir 180 s laikotarpiu pavaizduotas 5.16 ir 5.17 paveiksluose. Pirmojoje koordinatėje stebimos didžiausios pulsacijos.



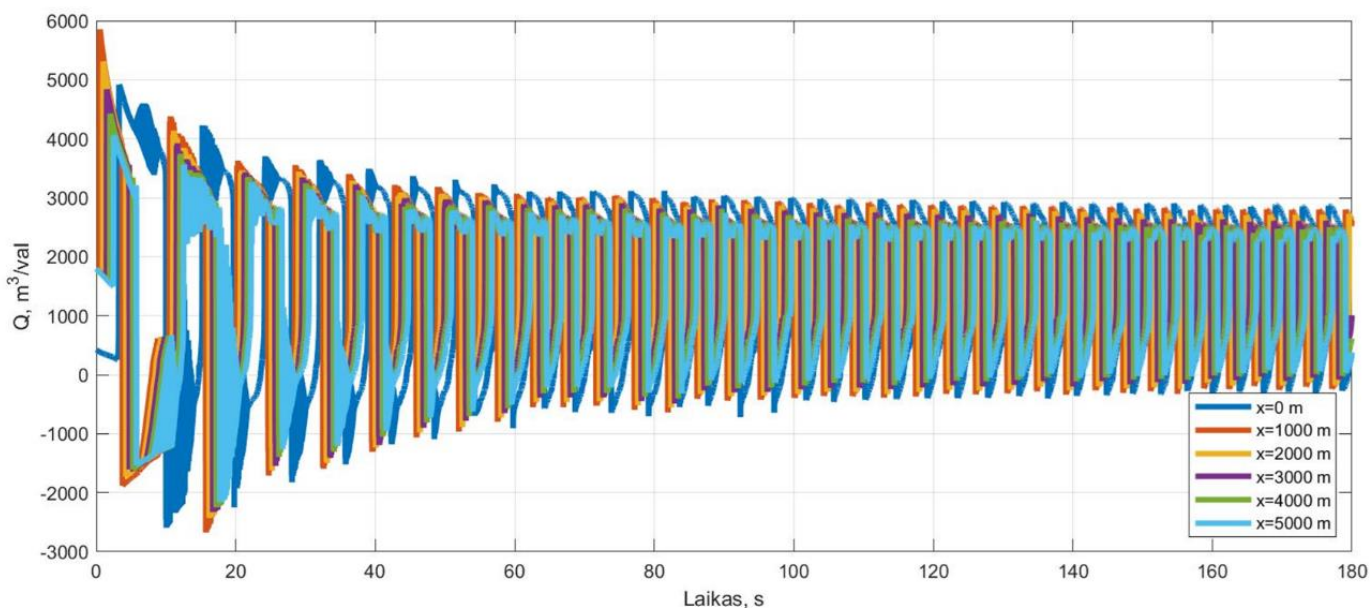
5.16 pav. Slėgio kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $\nu = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0$



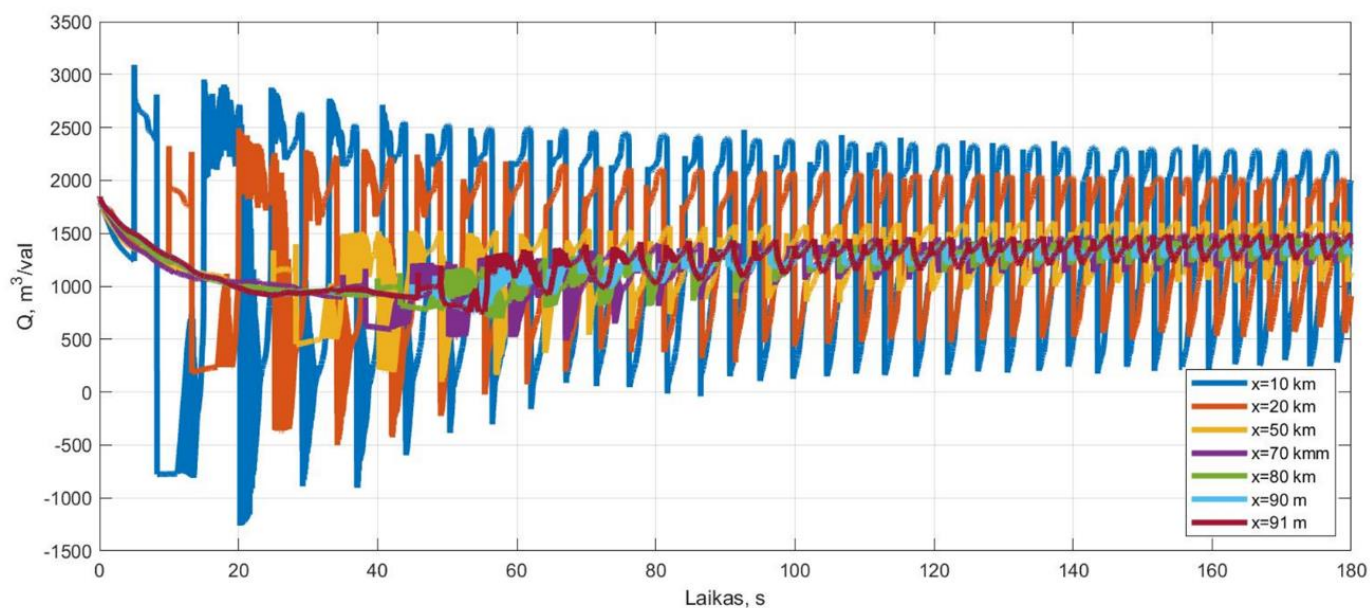
5.17 pav. Slėgio kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $v = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0$

Kai $\kappa = 0$ ir $v = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, debito kitimas 13-oje koordinatėse ir 180 s laikotarpiu pavaizduotas 5.18 ir 5.19 paveiksluose. Paskutiniuoju, 13-toje koordinatėje, praėjus 180 sekundžių nusistovi $1377 \text{ m}^3/\text{val.}$ magistralinio vamzdyno našumas.

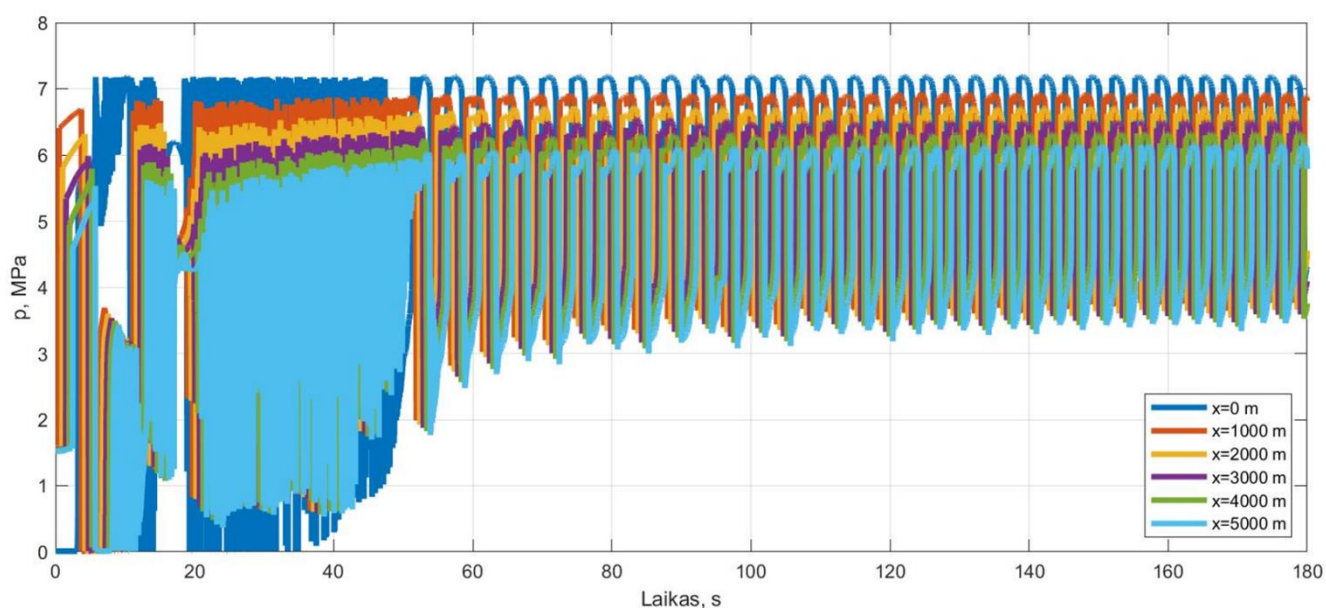
Kai $\kappa = 0,1$ ir $v = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, slėgio kitimas 13-oje koordinatėse ir 180 s laikotarpiu pavaizduotas 5.20 ir 5.21 paveiksluose. Iš 5.20 paveiksle pateikto grafiko matyti, kad koordinatėje x_1 vyksta didžiulės slėgio pulsacijos.



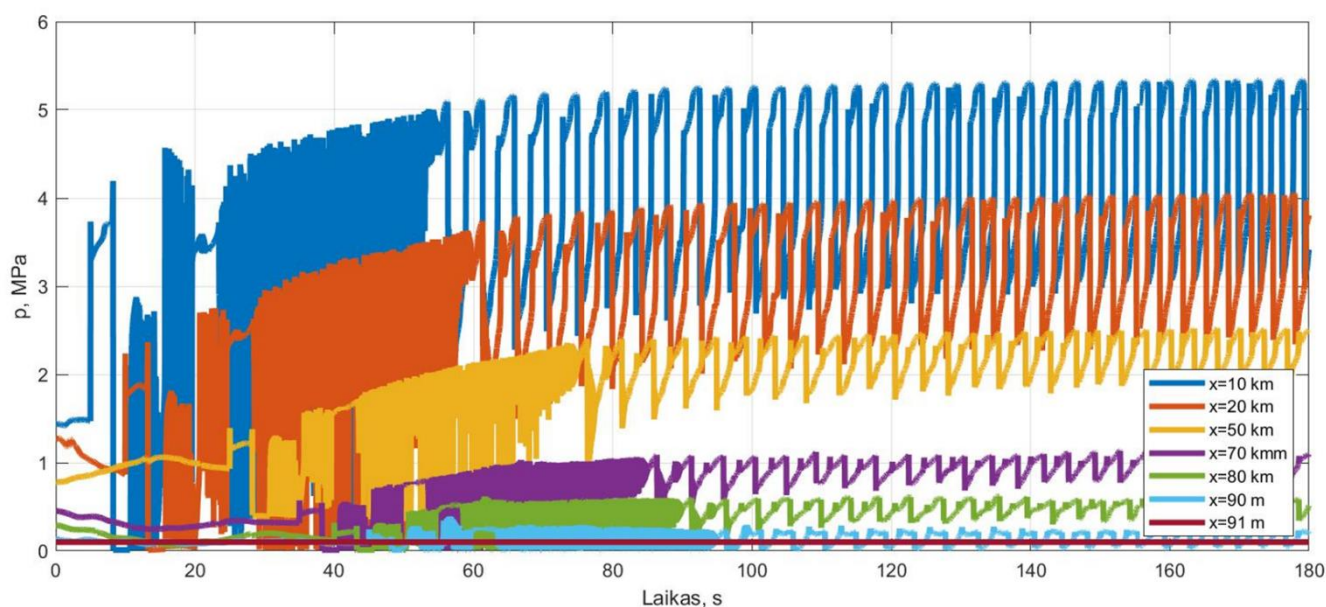
5.18 pav. Našumo kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $v = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0$



5.19 pav. Našumo kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $\nu = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0$

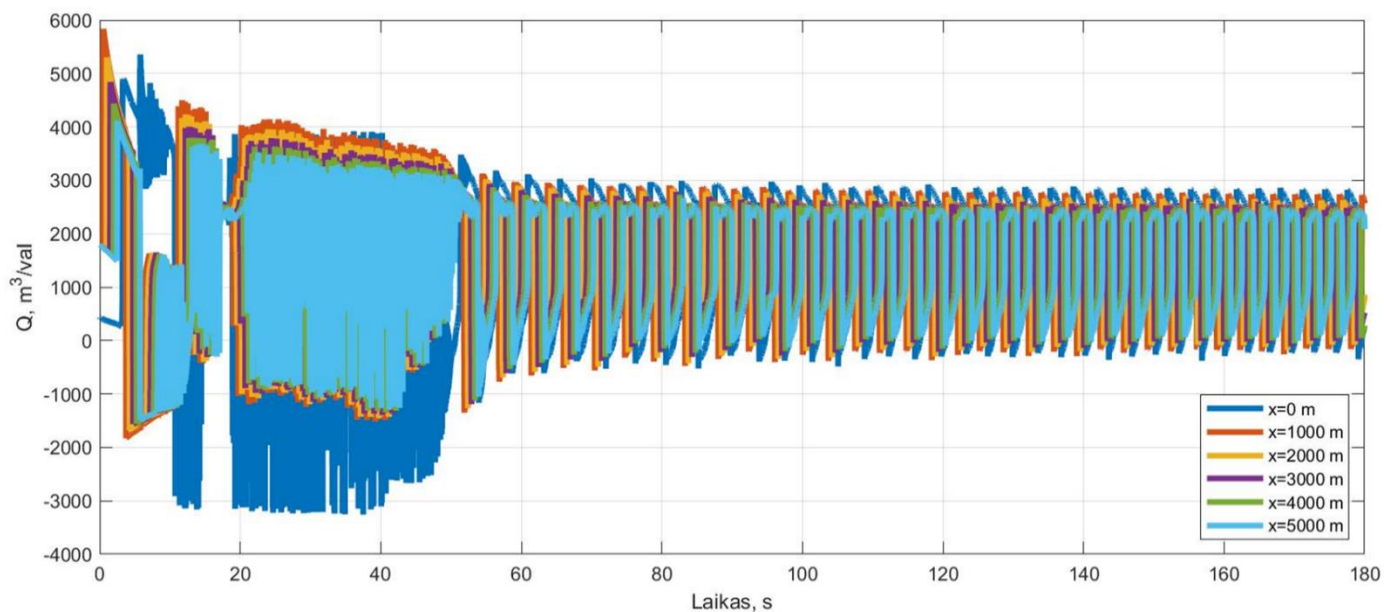


5.20 pav. Slėgio kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $\nu = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,1$

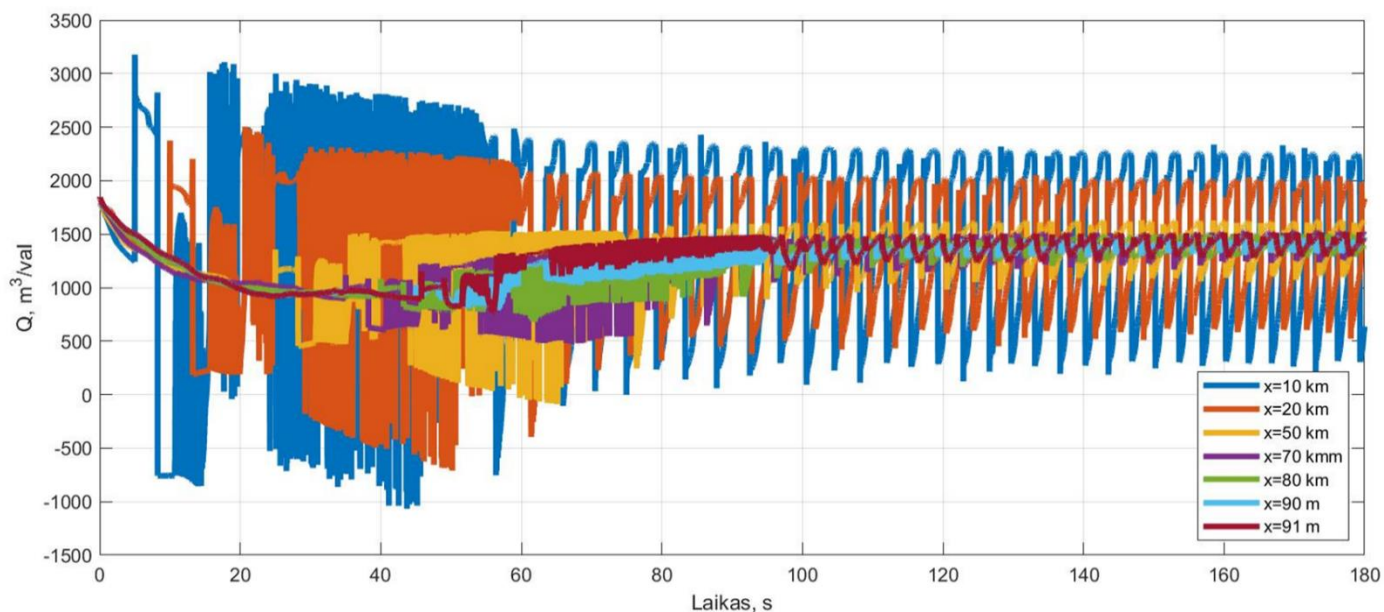


5.21 pav. Slėgio kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $\nu = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,1$

Kai $\kappa = 0,1$ ir $\nu = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, debito kitimas minėtose charakteringose koordinatėse 180 s laikotarpiu pavaizduotas 5.22 ir 5.23 paveiksluose. Iš 5.23 paveiksle pateikto grafiko matyti, kad po 180 sekundžių nusistovi $1464 \text{ m}^3/\text{val.}$ magistralinio vamzdyno našumas.

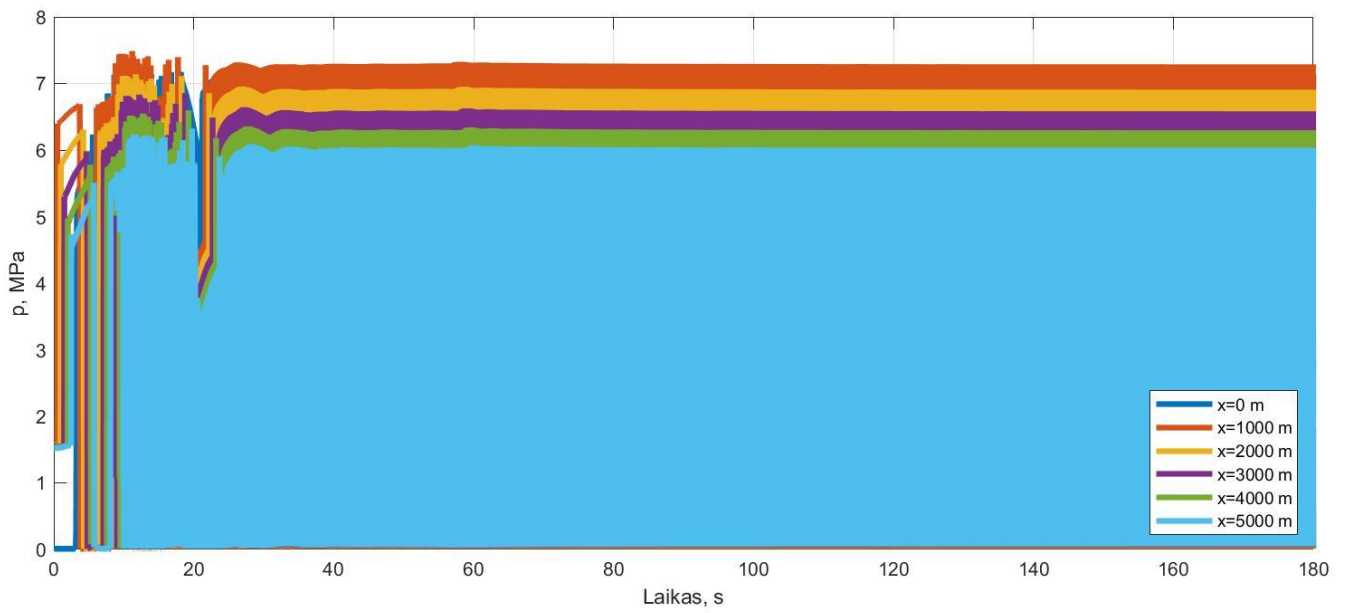


5.22 pav. Našumo kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $\nu = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,1$

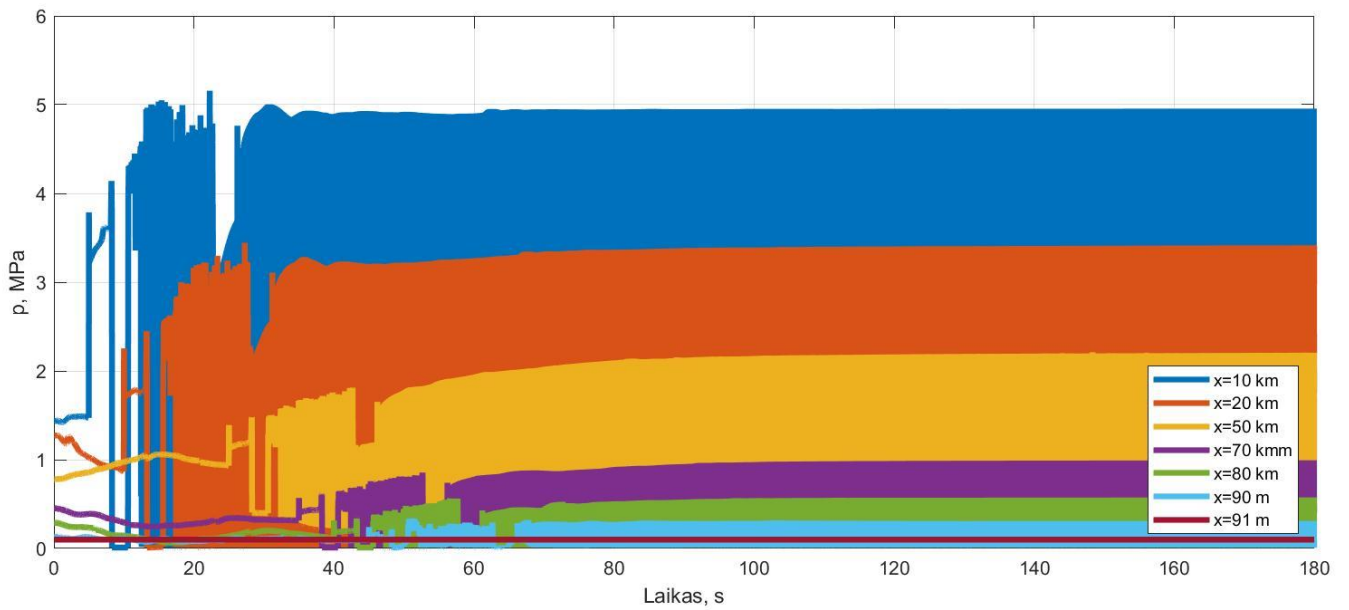


5.23 pav. Našumo kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $\nu = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,1$

Kai naftos klampa $\nu = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, o $\kappa = 0,2$, slėgio kitimas 13-oje koordinatėse ir 180 s laikotarpiu pavaizduotas 5.24 ir 5.25 paveiksluose. Iš minėtuose paveiksluose pateiktų grafikų matyti, jog padidėjus santykinio dujų tūrio reikšmei iki $\kappa = 0,2$, slėgio pulsacijos dar labiau padidėjo.

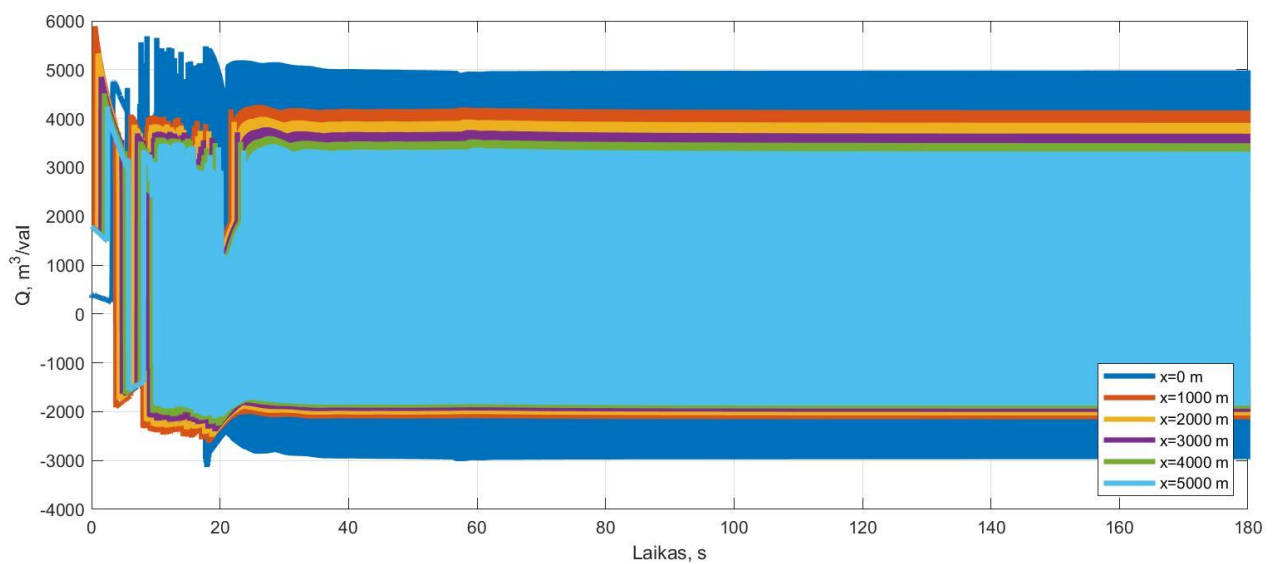


5.24 pav. Slėgio kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $\nu = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,2$

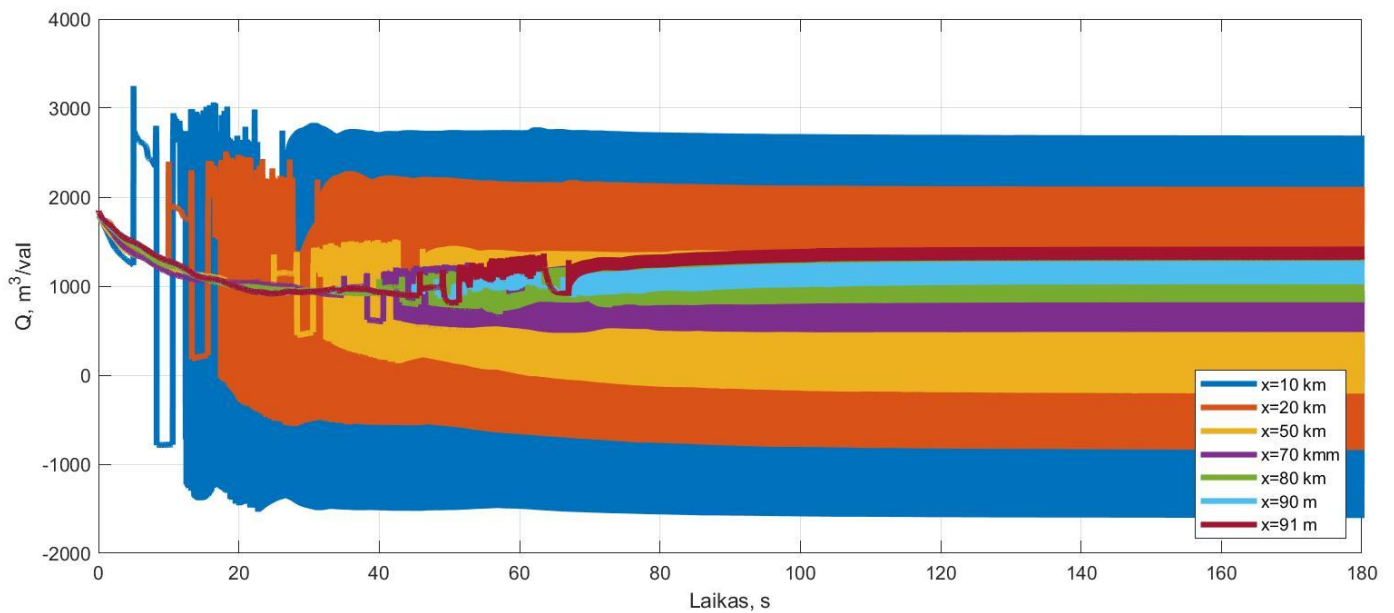


5.25 pav. Slėgio kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $\nu = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,2$

Kai $\kappa = 0,2$ ir $\nu = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, debito kitimas minėtose charakteringose koordinatėse 180 s laikotarpiu pavaizduotas 5.26 ir 5.27 paveiksluose. Iš 5.27 paveiksle pateikto grafiko matyti, kad po 180 sekundžių nusistovi $1298 \text{ m}^3/\text{val.}$ magistralinio vamzdyno našumas.

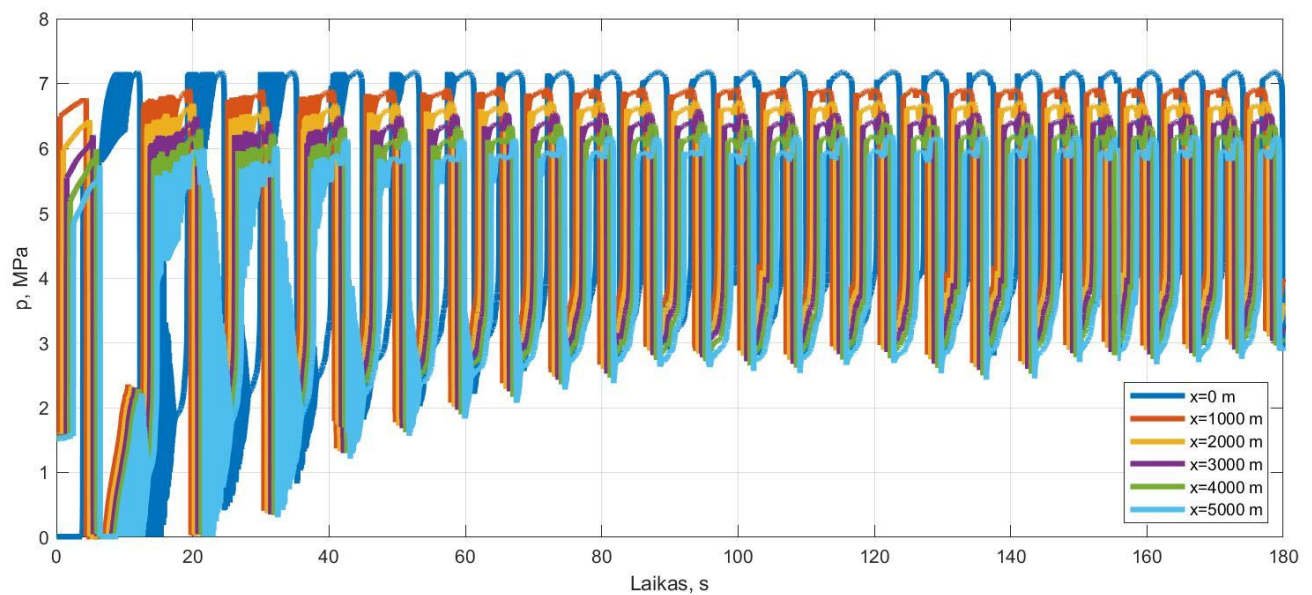


5.26 pav. Našumo kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $\nu = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,2$

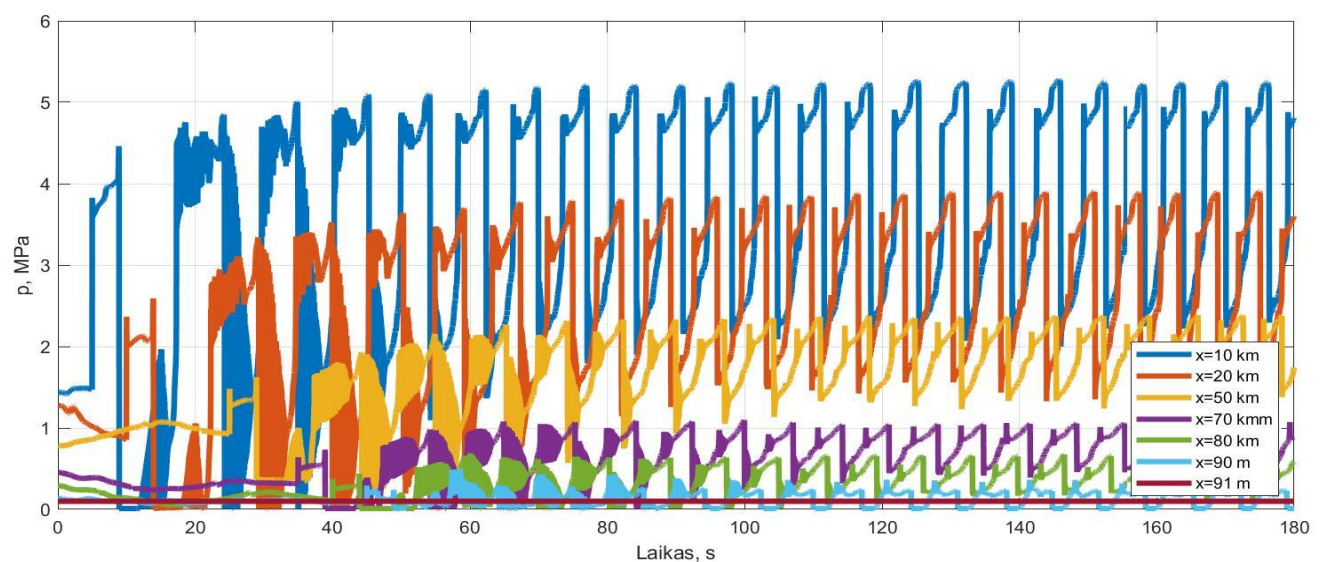


5.27 pav. Našumo kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $\nu = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,2$

Nustatomas slėgio ir našumo kitimas laike, kai REBCO naftos klampa $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, kai $\kappa = 0$, $\kappa = 0,1$ ir $\kappa = 0,2$. Slėgio kitimas charakteringose koordinatėse 180 s laikotarpiu, kai $\kappa = 0$, pavaizduotas 5.28 ir 5.29 paveiksluose.

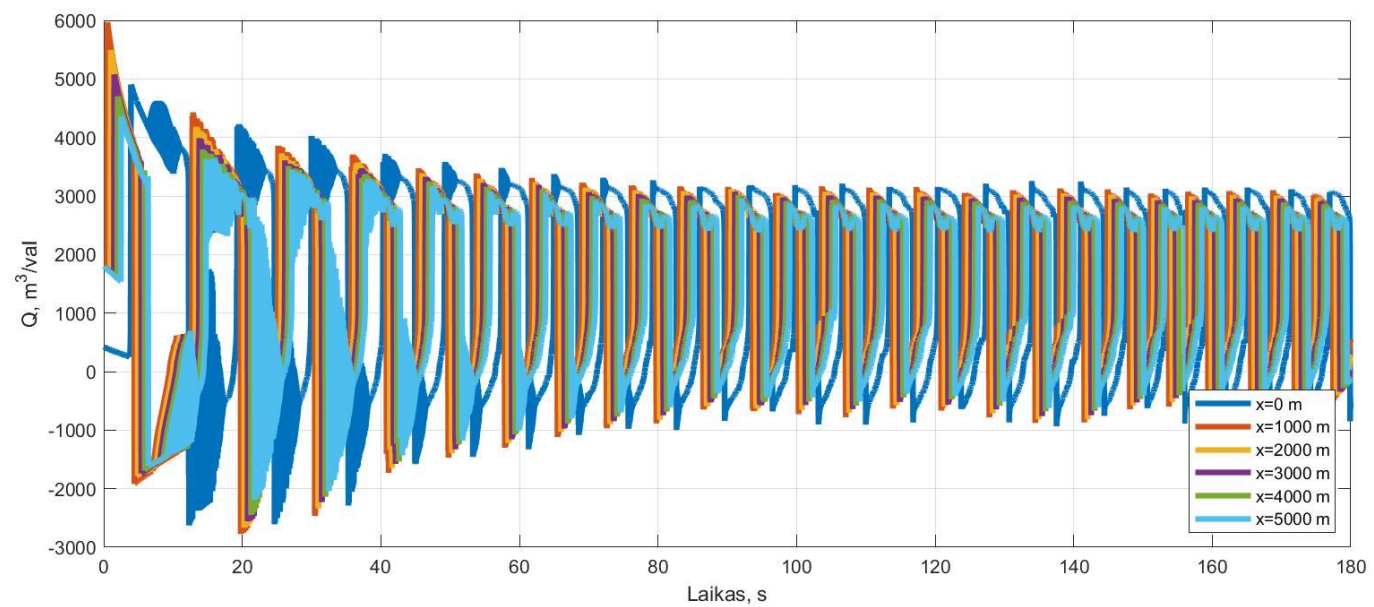


5.28 pav. Slėgio kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0$

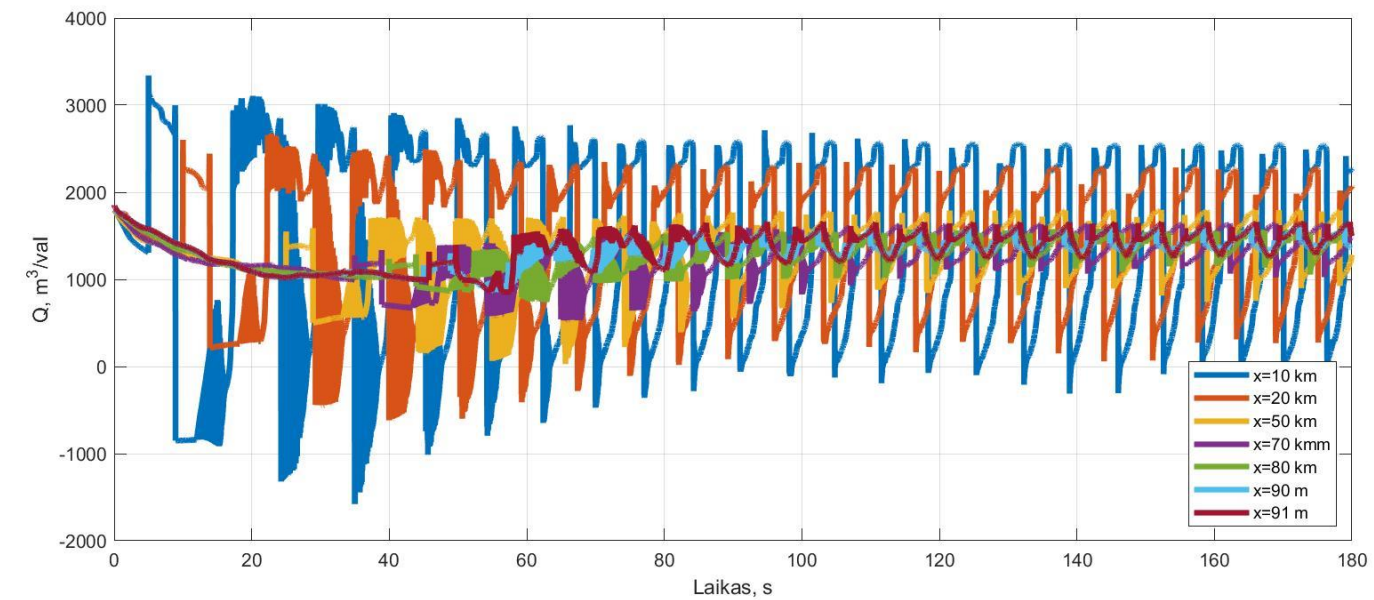


5.29 pav. Slėgio kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0$

Našumo kitimas laike, kai $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0$, pavaizduotas 5.30 ir 5.31 paveiksluose. Iš 5.31 paveiksle pateikto grafiko matyti, kad po 180 sekundžių nusistovi $1493 \text{ m}^3/\text{val.}$ magistralinio vamzdyno našumas.

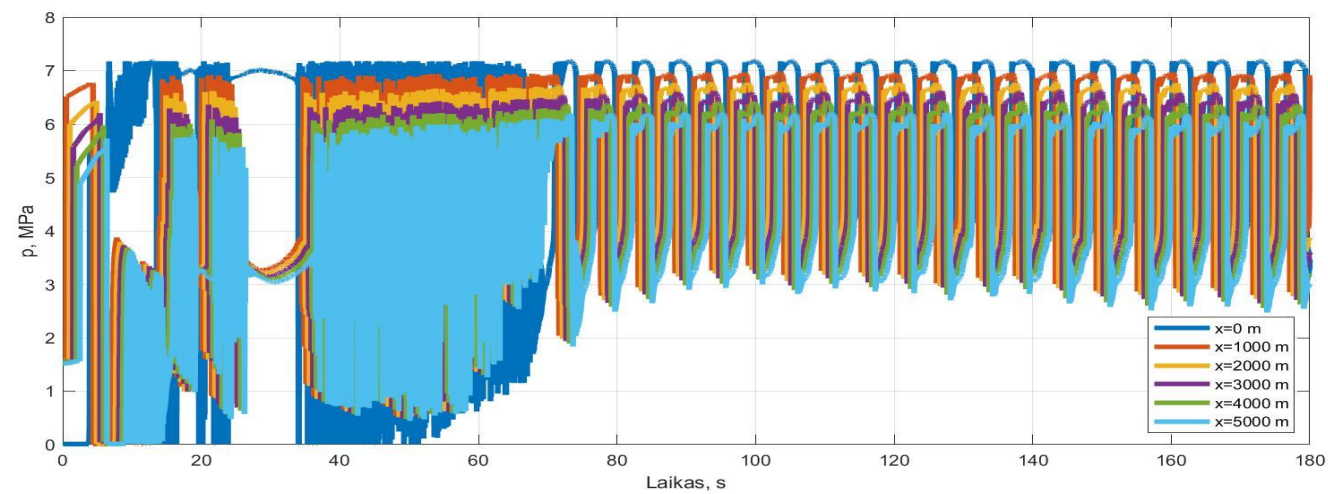


5.30 pav. Našumo kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0$

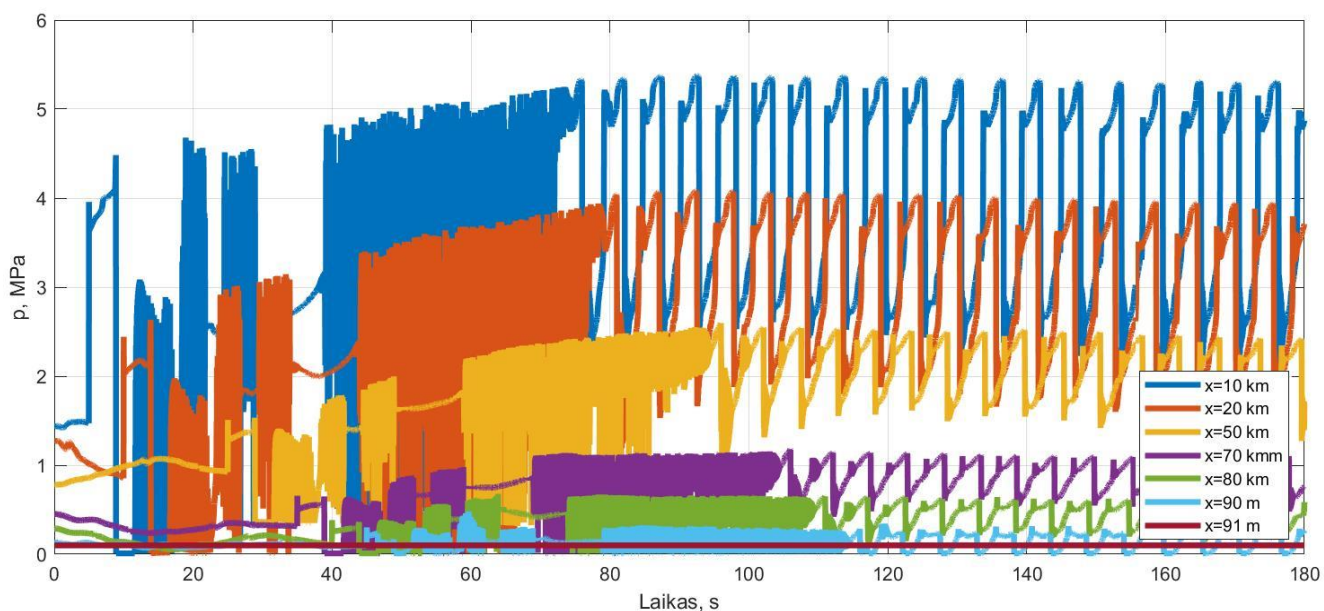


5.31 pav. Našumo kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0$

Kai naftos klampa $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, o $\kappa = 0,1$, slėgio kitimas 13-oje koordinatė 180 s laikotarpiu pavaizduotas 5.32 ir 5.33 paveiksluose.

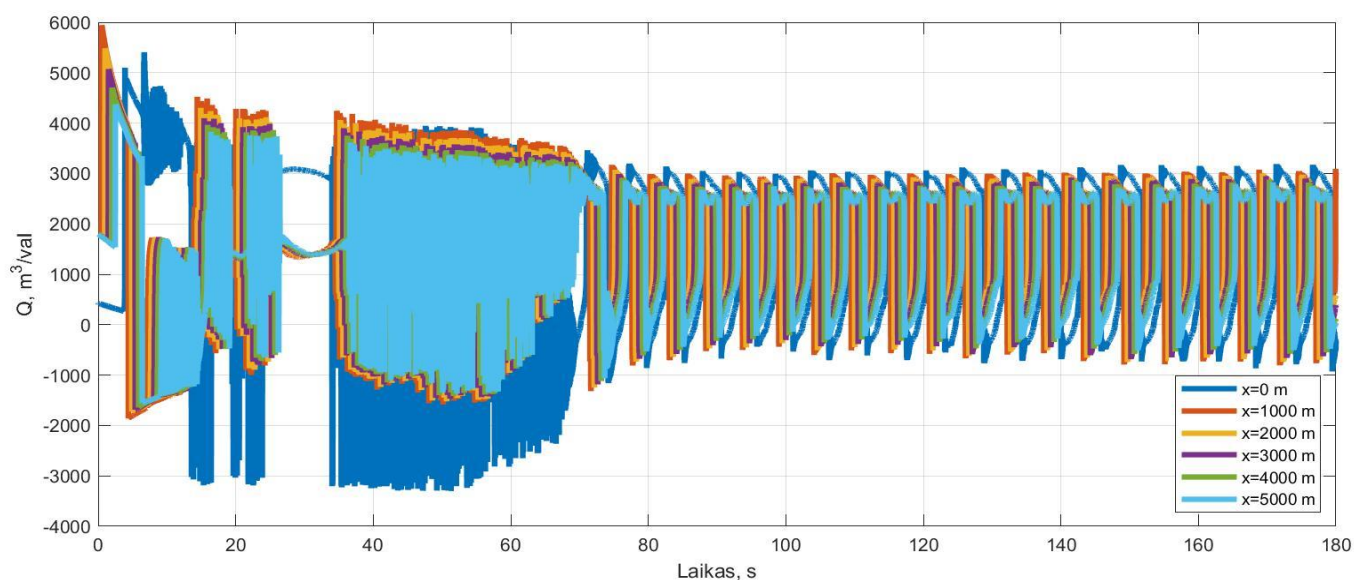


5.32 pav. Slėgio kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,1$

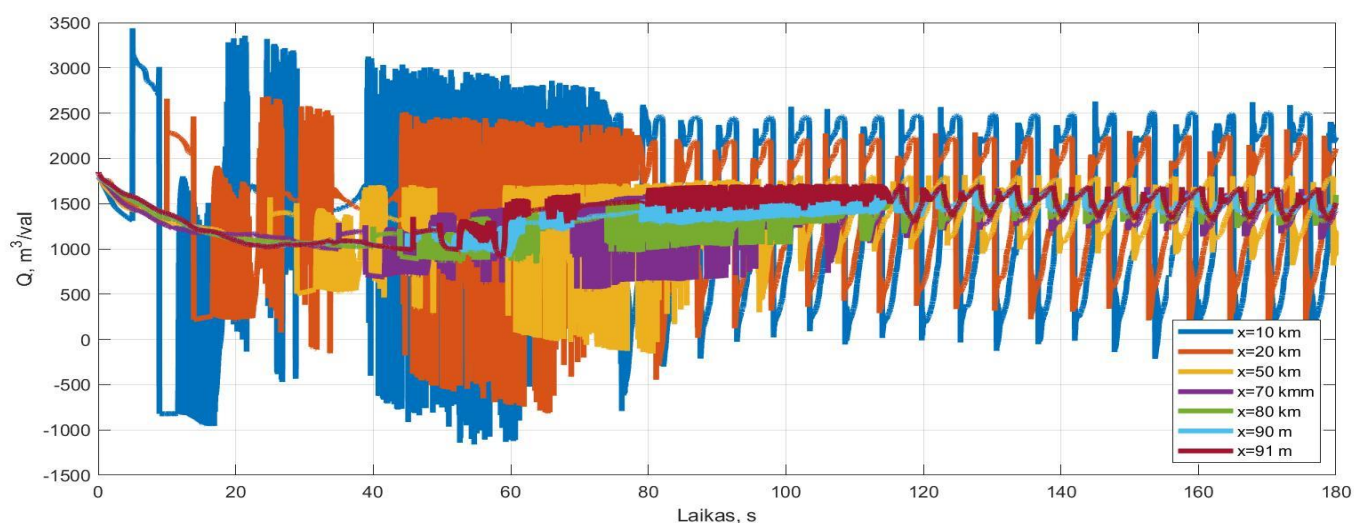


5.33 pav. Slėgio kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,1$

Našumo kitimas laike, kai $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,1$, pavaizduotas 5.34 ir 5.35 paveiksluose. Iš 5.35 paveiksle pateikto grafiko matyti, kad po 180 sekundžių nusistovi $1507 \text{ m}^3/\text{val.}$ magistralinio vamzdyno našumas.

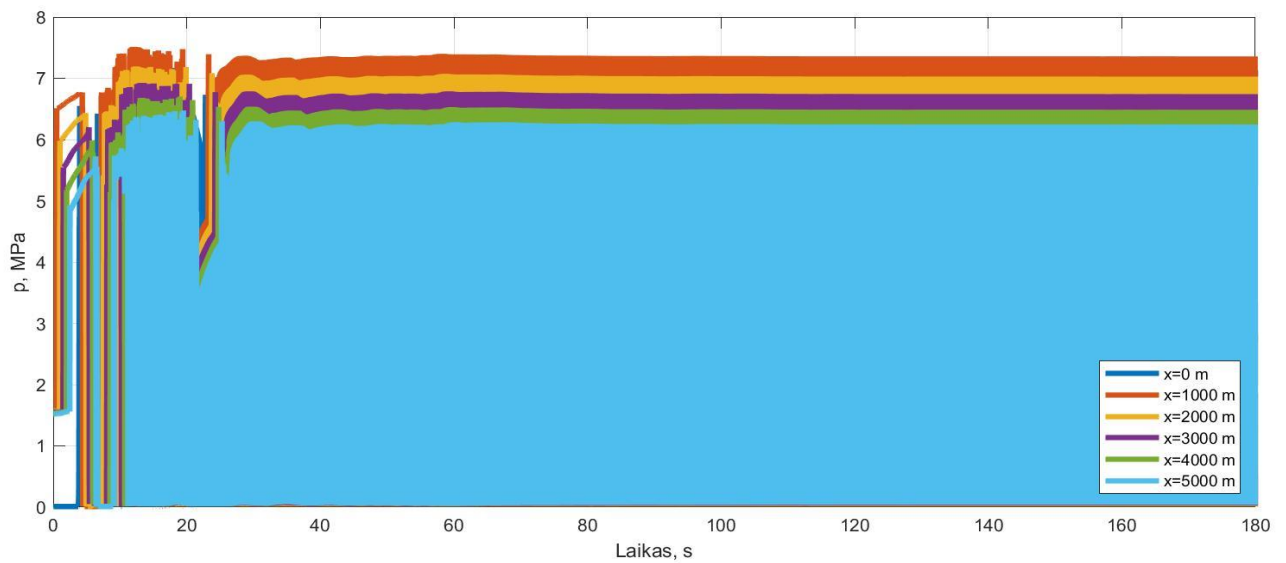


5.34 pav. Našumo kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,1$

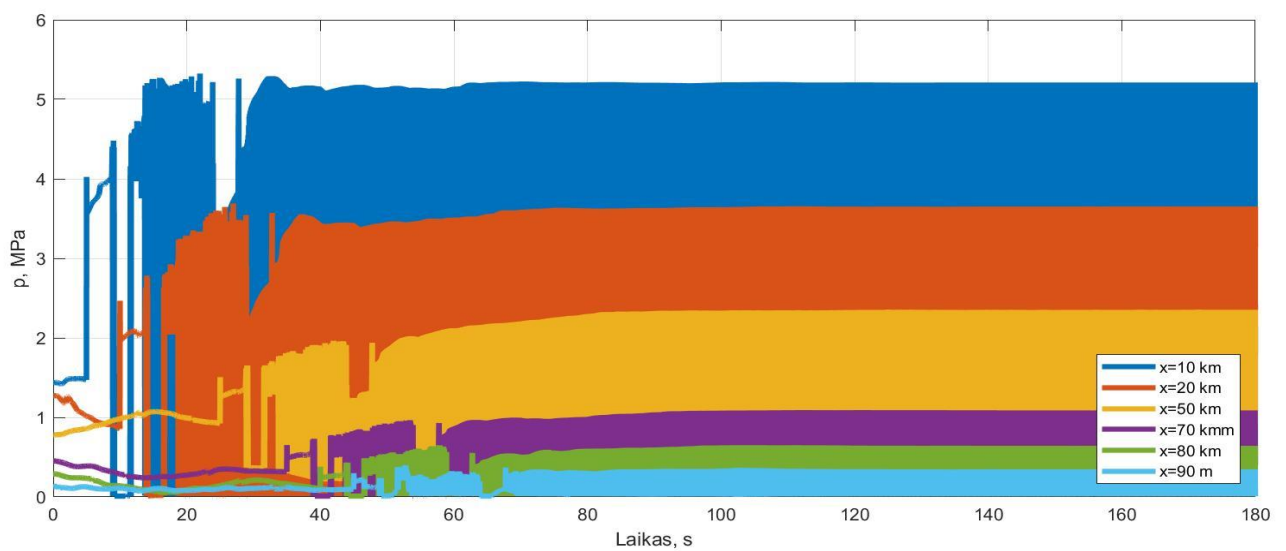


5.35 pav. Našumo kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,1$

Slėgio kitimas charakteringose koordinatėse 180 s laikotarpiu, kai $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,2$, pavaizduotas 5.36 ir 5.37 paveiksluose. Abiejuose paveiksluose pateiktuose grafikuose stebimas didžiulis slėgio pulsavimas.

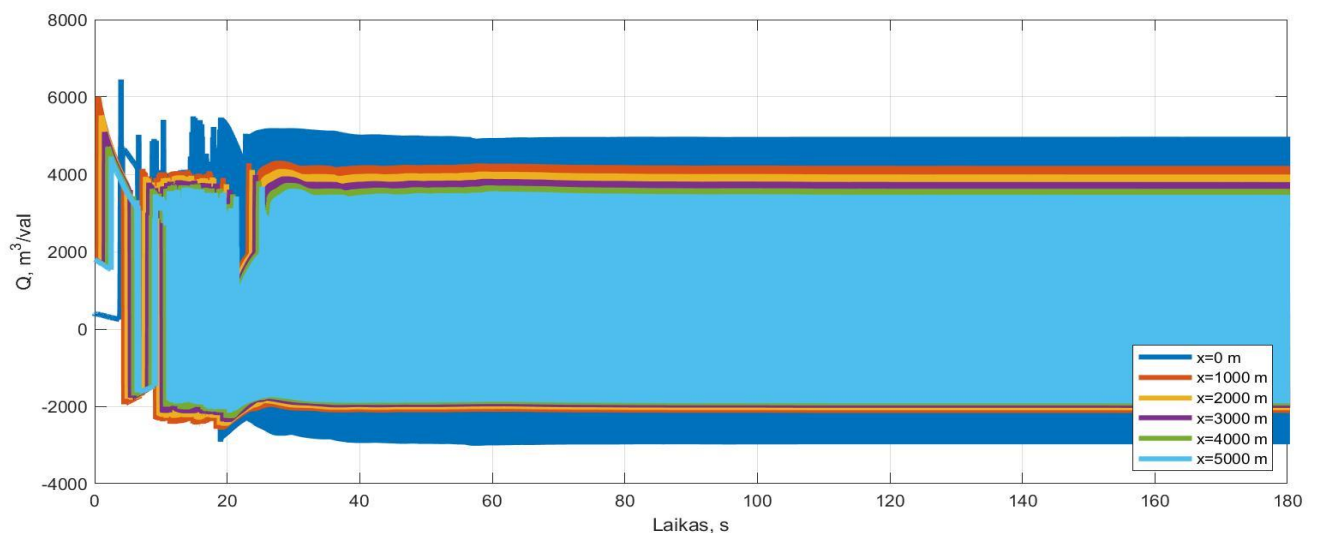


5.36 pav. Slėgio kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,2$

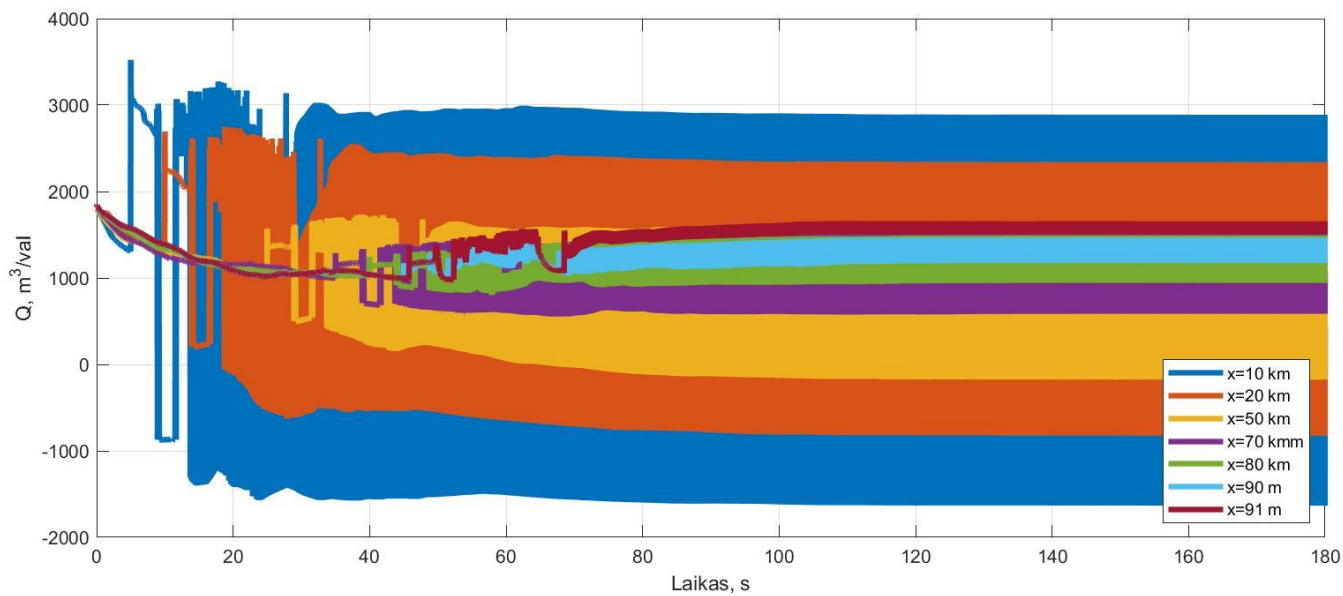


5.37 pav. Slėgio kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,2$

Našumo kitimas laike, kai $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,2$, pavaizduotas 5.38 ir 5.39 paveiksluose. Po 180 sekundžių nusistovi 1509 m^3/val . magistralinio vamzdyno našumas.



5.38 pav. Našumo kitimas koordinatėse $x_1 - x_6$, kai $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,2$



5.39 pav. Našumo kitimas koordinatėse $x_7 - x_{13}$, kai $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\kappa = 0,2$

Išanalizavus dviejų klampų ($\nu = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) naftos tekėjimą magistraliniame vamzdyne, esant skirtingoms santykinio dujų tūrio reikšmėms, našumo reikšmės pateiktos 8 lentelėje.

8 lentelė. Vamzdyno našumas, esant skirtingoms santykinio dujų tūrio ir naftos klamos reikšmėms

	$\nu=14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$			$\nu=31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$		
	$\kappa=0$	$\kappa=0,1$	$\kappa=0,2$	$\kappa=0$	$\kappa=0,1$	$\kappa=0,2$
$Q, \text{ m}^3/\text{h}$	1493	1507	1509	1377	1464	1298

Išvados

1. Naftos rezervuare aukštis daro didelę įtaką į pirmąjį išcentrinį siurblį įtekančiam debitui. Atlikus sistemos REZERVUARAS–ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIS SIURBLYS tyrimus, nustatyta, kad mažėjant naftos rezervuare aukščiui H ($0 < H \leq 16,5 \text{ m}$), į pirmąjį siurblį įtekantis debitas mažėja.
2. Tyrimo eigoje nustatyta, kad įsiurbimo magistralė nėra valoma, todėl daryta prielaida, kad įsiurbimo magistralės vidinis paviršius padengtas 1 cm parafino nuosėdų sluoksniu. Esant tokioms sąlygoms, nustatyta, kad mažėjant naftos rezervuare aukščiui debitas mažėja nuo $3939 \text{ m}^3/\text{val.}$ iki $46 \text{ m}^3/\text{val.}$
3. Mažėjant naftos temperatūrai, naftos klampa didėja, o debitas mažėja, kadangi didėja transportavimo slėgio nuostoliai (didėja tangentiniai įtempimai tarp srauto ir įsiurbimo magistralės vamzdžių vidinių paviršių).
4. Nustatyta, kad transportuojant REBCO naftą iš rezervuaro į pirmąjį siurblį, kai siurblio žemo slėgio ertmėje slėgis p_L kinta nuo $p_L = -0,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ iki $p_L = 0,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ atmosferinio slėgio atžvilgiu, debitas, įtekantis į pirmąjį siurblį kinta $5475 \text{ m}^3/\text{val.}$ iki $46 \text{ m}^3/\text{val.}$ Be to, kai $p_L = 0,05 \cdot 10^6 \text{ Pa}$, visų analizuotų klampų ($\nu = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $\nu = 20,583 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$) nafta nebeteka į pirmąjį siurblį, kai $H < 5,75 \text{ m}$.
5. Atlikti sistemos REZERVUARAS–ĮSIURBIMO MAGISTRALĖ–IŠCENTRINIAI SIURBLIAI – MAGISTRALINIS NAFTOTIEKIS tyrimai parodė, kad didžiausios srauto (slėgio ir debito) pulsacijos vyksta vamzdyno pradžioje ($x = 0..10 \text{ km}$), kurios priklauso nuo naftos (naftos ir dujų mišinio) klamos, tankio ir tūrinio tamprumo modulio.
6. Kuo mažesnis dujų kiekis mišinyje, tuo mišinys tampa mažiau spūdis ir srauto pulsacijos yra mažesnės. Naftos (naftos ir dujų mišinio) klampa daro įtaką slėgio nuostoliams, todėl naftos transportavimo našumas kinta. Nustatyta, kad, kai $\nu = 31,04 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ir $\nu = 14,417 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, naftos transportavimo našumas didėja santykiniam dujų tūriui naftos mišinyje didėjant nuo 0 iki 0,1. Kuo didesnis santykinis dujų tūris mišinyje, tuo debito pulsacijos magistralinio vamzdyno gale didesnės.
7. Siekiant geriau suprasti vykstančius hidrodinaminius procesus, buvo nagrinėtas atskiras atvejis, kai santykinis dujų tūris naftos mišinyje $\kappa = 0,2$. Esant visoms nagrinėtoms klampoms, kai $\kappa = 0,2$, pastebimos didelės slėgio ir debito pulsacijos visą naftos transportavimo laiką nuo 0 iki 180 sekundžių.

Literatūra

- Akcinės bendrovės „ORLEN Lietuva“ Vamzdynų ir terminalo operacijų padalinio Būtingės naftos terminalo saugos 2013 m. ataskaita (atnaujinta 2017-11-02). Prieiga per internetą: <https://www.orlenlietuva.lt/LT/Company/Reports/Documents/B%C5%ABting%C4%97s%20saugos%20ataskaita.pdf>.
- Bogdevičius, M., Janutėnienė, J., Jonikas, K., Guseinovicė, E., Drakšas, M. (2013). Mathematical modeling of oil transportation by pipelines using anti-turbulent additives. *Journal of Vibroengineering*, 15 (1), 419–427.
- Bogdevičius, M. (2012). *Vamzdynų technologiniai įrenginiai*. Technika.
- Bogdevičius, P., Prentkovskis, O., Bogdevičius, M. (2017). Transmisijos su kardanine jungtimi parametrų įtaka išcentrinio siurblio charakteristikoms. *Mokslas – Lietuvos ateitis*, Vol. 9 (5), 559–564.
- Choi, Y. D., Kurokawa, J. and Imamura, H. (2007). Suppression of cavitation in inducers by J-Grooves. *Journal of Fluids Engineering: T, ASME*, 129, 15–22.
- Chudina, M. 2003. *Noise as an indicator of cavitation in a centrifugal pump*. *Acoustical Physics*, 49, 463–474.
- Coutier-Delgosha, O., Devillers, J. F., Leriche, M. and Pichon T. (2005). Effect of wall roughness on the dynamics of unsteady cavitation. *Journal of Fluids Engineering, ASME*, 127, 726–733.
- Dong, L., Zhao, Y. and Dai, C. (2019). Detection of inception cavitation in centrifugal pump by fluid-borne noise diagnostic. *Shock and Vibration*, 1–15.
- Duplaa, S., Coutier-Delgosha, O., Dazin, A., Caignaert, G. and Roussette, O. (2008). Cavitation inception in fast start up. In conference “The twelfth international symposium on transport phenomena and dynamics of rotating machinery – ISROMAC –12”, 22 February 2008, Honolulu-Hawaii, United States.
- Du, E., Zhao, Q., Xiao, Y., Cai, L. and Tao, R. (2018). Electric field suppressed turbulence and reduced viscosity of asphaltene base crude oil sample. *Fuel*, 220, 358–362.
- Hart, A. (2014). A review of technologies for transporting heavy crude oil and bitumen via pipelines. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 4(3), 327–336.
- Hou-lin, L., Wang, J., Wang, Y., Zhang, H. and Huang, H. (2014). Influence of the empirical coefficients of cavitation model on predicting cavitating flow in the centrifugal pump. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6, 119–131.
- Ibrahim, R. I., Odah, M. K. and Al-Mufti, A. (2019). An Overview on the Recent Techniques for Improving the Flowability of Crude Oil in Pipelines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 579(1).
- Jonikas, K. (2009). Energinių sąnaudų mažinimas magistraliniame naftotiekyje: Magistro darbas. Vilnius: Vilniaus Gedimino technikos universitetas.
- Kawanami, Y., Kato, H., Yamaguchi, M., Tanimura, M. and Tagaya, Y. (1997). Mechanism and control of cloud cavitation. *Journal of Fluids Engineering: T, ASME*, 119, 788–794.
- Kuiper G. (2010). New developments and propeller design. *Journal of Hydrodynamics*, 22, 7–16.

- Li, X. J., Yuan, S. Q., Pan, Z. Y., Juan, J. P., Fu, Y. (2013) Numerical simulation of leading edge cavitation within the whole flow passage of a centrifugal pump. *Science China Technological Sciences*, 56, 2156–2162.
- Lietuvos standartas LST EN ISO 3675:1999. Žalia nafta ir skystieji naftos produktai. Laboratorinis tankio nustatymas. Hidrometrinis metodas (ISO 3675:1999). 9 p.
- Lietuvos standartas LST EN ISO 12185:1999. Žalia nafta ir skystieji naftos produktai. Tankio nustatymas. Vibracinis U vamzdelio metodas (ISO 12185:1996 + ISO 2185:1996/Cor.1:2001). 13 p.
- Lietuvos standartas LST EN ISO 3104+AC. Naftos produktai. Šviesūs ir tamsūs skystieji naftos produktai. Kinematinės klampos nustatymas ir dinaminės klampos apskaičiavimas. 16 p.
- Lietuvos standartas LST EN 12:1999. Naftos produktai. Garų slėgio nustatymas pagal Reidą. Drėgnasis metodas.
- Lu, J., Yuan, S., Parameswaran, S., Yuan, J., Ren, X. and Si, Q. (2017). Investigation on the vibration and flow instabilities induced by cavitation in a centrifugal pump. *Advances in Mechanical Engineering*, Vol. 9 (4), 1–11.
- Lu, J. X., Yuan, S. Q., Luo, Y., Yuan, J., Zhou, B. and Sun, H. (2016). Numerical and experimental investigation on the development of cavitation in a centrifugal pump. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 230, 171–182.
- Ni Y. Y., Yuan S. Q., Pan Z. Y., et al. *Detection of cavitation of in centrifugal pump by vibration methods*. Chinese Journal of Mechanical Engineering 2008; 21: 46–49.
- Obaseki, M., Paul, E. (2020). Dynamic modeling and prediction of wax deposition thickness in crude oil pipelines (*in press*). *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*.
- Omar A. K., Khaldi A. and Ladouani A. (2017). Prediction of centrifugal pump performance using energy loss analysis. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 15 (3), 210-221.
- Shojaeefard, M. H. and Boyaghchi, F. A. (2007). Studies on the influence of various blade outlet angles in a centrifugal pump when handling viscous fluids. *American Journal of Applied Science*, 4 (9), 718-724.
- Shojaeefard, M. H., Tahani, M., Ehghaghi, M. B., Fallahian, A. and Beglari, B. (2012). Numerical study of the effects of some geometric characteristics of a centrifugal pump impeller that pumps a viscous fluid. *Computers & Fluids*, 60, 61-70.
- Shojaeefard, M. H., Salimian Rizi, B., Khalkhali, A. and Tahani, M. (2015). A new method to calculate centrifugal pump performance parameters for industrial oils. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 8 (4), 673–681.
- Sudintas, A. (2009). *Kuro energetika. Mokomoji knyga*. Technologija. 44–64.
- Timouchev, S., Panaiotti, S., Knyazev, V. and Soldatov, V. (2009). Validation of numerical procedure for assessment of centrifugal pump cavitation erosion. *In Twenty fifth International pump users symposium, 23–26 February, Houston, Texas, United States*.
- Vyčius, J., Kustienė, R. (2008). Hidraulinės mašinos ir hidroelektrinės. Mokomoji knyga. Ardiva.
- Zhao, W. and Zhao, G. (2017). An active method to control cavitation in a centrifugal pump by obstacles. *Advances in Mechanical Engineering*, 9 (11).