Marijonas BOGDEVičIUS

VAMZDYNŲ TECHNOLOGINIAI ĮRENGINIAI

Projekto kodas
VP1-2.2-ŠMM 07-K-01-023

Studijų programų atnaujinimas
pagal ES reikalavimus, gerinant
studijų kokybę ir taikant
inovatyvius studijų metodus

Vilnius „Technika“ 2012

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Marijonas BOGDEVIČIUS

VAMZDYNŲ TECHNOLOGINIAI ĮRENGINIAI

Mokomoji knyga

Vilnius „Technika“ 2012

M. Bogdevičius. Vamzdynų technologiniai įrenginiai. Vilnius:
Technika, 2012. 168 p. [4 aut. l. 2012 09 20]

Knygoje pateikta vamzdynų sandara, jos pagrindiniai elementai. Pagrindinis dėmesys skiriamas transportuojamos terpės fiziniams ir mechaniniams savybėms bei pagrindiniams hidrodinamikos dėsniams, kurių žinojimas yra būtinas norint įgyti išsamias žinias apie skysčių ir dujų transportavimą vamzdynais. Nemažai dėmesio skirta išcentriniam siurbliams, jų pagrindinėms charakteristikoms, hidrodinaminių procesų modeliavimui. Supažindinama su vamzdynų atsparuminiu skaičiavimu, vamzdynu bandymais.

Knyga skirta transporto inžinerijos specialistams, bakalaurantams, magistrantams bei doktorantams. Ji gali būti naudinga ir kitų sričių specialistams.

Leidinį rekomendavo: Transporto inžinerijos fakulteto studijų komitetas.

Recenzavo: doc. dr. Rima Mickevičienė, Klaipėdos universitetas
doc. dr. Olegas Prentkovskis, Vilniaus Gedimino technikos
universitetas

Leidiny parengtas ir išleistas už Europos struktūrinių fondų lėšas, jomis finansuojant VGTU Transporto inžinerijos, Biomechanikos ir Aviacinės mechanikos inžinerijos projektą „Studijų programų atnaujinimas pagal ES reikalavimus, gerinant studijų kokybę ir taikant inovatyvius studijų metodus“ pagal Lietuvos 2007–2013 m. Žmogiškųjų išteklių veiksmų programos 2 prioriteto „Mokymasis visą gyvenimą“ VP1-2.2-ŠMM-07-K priemonę „Studijų kokybės gerinimas, tarptautiškumo didinimas“. Projekto kodas Nr. VP1-2.2-ŠMM 07-K-01-023, finansavimo ir administravimo sutartis Nr. VP1-2.2-ŠMM-07-K-01-023.

VGTU leidyklos TECHNIKA 1387-S mokomosios
metodinės literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

Redaktorė *Stasė Simutytė*
Maketuotojas *Romanas Tumėnas*

eISBN 978-609-457-283-8
doi:10.3846/1387-S

© Marijonas Bogdevičius, 2012
© Vilniaus Gedimino technikos universitetas, 2012

TURINYS

1. Vamzdynų sandara	5
1.1 Pagrindinės sąvokos	5
1.2 Vamzdynų klasifikavimas	13
1.3 Magistralinio naftotiekio sudėtis	18
1.4 Magistralinis dujotiekis	21
1.5 Technologinio vamzdyno sudėtis	25
1.6 Avarinių pažeidimų magistraliniuose naftotiekiuose atsiradimo priežastys	29
2. Skysčių ir dujų fizinės savybės	35
2.1 Skysčių fizinės savybės	35
2.2 Dujų savybės	45
2.3 Angliavandenilinės dujos	52
2.4 Degančios dujos	60
2.5 Suskystintų dujų savybės	62
3. Pagrindiniai hidrodinamikos dėsniai	67
3.1 Boilio ir Marioto dėsnis	67
3.2 Gėjaus ir Liusako dėsnis	67
3.3 Šarlio dėsnis	68
3.4 Van der Valso lygtis	69
3.5 Džaulio ir Tomsono dėsnis	71
3.6 Skyčių ir dujų judėjimo lygčių sistema	76
3.7 Vamzdynų hidrodinaminių procesų matematinis modeliavimas sutelktųjų parametrų metodu	86
3.8 Vienmačio nestacionaraus skysčio judėjimo charakteristikos	96
3.9 Vienmatis nestacionarus neizoterminis dujų judėjimas	108
4. Pagrindinės išcentrinių siurblių charakteristikos ir matematiniai modeliai	118
4.1 Pagrindinės išcentrinių siurblių charakteristikos	118
4.2 Išcentrinio siurblio matematinis modelis	123
5. Vamzdynų atsparuminis skaičiavimas	131
5.1 Konstrukcinių medžiagų stiprumo ir plastiškumo kriterijai	131
5.2 Vamzdynų stipruminis skaičiavimas	142

5.3	Vamzdyno patvarumas	145
5.3.1	Vamzdyno patvarumo įvertinimas	145
5.3.2	Vamzdyno ribinio būvio tikimybinis įvertinimas	147
5.3.3	Vamzdyno sudėtingas įtempimo būvis	153
5.3.4	Įtempimų koncentracijos ir vidinio slėgio įtaka vamzdyno ruožo patikimumui	153
5.3.5	Vamzdyno stiprumo skaičiavimo metodika pagal patikimumo lygį	154
5.4	Magistralinių vamzdynų bandymai	159
	Literatūra	164

1. VAMZDYNŲ SANDARA

1.1 Pagrindinės sąvokos

Apžiūra – veiksmų kompleksas magistralinio vamzdyno išoriniams defektams, naftos ir naftos produktų nuotėkio vietoms, apsaugos zonos pažeidimams nustatyti, kvalifikuotiems darbuotojams apeinant pėsčiomis, apvažiuojant, apskrendant įvairiomis transporto priemonėmis magistralinio vamzdyno trasą ir jiems priskiriamus įrenginius bei terminalus.

Apvadas – tam tikros pagrindinio vamzdyno atkarpos (dalies) lygiagretus vamzdynas.

Atitikties deklaracija – gamintojo išduodamas dokumentas, patvirtinantis, kad prieš vamzdynui ar vamzdyno sudedamajai daliai patenkant į rinką atlikta atitikties įvertinimo procedūra ir vamzdynas ar jo sudedamoji dalis yra saugus naudoti.

Avarija – sąvoka atitinka Taisyklių 4 priedo 21 punkte nurodyto teisės akto nuostatas.

Avarių lokalizavimas – darbai, atliekami esant magistralinio ir (arba) jūrinio vamzdyno ar jų sudedamųjų dalių sutrikimams ir avarijoms, kad būtų apsaugoti žmonės bei aplinka, maksimaliai išsaugotas magistralinis, jūrinis vamzdynas ir (arba) jų sudedamosios dalys bei materialinės vertybės.

Avariniai darbai – darbai, atliekami lokalizuojant ir likviduojant magistralinio ir (arba) jūrinio vamzdyno ar jų sudedamųjų dalių sutrikimus bei avarijas.

Bandymo slėgis – slėgis, kuriuo išbandomas vamzdynas ir (arba) armatūra, įrenginiai.

Darbdavys – įmonė, įstaiga, organizacija ar kita organizacinė struktūra, nepaisant nuosavybės formos, teisinės formos, rūšies bei veiklos pobūdžio, turinčios darbinį teisnumą ir veiksnumą.

Darbinis slėgis – didžiausias slėgis, kuriam esant naudojamas vamzdynas. Didžiausias darbinis slėgis gali būti lygus didžiausiam leidžiamajam slėgiui *ps* arba už jį mažesnis.

Didžiausias leidžiamasis slėgis *ps*– didžiausias slėgis, kuriam, kaip nurodo gamintojas, vamzdynas ar jo sudedamoji dalis yra suprojektuotas.

Ekspertas – įgaliotos potencialiai pavojingų įrenginių techninės būklės tikrinimo įstaigos atstovas.

Eksplotavimas – veikla, susijusi su magistralinių vamzdynų, jūrinių vamzdynų ir jų sistemų bei jų įrenginių technologiniu valdymu, technine priežiūra, remontu, matavimais, bandymais, paleidimo ir derinimo darbais.

Gamintojas – juridinis ar fizinis asmuo, kuris projektuoja, gamina vamzdyną ir (arba) jo sudedamąsias dalis ir atlieka vertinimo procedūras.

Gamybinio technologinio ryšio sistema (toliau – **SCADA**) – duomenų surinkimo, apdorojimo ir valdymo sistema.

Įgaliota įrenginių techninės būklės tikrinimo įstaiga (toliau – **Įgaliotoji įstaiga**) – pagal Lietuvos Respublikos viešųjų įstaigų įstatymą (Žin., 1996, Nr. 68-1633; 2004, Nr. 25-752) veikianti viešoji įstaiga, kuriai valstybės institucija suteikė įgaliojimus tikrinti įrenginių techninę būklę.

Įrenginių techninės būklės tikrinimas – įrenginių eksploatavimo ir priežiūros norminiuose teisės aktuose, gamintojo pateiktuose įrenginių techniniuose dokumentuose nustatyta tvarka ir terminais įgaliotos įstaigos atliekama naudojamo įrenginio privalomoji apžiūra, privalomasis įrenginio parametrų, rodančių, kad jis atitinka saugos reikalavimus, patikrinimas, įrenginio bandymai ir kiti įrenginio saugos atitikties įvertinimo veiksmai.

Izoliacinė jungtis – jungtis, skirta magistralinio vamzdyno elektriniam vientisumui pertraukti (izoliacinės movos, izoliacinės jungės (flanšai) ar kitos izoliacinės medžiagos, tarpai).

Jūrinis vamzdynas (toliau – **JV**) – jūros dugnu paklotas vamzdynas, skirtas naftai ir naftos produktams į laivus ar iš jų transportuoti. Jūriniam vamzdynui priskiriami grandininio įtvirtinimo plūduras su atitinkamais vamzdynais, švartavimosi sistema su plūduru ir povandeninėmis bei plūdriosiomis žarnomis.

Kolektorius (toliau – **PLEM**) – sandarumą užtikrinantis mechanizmas, kuris leidžia kroviniui be kliūčių tekėti, priešvartuotam laivui judant aplink plūdūrą, pagal vėjo ir jūros srovių kryptį.

Kvalifikuota įmonė (tarnyba) – juridinis asmuo, turintis kvalifikuotus ir atestuotus darbuotojus, aprūpintus technine ir technologine įranga, norminiais, metodiniais, technologiniais dokumentais, saugiai, patikimai ir efektyviai eksploatuojantis magistralinius ir jūrinius vamzdynus ar jų sistemas, tinkamai atliekantis pavestas funkcijas ar prisiimtus įsipareigojimus.

Kvalifikuotas darbuotojas – asmuo, turintis profesinį pasirengimą magistralinių ir (ar) jūrinių vamzdynų kvalifikuotos tarnybos atitinkamiems įsipareigojimams vykdyti bei atestuotas darbuotojų saugos ir sveikatos, priešgaisrinės saugos, jūrinio vamzdyno eksploatavimo ir kitais klausimais.

Kuro talpykla – stacionarus požeminis arba antžeminis rezervuaras, konteineryje esantis rezervuaras naftos produktams laikyti, mobilusis rezervuaras naftos produktams laikyti ne jų priėmimo, išdavimo ar transportavimo metu, taip pat laivas, benzinvežis arba geležinkelio vagonas cisterna laivų, orlaivių ar lokomotyvų degalų atsargoms tiekti.

Magistralinis vamzdynas (toliau – **MV**) – aukšto slėgio vamzdynas ir (ar) jo sistema, su juo susiję statiniai bei įrenginiai naftai ir naftos produktams apskaityti, perduoti į terminalų vamzdynus, technologinius tinklus ar įrenginius. Vamzdynui priskiriami vamzdžiai ar jų sistema, apvadai, kompensacinės jungtys, aktyviosios ir pasyviosios antikorozinės priemonės, perėjos per dirbtines ir gamtines kliūtis arba, kai būtina, kitos slėginių įrenginių dalys bei gamybinio technologinio ryšio ir elektros tiekimo sistemos.

Magistralinio vamzdyno trasa (linijinė dalis) – nustatyto pločio žemės juosta, kurioje paklotas vamzdynas ir jo įrenginiai.

MV ar JV įmonės vadovas – juridinio asmens, kuriam MV ar JV, jų sistemos, įrenginiai priklauso nuosavybės ar patikėjimo teise, vadovas.

MV ar JV įmonė (savininkas) – juridinio asmens statusą turinti įmonė, kuriai MV ar JV priklauso nuosavybės ar patikėjimo teise.

Naftos ir naftos produktų terminalo vamzdynas – slėginis įrenginys, kuriame vamzdyno sudedamosios dalys, skirtos naftai ir naftos produktams perkrauti, transportuoti iki technologinių įrenginių, yra sujungiamos vienos su kitomis. Vamzdynui priskiriami vamzdžiai ar jų sistema, armatūra, kompensacinės jungtys, aktyviosios ir pasyviosios antikorozinės priemonės, apskaitos, pakrovimo–iškrovimo įrenginiai ir (ar), kai būtina, kitos slėginių įrenginių dalys bei gamybinio technologinio ryšio ir elektros tiekimo sistemos.

Naftos ir naftos produktų perpumpavimo stotis – specialiai įrengtų naftos ir naftos produktų priėmimo ir išdavimo vamzdynų, siurblių ir kitų įrenginių bei statinių kompleksas, naudojamas naftai ir naftos produktams perpumpuoti magistraliniais naftotiekiais.

Nuolatinė priežiūra – Taisyklėse, eksploataavimo instrukcijose ir gamintojo pateiktuose įrenginių techniniuose dokumentuose nurodyti privalomi nuolatiniai eksploatuojamų MV ar JV ir (ar) jo sistemų, įrenginių techninės būklės tikrinimai, apžiūros, remontas ir kiti veiksmai.

Plūdrioji žarna – slėginė žarna ar slėginių žarnų juosta, jungianti plūdūrą su prisišvartavusiu laivu.

Plūduras – grandininio įtvirtinimo plūduro sistema, leidžianti laivui judėti ir krauti naftą ir naftos produktus nepriklausomai nuo vėjo krypties, kol jis yra laikinai prisišvartavęs prie plūduro, inkaruoto į jūros dugną per laikomuosius inkarus.

Povandeninė žarna – slėginė žarna ar slėginių žarnų juosta, jungianti vamzdyno kolektorių su plūduru.

Pripažinti standartai – vamzdynų skaičiavimo, projektavimo, naudojimo nacionaliniai ir tarptautiniai (LST, EN, ISO, BS, DIN, ANSI ir kiti Lietuvos Respublikos teisės aktų nustatyta tvarka įteisinti) standartai.

Saugos įtaisai – įtaisai, apsaugantys vamzdynus nuo didžiausių ir (ar) mažiausių darbo parametrų viršijimo.

Specialusis techninis patikrinimas – vieno ar kelių charakteristikų, nusakančių vamzdyno būklę, tikrinimas visame vamzdyne ar jo sistemoje.

Sukamoji plokštė – plūduro viršuje esanti konstrukcija, prie kurios pritvirtinti švartavimo lynai. Pagrindinis guolis jungia sukamąją plokštę prie plūduro ir leidžia sukis priklausomai nuo vėjo ir jūros srovių krypties.

Sutrikimas – sąvoka apibrėžta Taisyklių 4 priedo 21 punkte nurodytame teisės akte.

Taisymas – MV ar JV ar jo (jų) sistemų ir jų įrenginių gedimų bei smulkių defektų šalinimas.

Techninė priežiūra – MV ar JV būklės įvertinimo, techninio patikrinimo, reguliavimo, taisymo veiksmai eksploatavimo metu, kurie atliekami tam, kad vamzdynas arba jo sudėtinės dalys būtų tvarkingos ir patikimai bei saugiai veiktų.

Techninis patikrinimas – norminiuose teisės aktuose, įrenginių techniniuose dokumentuose nustatyti, MV ar JV įmonės vadovo nustatyta tvarka ir terminais atliekami MV ar JV techninės būklės patikrinimai, apžiūros, bandymai, tyrimai ir kiti veiksmai, skirti tam, kad būtų palaikomi ir atkuriami vamzdyno techniniai parametrai ir veikimo režimai.

Transporto priemonės (mechanizmo) kuro talpykla – transporto priemonės (mechanizmo) talpykla (kuro bakas), iš kurios nuolat tiekiami degalai varikliui.

Planinis techninis patikrinimas – periodinis vamzdynų sudedamųjų dalių techninės būklės tikrinimas.

Magistraliniai naftotiekiai, produktotiekiai – aukšto slėgio vamzdynai, su jais susiję statiniai ir įrenginiai naftai perduoti į naftos terminalus bei saugyklas arba į naftos perdirbimo įrenginius ir naftos produktams perduoti į naftos produktų eksporto, importo terminalus bei saugyklas.

Vamzdynų armatūra – vamzdynuose montuojami įtaisai, leidžiantys valdyti darbo terpių srautus keičiant skerspjūvį (atjungti, paskirstyti, reguliuoti, sumaišyti ir kt.).

Vamzdynų eksploatavimas – veikla, susijusi su MV ar JV įrenginių valdymu, paleidimu ar stabdymu, modifikavimu ir priežiūra, įskaitant ir valymą.

Vamzdynų techniniai dokumentai (toliau – **techniniai dokumentai**) – MV ar JV įrenginio atitikties deklaracija, MV ar JV įrenginio sertifikatas, MV ar JV įrenginio pasas, brėžiniai, MV ar JV įrenginio priežiūros dokumentai (įrenginio montavimo ir bandymo prieš pradėdant jį naudoti, remonto, demontavimo taisyklės, tanklaidų švartavimosi ir krovos darbų instrukcijos) ir kiti kartu su įrenginiu gamintojo pateikiami dokumentai, kuriuose nurodoma įrenginio paskirtis, konstrukcija, parametrai, privalomieji saugos reikalavimai bei eksploatavimo tvarka.

Vardinis dydis DN – skaitmenimis nurodytas dydis, kuris yra bendras visoms vamzdžio sistemos dalims, išskyrus tas dalis, kurių nurodyti išoriniai skersmenys arba sriegio dydis. Tai patogus nuorodoms sveikasis skaičius ir jis tik iš dalies yra susijęs su gamybiniais matmenimis. Paprastai vardinis dydis DN ir po jo pateikiamas skaičius nurodo vidinį vamzdžio skersmenį (mm).

Taisyklėse vartojami sutrumpinimai:

KAS – katodinės apsaugos stotis.

NAP – naftos ir naftos produktų apskaitos punktas.

NPS – naftos ir naftos produktų perpumpavimo stotis.

Alkūnė – fasoninė dalis, kurioje darbo terpės srautas keičia tekėjimo kryptį nuo 15° iki 180° .

Atitikties sertifikatas – dokumentas, kuris išduodamas vadovaujantis produkcijos sertifikavimo taisyklėmis ir kuriuo patvirtinama, kad produkcija atitinka Taisyklės ir konkretų standartą ar kuri nors kitą norminį dokumentą.

Bandomasis slėgis – perteklinis slėgis, kuriam esant turi būti atliekamas vamzdžio ar jo fasoninės dalies hidraulinis bandymas stiprumui ir sandarumui.

Darbo slėgis – Terpės slėgis į armatūrą ir kitas vamzdžio detales prie kurio vyksta jų ilgalaikė eksploatacija.

Inžineriniai tinklai. Inžineriniai tinklai pagal paskirtį skirstomi į šiuos pogrupius:

naftos tinklai – magistraliniai ir skirstomieji naftotiekiai, produktotiekiai, naftos perdirbimo įrenginiai, naftos ir naftos produktų terminalai bei saugyklos;

dujų tinklai (dujotiekis). Dujotiekį sudaro:

magistralinis dujotiekis – aukšto slėgio vamzdynas, su juo susiję statiniai bei įrenginiai dujoms iš verslovių perduoti į dujų talpyklas, miestų ir gyvenviečių skirstomuosius tinklus arba į dujas naudojančius įrenginius iki dujų skirstymo stočių imtinai;

skirstomasis tinklas – vamzdynai dujoms iš magistralinio dujotiekio dujų skirstymo stočių pristatyti iki vartotojo sistemų, taip pat inžinerijos statiniai, įrenginiai bei priemonės šiems vamzdynams funkcionuoti;

tiesioginis vamzdynas – jungtinę sistemą papildantis dujų vamzdynas (dujotiekis), jungiantis vartotojo sistemą su magistraliniu dujotiekiu ar skirstomaisiais tinklais, kad laisvasis vartotojas galėtų naudotis sistema;

vandentiekio tinklai (iš jų karšto vandens tinklai):

magistraliniai tinklai (vandentakiai) – skirti tiekti vandenį iš vandenviečių arba iš vieno rajono į kitą, arba į grupę įmonių bei atskirą įmonę. Magistralinis tinklas (vandentakis) – vamzdynas, kuris ne mažesniame negu 500 m ilgyje neturi atšakų arba atšakos yra ne mažesnės kaip 250 mm skersmens. Vandentakiai turi būti su vandens išleistuvais, orlaidžiais ir sklendėmis, suteikiančiomis galimybę atjungti arba perjungti nedidesnius kaip 500 m ilgio tinklo tarpus. Sklendės gali būti šuliniuose, kameroose ir požemyje. Vandens išleidimą rekomenduojama įrengti į atskirus šulinius;

skirstomieji tinklai – vamzdynai vandeniui iš magistralinio vandentiekio pristatyti iki įvadinių tinklų, taip pat inžinerijos statiniai, įrenginiai bei priemonės šiems vamzdynams funkcionuoti;

įvadiniai tinklai – tinklai, jungiantys skirstomuosius tinklus su vartotojų sistemomis;

šilumos tiekimo tinklai – statinių ir įrenginių kompleksas, susidedantis iš vamzdynų, uždaromosios ir reguliuojamosios armatūros, siurblių, kontrolės ir matavimo prietaisų bei kitų elementų, kuriais šilumnešis (termofikacinis vanduo, garas ir pan.) iš šilumos šaltinio tiekiamas ir skirstomas vartotojams. Šilumos tiekimo tinklai skirstomi į

magistralinius, einančius nuo šilumos šaltinio iki kiekvieno mikrorajono arba kvartalo, taip pat iki vartotojų centrinių šilumos punktų;

skirstomuosius – nuo magistralinių tinklų iki pastatų įvadinių tinklų;

pastatų įvadininius tinklus – nuo skirstomųjų (arba magistralinių) tinklų iki vartotojų individualių šilumos punktų;

nuotekų šalinimo tinklai. Nuotekų šalinimo tinklus sudaro:

nuotekų surinkimo tinklai:

nuotekų kolektoriai – 300 mm ir didesnio skersmens tinklai, į kuriuos suteka nuotekos iš rinktuvų;

nuotekų rinktuvai – tai gatvių ir kvartalų tinklai. Į juos jungiami išvadai iš pastatų. Jų skersmuo yra nuo 150 iki 250 mm;

nuotekų išvadai – tai tinklai, skirti nuotekų pašalinimui iš pastatų ir įmonių;

nuotekų slėginiai tinklai – slėginės linijos nuo nuotekų siurblių, diukeriai per vandens telkinius ar daubas, derivacinės linijos ir kiti tinklai, kuriais nuotekos teka, užpildydamos visą tinklo skerspjuvį;

elektros tinklai pagal paskirtį skirstomi į [4.7, 4.8, 4.14]:

perdavimo elektros tinklai – statiniai ir įrenginiai, skirti elektros energijos persiuntimui aukštosios įtampos (110, 330 kV) elektros tinklais iš gamintojų vartotojams arba tiekėjams;

skirstomieji elektros tinklai – statiniai ir įrenginiai, skirti elektros galiai ir energijai persiųsti žemosios ir vidutinės įtampos tinklais galutiniam vartotojui;

tiesioginė linija – elektros energijos perdavimo linija, jungianti gamintoją su vartotoju, tačiau nepriklausanti perdavimo ir skirstomiesiems tinklams;

nuotolinio ryšio (telekomunikacijų) linijos – aukšto ir žemo dažnio ryšių ir šviesolaidžio (telekomunikacijų) kabelių linijos, radijo ir televizijos tinklų perdavimo linijos, perdavimo bokštai, radijo ryšio statiniai, ryšio retransliatoriai, atramos ir kita.

1.2 Vamzdynų klasifikavimas

Vamzdynų transportas

Vamzdynų transportas – unikali transporto rūšis, kurios didžiausias privalumas – maža krovinių gabenimo savikaina. Ji 6 kartus mažesnė nei geležinkelyje.

Vamzdynų transporto pradžia – XIX a. Pirmasis 6 km ilgio naftotiekis buvo nutiestas 1865 m. Jungtinėse Amerikos Valstijose. Sparčiau šis transportas pradėjo plėtotis tik nuo XX a. vidurio, kai išsiplėtė naftos ir gamtinių dujų gavyba. Šiuo metu vamzdynais transportuojama ne tik nafta, gamtinės dujos, bet ir amoniakas, sintetinis spiritas, kitos medžiagos bei žaliavos. Vamzdynai yra patikima, ekologiškai švari transporto rūšis. Bendras vamzdynų ilgis – 1,3 mln. km. Iš jų apie 60 % sudaro dujotiekiai ir apie 40 % – naftotiekiai. Ilgiausią naftotiekių ir dujotiekių tinklą turi JAV, Rusija ir Kanada. Šiaurės Amerikoje vamzdynai jungia naftos ir gamtinių dujų versloves su perdirbimo rajonais žemyno rytuose. Vakarų Europoje vamzdynais kroviniai iš uostų keliauja į žemyno gilumoje esančius pramonės centrus.

Rusijoje vamzdynai iš Vakarų Sibiro driekiasi per visą europinę šalies dalį į Vidurio ir Vakarų Europą. Rusijai priklauso ilgiausias (5,5 tūkst. km) pasaulyje „Draugystės“ (*«Družba»*) naftotiekis.

1.1 pav. Vamzdynų transportas: naftotiekis Aliaskoje (JAV),
<http://galleryget.com/gallery/pipeline>

Vamzdynu vadinama įvairiais būdais tarpusavyje sujungtų skirtingo skersmens arba atsišakojimus turinčių vamzdžių sistema.

Pagal vamzdynų tiesinę dalį vamzdynai skirstomi:

- Magistraliniai:
 1. Vienasiūliai (pastovaus skersmens)
 2. Teleskopiniai (skirtingų skersmenų)
 3. Daugiasišūliai
- Žiediniai, tiesiami aplink didelius miestus.

Naftotiekiu priimta vadinti vamzdyną, skirtą transportuoti ne tik naftą, bet ir naftos produktus (benzinas, mazutas, žibalas).

Pagal paskirtį naftotiekiai skirstomi:

- Vidaus (jungia įvairius objektus naftos bazėse, naftos perdirbimo įmonėse);
- Vietinius (jungia atskirus naftos perdirbimo gamyklas, bazes, geležinkelį, uostus);
- Magistralinius (didelio ilgio vamzdynai, transportavimas atliekamas panaudojant siurbles).

Pagal naudojamų vamzdinių skersmenį (SNIP II.45–75) yra keturių klasių naftotiekiai:

- I klasė – daugiau kaip 1000 mm;
- II klasė – 1000–500 mm;
- III klasė – 500–300 mm;
- IV klasė – mažiau kaip 300 mm.

Magistraliniu dujotiekiu vadinamas vamzdynas, skirtas transportuoti dujas iš gamybos punktų iki dujų naudojamų punktų.

Pagal naudojamą slėgį magistraliniuose dujotiekiuose jie skirstomi į dvi klases (SNIP II.45–75):

- I klasė – didelio slėgio dujotiekiai (darbinis slėgis daugiau kaip 2.5 MPa);
- II klasė – vidutinio slėgio dujotiekiai (darbinis slėgis 1.2–2.5 MPa).

Dokumento, reglamentuojančio garo ir karšto vandens vamzdinių įrengimų ir jų saugų eksploatavimą, parengimo klausimas iškilo po to, kai Lietuvos Respublikos teritorijoje galiojantys teisės aktai, priimti iki 1990 m. kovo 11 d., buvo pripažinti netekusiais galios 1997 m. lapkričio 13 d. priimtu Įstatymu Nr. VIII-510 ir po jo įėjusiais Lietuvos Respublikos Vyriausybės nutarimais.

Vadovaujantis minėtais dokumentais buvo panaikintos sovietiniais laikais galiojusios analogiškos normos ir pradėti kurti respublikiniai teisės aktai, derinant su Europos Sąjungos parengtais direktyviniais dokumentais.

Bendriausias dokumentas, kuriuo vadovaujantis buvo parengti Lietuvos Respublikoje galiojantys norminiai teisės aktai, reglamentuojantys slėginę įrangą, yra 1997 m. gegužės 19 d. Europos Parlamento ir Tarybos direktyva 97/23/EB **dėl valstybių narių įstatymų dėl slėginės įrangos suderinimo**, pataisyta 2003 m. rugsėjo 29 d.

Vykdamas Teisės priemonių derinimo planą 2000 metams 2000 m. spalio 6 d. LR ūkio ministro įsakymu Nr. 349 buvo patvirtintas Slėginių įrenginių techninis reglamentas, kuris garo ir karšto vandens

vamzdynų įrengimą ir jų saugų eksploatavimą reglamentuoja tik labai bendrai.

Vamzdžiai pagal jų nominalų skersmenį (mm) skirstomi:

3; 6; (8); 10; (13); 15; 20; 25; 32; 40; 50; 65; 80; 100; 125; 150; (175); 200; 250; (275); 300; (325); 350; (375); 400; (450); 500; 600; (700); 800; (900); 1000; (1100); 1200; 1400; 1500; 1600.

– Skliausteliuose pateiktus vamzdžius naudoti nepatartina.

Vamzdynai ir jų elementai pagal slėgį (MPa) skirstomi:

0.1; 0.25; 0.4; 0.63; 1.0; 1.6; 2.5; 4.0; 6.3; 10; 16; 20; 25; 32; 40; 50; 60; 80; 100.

Magistraliniams naftotiekiams naudojamų vamzdžių charakteristikos pateiktos 1.1 ir 1.2 lentelėse.

1.1 lentelė. Vamzdžių pagrindiniai parametrai

Skersmuo ir sienelės storis, mm	1 m vamzdžio masė, kg		Skerspjuvio plotas F, cm ²	Inercijos momentas I, cm ⁴	Pasipriešinimo momentas, cm ³
	Tuščio	Su vandeniu			
219x10	51,5	82,6	65,6	3590	327
219x11	56,4	90,8	71,8	3890	355
325x8	62,5	137,4	79,6	10010	615
325x9	70,1	144,3	89,3	11150	686
325x10	77,7	150,9	98,9	12270	755
325x11	85,2	157,3	108,5	13370	822
325x12	92,6	163,8	117,9	14450	889
426x8	82,5	214,5	105,3	22942	1077
426x9	92,6	223,6	117,8	25593	1201
426x10	102,6	231,6	130,6	28243	1325
426x12	122,5	249,0	156,0	33418	1569
529x8	102,8	309,5	131,0	46878	1680
529x9	115,4	319,9	146,9	49613	1875
529x10	128,0	331,3	163,0	54659	2066
529x11	140,5	342,3	178,9	59927	2265
529x12	153,0	363,0	194,8	64915	2454
720x8	140,5	529,7	179,0	113407	3150
720x9	157,8	543,8	200,9	126812	3523
720x10	175,1	559,9	222,9	140140	3893
720x11	192,3	575,3	244,9	153422	4262

1.1 lentelės pabaiga

Skersmuo ir sienelės storis, mm	1 m vamzdžio masė, kg		Skerspjuvio plotas F, cm ²	Inercijos momentas I, cm ⁴	Paspriešinimo momentas, cm ³
	Tuščio	Su vandeniu			
720x12	209,6	591,1	266,8	166649	4629
820x9	180,0	684,0	229,2	188503	4598
820x10	199,8	701,8	254,3	208446	5084
820x11	219,5	719,5	279,4	228340	5569
820x12	239,1	736,1	304,5	248136	6053
820x14	278,3	770,3	354,8	287630	7015
820x16	317,2	804,9	404,0	326700	7968
1020x11	273,7	1055,7	348,5	441490	8657
1020x12	298,3	1077,5	379,8	481180	9435
1020x14	347,3	1119,3	442,2	557620	10933
1020x16	296,2	1162,9	504,0	636084	12472
1020x20	493,2	1247,5	625,4	784294	15406
1220x12	356,9	1479,5	455,2	830550	13615
1220x14	614,4	1531,4	530,2	964220	15809
1220x16	475,1	1584,1	612,0	1096868	17982
1220x20	591,9	1685,5	754,1	1357501	22254
1420x14	485,4	2005,4	618,1	1523410	21457
1420x17	588,2	2096,9	748,0	1843977	25972
1420x20	690,5	2186,2	879,7	2155557	30360

1.2 lentelė. Vamzdžių atsparuminės charakteristikos

Vamzdžių išorinis skersmuo, mm	Nominalus sienelės storis, mm	Plieno markė	Suvirinimo siūlė	Laikinasis pasipriešinimas suirimui, MPa, ne mažiau	Takumo riba, MPa, ne mažiau	Gamyklos garantuotas bandomasis slėgis, MPa
1420	20,5	–	Tiesi	560	420	10
1420	19,5	–	Tiesi	660	420	10
1420	17,5	–	Tiesi	560	420	9
1420	16,5	–	Tiesi	600	420	9
1220	15,2	17Г1С	Spiralinė	520	360	7
1220	12,5	–	Tiesi	600	420	8
1220	12	–	Tiesi	520	360	6,5
1220	12	17Г2СФ	Tiesi	550	380	6,5
1220	10,5	–	Tiesi	600	420	7
1020	14	17Г1С	Tiesi	520	360	9,1
1020	12	17Г1С	Tiesi	520	360	7,7
1020	11	14ХГС	Tiesi	500	350	6,8
1020	10	17Г1С	Tiesi	520	360	6,5

1.2 lentelės pabaiga

Vamzdžių išorinis skersmuo, mm	Nominalus sienelės storis, mm	Plieno markė	Suvirinimo siūlė	Laikinasis pasipriešinimas suirimui, MPa, ne mažiau	Takumo riba, MPa, ne mažiau	Gamyklos garantuotas bandomasis slėgis, MPa
1020	10	17Г2CΦ	Spiralinė	550	380	6,5
1020	9	–	Tiesi	600	420	7
820	11	17Г1C	Tiesi	520	360	8,3
820	8,5	17Г1C	Tiesi	520	360	6,5
720	9	17Г1C	Tiesi	520	360	8
720	10,5	14ХГC	Tiesi	500	350	9,2
720	7,5	17Г1C	Tiesi	520	360	6,5
530	8	17Г2CΦ	Tiesi	500	360	8,5
530	8	17ГCC	Tiesi	520	360	9,1
530	7,5	17ГC	Tiesi	520	360	8,9
426	10	20	Besiūlis	420	250	7
377	9	20	Besiūlis	420	250	7,1
325	8	20	Besiūlis	420	250	7,4
325	7	10	Tiesi	340	220	6,9

1.3 Magistralinio naftotiekio 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 (PS) ir vamzdynai, kuriais naftos produktai patenka į PS talpyklas (1.2 pav.).

1.2 pav. Magistralinio naftotiekio schema:

- 1 – gręžiniai; 2 – naftos surinkimo įrenginiai; 3 – tiekimo vamzdynai;
- 4 – pagrindiniai pastatai; 5 – vamzdyno grandiklio paleidimo šulinys;
- 6 – linijinis šulinys; 7 – perėjimas po geležinkelį; 8 – perėjimas po upę;
- 9 – perėjimas per griovį; 10 – galutinis skirstymo punktas

PS teritorijoje yra talpyklų parkas, pagrindinė ir pagalbinė siurblynės, vamzdynai, skaitliukų įranga, grandiklio 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 (TS) priima ir perduoda transportuojamą produktą toliau vamzdynu iki kitos stoties, galutiniams ar tarpiniams paskirstymo punkтам.

Svarbus TS darbo momentas yra transportuojamo produkto judėjimo organizavimas. PS įrengtos iki 1–2 mln. m³, o TS įrengiamos 2–4 1000–5000 m³ talpyklos.

1.3 pav. Naftos transportavimas tarpinėje siurblinėje (TS): R – talpa; PR – priėmimo talpa; PIR – priėmimo ir išdavimo talpos; B, K – talpos;
a – nafta patenka į PR ir iš R transportuojama į kitą TS;
b – nafta patenka į PR ir toliau transportuojama į kitą TS (R – uždaryta);
c – K papildoma talpa, išlyginanti netolygų padavimą;
d – nafta transportuojama iš siurblio į siurbliū, B – uždarytos

Magistralinio naftotiekio išdėstymo schema Lietuvos teritorijoje parodyta 1.4 pav.

1.4 pav. Lietuvos magistralinis naftotiekis

1.4 Magistralinis dujotiekis

Magistralinį dujotiekį sudaro: pagrindinė stotis (PS), linijinė ir kompresorinė stotys (KS), vamzdyno gale dujų skirstymo stotys (DSS), požeminės dujų saugyklos, ryšio objektai, vamzdynų apsaugos nuo korozijos apsauginės elektrinės sistemos, pagalbiniai statiniai (kanalizacija, elektros perdavimo linijos, vandentiekis ir t. t.), remonto ir eksploataavimo tarnybos objektai, administraciniai ir buitiniai statiniai (1.5 pav.).

1.5 pav. Magistralinio dujotiekio schema

- 1 – gręžiniai; 2 – dujų surinkimo įrenginiai; 3 – pagrindinė KS;
 4 – DSS ir atšaka; 5, 6 – perėjimai po keliais; 7 – tarpinės KS;
 8, 9 – perėjimai per upę ir griovį; 10 – požeminę dujų saugyklą;
 11 – katodinės apsaugos stotis; 12 – galutinė DSS

Pagrindinė stotimi (PS) vadinamas statinys, skirtas paruošti dujas tolimam transportavimui. Į PS kompleksą įeina: mechaninių priėmimų, drėgmės iš dujų valymo ir sieros atskyrimo įrenginiai. Prie PS priklauso ir KS pradiniam dujotiekio taške.

Linijinę dujotiekio dalį sudaro vientisas vamzdynas, tarp KS surinktas iš atskirų vamzdžių.

Kompresorinė stotis (KS) – statinių kompleksas, sudarytas iš tam tikro skaičiaus ir tipo funkcionalių blokų, skirtų atlikti pagrindines ir pagalbinės funkcijas. Pagrindinė KS paskirtis – dujų spaudimas. Dujas spaudžia stūmokliniai išcentriniai siurbliai. Šiame komplekse dar yra: energetiniai įrenginiai (dujų turbinos, elektros varikliai, dyzeliai, variklių aušinimo ir tepimo sistemos, dujų paruošimo įrenginiai tolimam transportavimui (valymo, džiovinimo, odoravimas (odoruoti – suteikti savitą kvapą dujoms ir partalpų orui odorantais), remonto blokas, atsarginių dalių ir medžiagų sandėlis (1.6 pav.). Dujų

skirstymo stotis (DSS) skirta mažinti dujų slėgį iki slėgio, reikalingo dujų vartotojams (nuo 0.3 iki 1.2 MPa). Be to, DSS atliekama papildomas dujų valymas, džiovinimas, papildomas odoravimas. Dujotiekyje dujų slėgis kinta plačiame intervale nuo 1.0 iki 7.5 MPa, o išėjime – nuo 0.3 iki 1.2 MPa.

1.6 pav. Kompresorinės stoties cechų schemas:

- a** – tradicinė schema; **b** – siurblių ne patalpoje schema;
- c** – schema be rūšių; **d** – kompaktiškai išdėstytų įrenginių schema;
- e** – įrenginių išdėstymo schema vamzdyje

Pagal našumą DSS skirstomos į dvi grupes:

- Skirta mažo ir vidutinio našumo dujų vartotojams, kai našumas iki 250 tūkst. m³/h;
- Skirta didelio našumo dujų vartotojams, kai našumas daugiau kaip 250 tūkst. m³/h;

DSS susideda:

- dulkių ir skysčių valymo iš dujų įrenginiai (filtrai, tepaliniai dulkių gaudytuvai, dujiniai separatoriai);
- redukavimo įrenginiai, kai slėgis mažinamas ir automatiškai palaikomas tam tikro lygio dujų reguliatoriais;
- dujų kiekio matavimo įrenginiai (debitmatės);
- magistralių perjungimo įrenginiai (dujų srautas nukreipiamas į pagrindinį vamzdyną apeinant DSS avarijos metu ar remonto metu);
- apsauginiai vožtuvai (esant avarijai, dujos išmetomos į aplinką);
- dujų šildymo įrenginiai, kad nesusidarytų hidratinių kamščių, naudojami vandens kaitinimo katilai);
- odoravimo įrenginiai;
- elektroįranga ir vamzdynų elektrocheminės apsaugos reguliavimo įranga.

Požeminės dujų saugyklos atlieka sezoninį netolygų dujų naudojimo reguliavimą. Lietuvos teritorijoje esamo dujotiekio schema parodyta 1.7 pav.

1.7 pav. Lietuvos dujotiekio schema

1.5 Technologinio vamzdyno sudėtis

Technologinių vamzdynų sistema (TVS) – tai įrenginys, skirtas transportuoti skystus, dujinius bei jų mišinius ir turinčius kietas daleles produktus iš pradinio punkto – šaltinio – iki galutinio punkto – vartotojo. Esant cirkuliacinėms schemoms tas pats įrenginys tuo pačiu metu gali būti ir šaltinis ir vartotojas (1.8 pav.).

1.8 pav. Technologinių vamzdynų sistemos schema:

- 1 – šaltinis (aparatas ar grupė aparatų); 2 – išsiurbimo vamzdynas;
- 3 – sklendė; 4 – kompensatorius; 5 – šiluminė izoliacija; 6 – atrama;
- flanšinis sujungimas; 7 – sklendė; 8 – filtras; 9 – slėgio pulsacijų slopintuvas;
- 10 – pumpuojanti mašina (siurblys ar kompresorius);
- 11 – vamzdynas; 12 – atbulinis vožtuvas; 13 – perėjimas; 14 – reguliavimo vožtuvas;
- 15 – kaitinimo įrenginys; 16 – šilumos mainų įrenginys;
- 17 – vartotojas (aparatas ar grupė aparatų); 18 – apsauginis vožtuvas

Technologinių vamzdynų sistemų klasifikavimas pateiktas 1.3 lentelėje. Vamzdynų grupės ir kategorijos pateiktos 1.4 ir 1.5 lentelėse.

1.3 lentelė. Technologinių vamzdynų sistemų klasifikavimas

Klasifikacijos požymis	Vamzdynų sistemos					
	Produktų transportavimo vamzdynas	Kuro sistemos	Tarpechinis	Inertinių dujų sistemos	Fakelių sistemos	Šilumos, vandens ir aušinimo sistemos
Vamzdynų sistemų paskirtis	Cecho viduje					Už gamyklos ribų
Išdėstymas objekte	Neišskirstyta	Išskirstyta	Žiedinė			Kombinuota
Transportuojamos terpės būvis	Dujos	Skystis	Dujos-skystis	Dujos-kietos dalelės	Skystis-kietos dalelės	Dujos-skystis-kietos dalelės
Transportuojamos terpės savybės ir parametrai	Grupės: A,B,C					
Terpės korozinės savybės	Neagresyvios ir mažai agresyvios terpės		Vidutinio agresyvumo terpės		Agresyvios terpės	
Darbinis slėgis	Vakuminės, $p<0.1$ MPa	Beslėginės, $p=0.1$ MPa	Žemo slėgio, $0.1\text{Mpa}<p<1.6$ MPa	Vidutinio slėgio, $1.6<\text{MPa}<p<10$ MPa	Didelio slėgio, $p>10$ MPa	
Darbinė temperatūra	Žemų temperatūrų (mažiau kaip 40°C)		Normalių temperatūrų (-40°C iki 450°C)		Aukštų temperatūrų (daugiau kaip 450°C)	
Izoliacijos tipas	Be izoliacijos	be pašildymo	pašildymo marškiniais	elektrinis pašildymas	Antikorozinis padengimas	
Reguliuojamo įrenginio būvimas	Be reguliuojamo įrenginio			Su reguliuojamu įrenginiu		
Srauto judėjimo šaltinis	Siurblys	Kompresorius	Ežektorius	Aparatas su padidintu slėgiu	Naftos ir dujų gręžiniai	
Srauto judėjimo pobūdis	Laminarinis	Kritinis		Turbulentinis		
Skystio reologija	Niutoninis skystis		„mišrus“		„kvadratinis“	
Šiluminio proceso pobūdis	Izoterminis	Adiabatinis		Neizoterminis		
	Statinės apkrovos		Izoentalpinis	Politropinis		
Apkrovos tipas	Statinės apkrovos			Statinės ir dinaminės apkrovos		
Tiesimo būdas	Antžeminis ant atramų ir estakadų		Požeminis		Patalpose	
	kanaluose		grunte			

1.4 lentelė. Vamzdinių grupės ir kategorijos

Grupė	Transportavimo produktai	Vamzdinių kategorija										
		I		II		III		IV		V		
		p, MPa	T, °C	p, MPa	T, °C	p, MPa	T, °C	p, MPa	T, °C	p, MPa	T, °C	
A	Kenksmingi:											
	a) pavojingumo klasė 1 ir 2	Nepriklausoma		–		–		–		–		–
	b) pavojingumo klasė 3	Daugiau kaip 1.6	Daugiau kaip 300	Iki 1.6	Iki 300	–	–	–	–	–	–	–
B	Sprogstami ir degūs:											
	a) sprogstami; degios dujos, tarp jų ir skystos dujos	Daugiau kaip 2.5	Daugiau kaip 300	Iki 2.5	Iki 300	–	–	–	–	–	–	–
	b) lengvai užsidegantys skysčiai	Daugiau kaip 2.5	Daugiau kaip 350	Daugiau kaip 2.5, iki 6.3	Daugiau kaip 250, iki 350	Daugiau kaip 1.6, iki 2.5	Daugiau kaip 120, iki 250	Iki 1.6	Iki 120	–	–	–
C	c) degūs skysčiai ir medžiagos	Daugiau kaip 6.3	Daugiau kaip 350	Daugiau kaip 2.5, iki 6.3	Daugiau kaip 250, iki 350	Daugiau kaip 1.6, iki 2.5	Daugiau kaip 120, iki 250	Iki 1.6	Iki 120	–	–	–
	Sunkiai degūs	–	–	Daugiau kaip 6.3	Daugiau kaip 350, iki 450	Daugiau kaip 2.5, iki 6.3	Daugiau kaip 250, iki 350	Daugiau kaip 1.6, iki 2.5	Daugiau kaip 120, iki 250	Iki 1.6	Iki 120	Iki 1.6

1.5 lentelė. Vamzdynų grupės ir kategorijos

Transportavimo produktai	Vamzdynų kategorija							
	I		II		III		IV	
	P, MPa	T, °C	P, MPa	T, °C	P, MPa	T, °C	P, MPa	T, °C
Perkaitinti vandens garai, kai slėgis ir temperatūra:								
a	Nepriklausoma	Daugiau kaip 580	Iki 3.9	Nuo 350 iki 450	Iki 2.2	Nuo 250 iki 350	Nuo 0.07 iki 1.6	Nuo 115 iki 250
b	Nepriklausoma	Nuo 540 iki 580	Nuo 2.2 iki 3.9	Iki 350	Nuo 1.6 iki 2.2	Iki 250	–	–
c	Nepriklausoma	Nuo 450 iki 540	–	–	–	–	–	–
d	Daugiau kaip 3.9	Iki	–	–	–	–	–	–
Persotinti vandens garai:								
a	–	–	–	–	–	–	Nuo 0.07 iki 1.6	Nuo 115 iki 250
b	–	–	Nuo 3.9 iki 8.0	Daugiau kaip 115	Nuo 1.6 iki 3.9	Daugiau kaip 115	–	–
c	Daugiau kaip 8.0	Daugiau kaip 115	–	–	–	–	–	–
Karštas vanduo:								
b	–	–	–	–	–	–	Iki 1.6	Daugiau kaip 115
c	–	–	Nuo 3.9 iki 8.0	Daugiau kaip 115	Nuo 1.6 iki 3.9	Daugiau kaip 115	–	–
d	Daugiau kaip 8.0	Daugiau kaip 115	–	–	–	–	–	–

1.6 Avarinių pažeidimų magistraliniuose naftotiekiuose atsiradimo priežastys

Magistralinių vamzdynų pažeidimų atsiradimo priežastys yra labia įvairios. Avariniai vamzdynų pažeidimai atsiranda dėl *fizinio* bei *cheminio* poveikio. *Fizinį* poveikį sukelia vamzdyną veikiančios išorinės ir vidinės jėgos, sukeliančios didelius mechaninius įtempimus arba nuovargio reiškinius vamzdžio medžiagoje. Išorinius mechaninius poveikius sukelia, pavyzdžiui, gruntiniai vandenys, paplaunantys vamzdyno atramas, grunto griūtys, nusėdimas bei nuošliaužos, seisminiai dirvos virpesiai. Vidinės jėgos vamzdyne atsiranda dėl per didelios lėgio, kurį sukelia: greitas vamzdyno praeinamojo skerspjuvio droseliavimas, agregatų paleidimas ar sustabdymas (hidraulinis smūgis), pumpuojamo produkto slėgio pulsacijos rezonansiniai reiškiniai ir kt., taip pat sklandžiai didinant slėgį virš leistinos ribos, pavyzdžiui, palaipsniui mažinant skysčio debitą vamzdyne. Vamzdyno medžiagos ir vamzdžių sujungimo vietų stiprumo riba nevienoda, išskyrus suvirintus sujungimus, kurie stiprumu nenusileidžia vamzdyno medžiagai. Statistika rodo, kad 20 % vamzdynų pažeidimų sukelia nepastebimi defektai (mikroįtrūkimai, įspaudimai ir kt.), esantys vamzdžiuose dar prieš juo tiesiant į gruntą. Defektai atsiranda gaminant vamzdžius gamykloje arba juos montuojant ir buvo nepastebėti bandymų metu. Tokie defektai, veikiant vidinėms ir išorinėms jėgoms, palaipsniui didėja ir gali sukelti vamzdynų pažeidimus ar net didelius įtrūkimus, dėl kurių atsiranda transportuojamo produkto nuotėkiai. *Cheminės priežastys* – tai vamzdyno medžiagos cheminė ar elektrocheminė korozija. Dėl vamzdžio sienelės veikiančios korozijos paprastai atsiranda maži nuotėkiai. Veikiant korozijai vamzdyno sienelės palaipsniui plonėja ir dėl to vamzdžio metale išauga mechaniniai įtempimai.

Tuo metu, kai mechaniniai įtempimai vamzdžių sienelėse viršija stiprumo ribą, įvyksta vamzdžio trūkimas. Fizikinis poveikis dažniausiai yra trumpalaikis – nuo sekundės dalies iki kelių valandų arba parų, o cheminių – tęsiasi mėnesius ir net metus. Eksploatacijos metu pasitaiko nedidelių vamzdžio hermetiškumo pažeidimų, kurie sukelia

transportuojamo produkto nutekėjimus, bei didelių avarinių pažeidimų. Prieš atsirandant įtrūkimui, vamzdyje susiformuoja mechaninių įtempimų koncentracija netoli mikroįtrūkimo.

Mechaninių įtempimų pasiskirstymas įtrūkimo vietoje – kuo tankesnės linijos, charakterizuojančios mechaninių įtempimų lauką, tuo įtempimai yra didesni. Mechaniniai įtempimai prie įtrūkimo viršūnės didėja ir tokiomis sąlygomis gali viršyti medžiagos stiprumo ribą. Mikroįtrūkimas greitai didėja, ilgėja ir vamzdis įtrūksta. Įtrūkimo plitimo greitis plieniniame vamzdyje vyksta ≈ 1220 m/s greičiu, o trūkimo proceso trukmė matuojama tūkstantosiomis sekundės dalimis, t. y. įtrūkimas atsiranda akimirksniu. Avarijos procesai skirstomi į 2 fazes: staigus naftos išpurškimas pro prasivėrusį plyšį; plyšio didėjimas ir lėtėjantis gausus naftos tekėjimas iki visiško slėgio kritimo, uždarius sklendes [1]. Įvairūs faktoriai sukelia vamzdžiuose apskritiminius, išilginius įtempimus, taip pat įtempimus, kuriuos sukelia įlinkiai, dėl ko atsiranda išilginiai ir skersiniai poslinkiai.

Vidinis darbinis transportuojamos naftos slėgis sukelia vamzdyne apskritiminius, radialinius ir išilginius įtempimus. Išilginiai įtempimai, dažniausiai pastebimi trasos posūkiuose, taip pat tose vietose, kur įrengtos sklendės. Išilginiai įtempimai visuomet bus mažesni už skersinius, todėl vamzdžiai visada plyšta išilgai vamzdžio ašies. Grunto sluoksnis, esantis virš vamzdžio, sukelia normalinį slėgį, kuris veikia vamzdžio sienelės ir priešinasi išilginiams ir skersiniams vamzdžio poslinkiams, atsirandantiems dėl slėgio ir temperatūros.

Kaip rodo ilgametė magistralinių vamzdynų eksploatacijos praktika, užtikrinti jų negendamumą, veikiant išvardintiems jėginiams faktoriams, taip pat dėl kitų priežasčių, neįmanoma. Todėl magistraliniuose naftotiekiuose atsiranda avarinių pažeidimų. Vamzdžių pažeidimus, trūkimus bei nutekėjimus magistraliniuose naftotiekiuose lemia šios priežastys:

- *Gamykliniai vamzdžių defektai* – metalurginiai defektai (vamzdžių sienelių sluoksniavimasis, nemetalinės priemaišos); plieno su neapskaičiuotomis stiprumo, plastiškumo, takumo charakteristikomis naudojimas; geometrinių charakteristikų nukrypimai nuo

projektinių (vamzdžio sienelės storis, vamzdžio diametras); gamyklinių susvirinimo siūlių defektai (nekokybiškas susvirinimas – paliekant plyšius, šlakų priemaišos siūlėje, pagrindinio metalo prie susvirinimo siūlės susilpnėjimas; vamzdžių gamybos defektai (mikroįtrūkimai, įdrėskimai, įpjovimai, atsirandantys metale vamzdžių gaminimo proceso metu).

- *Vamzdžių susvirinimo defektai, susvirinimo darbus atliekant lauko sąlygomis* – atsiranda tokie patys defektai, kaip atliekant susvirinimo darbus gamykloje (nekokybiškas susvirinimas, susvirinimo siūlės metalo įtempimų nevienodumas lyginant juos su pagrindinio metalo įtempimais, pagrindinio metalo aptrupėjimas prie susvirinimo siūlės esančioje zonoje).
- *Vamzdžių korozija* – sukelia įvairaus dydžio یدubų, mažų kiaurymių formavimąsi; dėl korozijos suplonėja vamzdžio sienelės storis. Ištiesinė tolygi korozija, apimanti didelius vamzdžio sienelės plotus, ištiesinė netolygi korozija, tuo pačiu metu įvairiuose vamzdžių sienelių taškuose išgraužianti skirtingo gylio duobutes. Esant vietinei korozijai vyksta metalo irimas lokaliuose vietose, atsiranda siaurų, gilių išgraužų, kiaurų sienelės prarūdimų. Vienas iš korozinio pažeidimo ant vamzdžio sienelės atvejų pavaizduotas 2.1 paveiksle [1].
- *Neigiamų įtempimų, kuriuos lemia projektinių reikalavimų pažeidimai bei projektinių sprendimų klaidos, atsiradimas* – gana dažna vamzdynuose atsirandančių pažeidimų priežastis – įtempimų atsiradimas dėl projektavimo metu neįvertintų apkrovų atsiradimo. Tokioms apkrovoms priklauso: grunto nuošliaužų apkrova, grunto iš po vamzdyno išplovimas gruntiniais vandenimis ar liūčių metu (atsiranda įlinkis).
- *Eksplotacijos režimo pažeidimai* – atsiranda, kai viršijamas darbinis slėgis, ne laiku atliekama vamzdynų apžiūra, jų būklės įvertinimas ir pavojingų vietų nustatymas (išsipūtimai, intensyvi korozija ir pan.) [2].
- *Mechaniniai vamzdžių pažeidimai juos transportuojant, tiesiant, eksploatuojant* – įlenkimai, įbrėžimai, perlenkimai, įplėšimai,

vamzdžio kraštų suplonėjimas juos tempiant vilkikais, gofrai, mikrokūrikimų atsiradimas, vamzdynų pažeidimai žemės darbų mašinomis, atliekant įvairius žemės ūkio darbus (1.9 pav.).

1.9 pav. Korozijos pažeistas vamzdis

– *Nesankcionuotas prisijungimas* (1.10 pav.)

a)

b)

c)

1.10 pav. Vamzdžių pažeidimų atvejai [1, 2, 3]: a – vamzdis pradurtas plūgu, atliekant žemės ūkio darbus; b – nesankcionuotas prisijungimas prie magistralinio naftotiekio; c – išilgai suvirinimo siūlės trūkęs vamzdis

Dažniausiai vamzdynų, kuriais transportuojama nafta ir naftos produktai, pažeidimai išplinta nuo keliasdešimt centimetrų iki keliasdešimt metrų. Keliasdešimtys metrų pažeidimai įvyksta gana retai. Vamzdžio plyšimas ties suvirinimo siūle pavaizduotas 1.10 pav. c.

Statistiniai duomenys rodo magistraliniuose naftotiekiuose įvykusių didelių ir mažesnių avarijų skaičiaus kitimo tendencijas priklausomai nuo eksploatacijos metų (1.11 pav.).

1.11 pav. Magistraliniuose naftotiekiuose įvykusių didelių ir mažesnių avarijų skaičiaus kitimo tendencija priklausomai nuo eksploatacijos metų

Iš 1.11 pav. matome, kad pirmaisiais eksploatacijos metais didelių ir mažesnių avarijų skaičius yra didžiausias. Tai magistralinio vamzdyno įdirbio laikotarpis. Šiuo laikotarpiu paprastai išryškėja daugelis gamyklinių defektų, taip pat vamzdyno klojimo metu atsiradę bei suvirinimo siūlių defektai. Ilgėjant eksploatacijos laikotarpiui didelių bei mažesnių avarijų skaičius mažėja. Galima pastebėti, kad mažiausias avarijų skaičius įvyko septintaisiais eksploatacijos metais. Antrieji bei septintieji metai yra darbinės eksploatacijos laikotarpis. Aštuntaisiais magistralinio naftotiekio eksploatacijos metais didelių bei mažesnių avarijų skaičius vėl pradeda didėti. Pastebėjus avarijų skaičiaus didėjimo tendenciją turi būti atliekami kapitaliniai remonto darbai. Avarijų magistraliniuose naftotiekiuose skaičius dėl įvairių priežasčių ketvirtaisiais ir penktaisiais eksploatacijos metais pavaizduotas 1.12 pav.

1.12 pav. Ketvirtaisiais ir penktaisiais eksploatacijos metais dėl įvairių priežasčių magistraliniuose naftotiekiuose įvykusių avarijų skaičius

2. SKYSČIŲ IR DUJŲ FIZINĖS SAVYBĖS

2.1 Skysčių fizinės savybės

Pagrindinės skysčių fizinės savybės yra: tankis, klampa, tūrinis plėtimasis kintant temperatūrai, tūrinis tamprumo modulis, garso greitis, laidumas ir kt.

Skysčio tankis – fizikinis dydis, lygus skysčio masės m ir tūrio V santykiui:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (2.1)$$

Vandens tankio ρ priklausomybė nuo temperatūros T ir slėgio p kai temperatūra kinta nuo 273,15 K, o slėgis nuo 0,1 MPa iki savo krizinių reikšmių, yra tokia [30]:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_k}{\rho} = & A_{11}a_5z^{-5/17} + \\ & + \left(A_{12} + A_{13}T_R + A_{14}T_R^2 + A_{15}(a_6 - T_R)^{10} + A_{16}(a_7 + T_R^{19})^{-1} \right) - \\ & - (a_8 + T_R^{11})^{-1} (A_{17} + 2A_{18}P_R + 3A_{19}P_R^2) - A_{20}T_R^{18} (a_9 + T_R^2) \cdot \\ & \cdot \left(-3(a_{10} + P_R)^{-4} + a_{11} \right) + 3A_{21}(a_{12} - T_R)P_R^2 + 4A_{22}T_R^{-20}P_R^3, \end{aligned}$$

$$\text{čia } z = Y + \left(a_3Y^2 - 2a_4T_R + 2a_5P_R \right)^{\frac{1}{2}}; \quad Y = 1 - a_1T_R^2 - a_2T_R^{-6}; \quad P_R = \frac{p}{p_k};$$

$$T_R = \frac{T}{T_k};$$

$\rho_k = 315,4574 \text{ kg/m}^3$ – vandens garų krizinis tankis;

$p_k = 221,2 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ – vandens garų slėgis esant krizinei būsenai;

$T_k = 647,3$ K– vandens garų temperatūra krizinėje būsenoje; A_{11} – A_{22} ir a_1 – a_2 – koeficientai, kurie yra lygūs:

$$\begin{aligned}
 A_{11} &= 7,982692717 \cdot 10^0; & a_1 &= 8,438375405 \cdot 10^{-1}; \\
 A_{12} &= -2,616571843 \cdot 10^{-2}; & a_2 &= 5,362162162 \cdot 10^{-4}; \\
 A_{13} &= 1,522411790 \cdot 10^{-3}; & a_3 &= 1,720000000 \cdot 10^{-2}; \\
 A_{14} &= 2,284279054 \cdot 10^{-2}; & a_4 &= 7,342278489 \cdot 10^{-2}; \\
 A_{15} &= 2,241641790 \cdot 10^2; & a_5 &= 4,975858870 \cdot 10^{-2}; \\
 A_{16} &= 1,269716088 \cdot 10^{-10}; & a_6 &= 6,537154300 \cdot 10^{-1}; \\
 A_{17} &= 2,074838328 \cdot 10^{-7}; & a_7 &= 1,150000000 \cdot 10^{-1}; \\
 A_{18} &= 2,174020350 \cdot 10^{-8}; & a_8 &= 1,510800000 \cdot 10^{-5}; \\
 A_{19} &= 1,105710498 \cdot 10^{-9}; & a_9 &= 1,418800000 \cdot 10^{-1}; \\
 A_{20} &= 1,293441934 \cdot 10^1; & a_{10} &= 7,002753165 \cdot 10^0; \\
 A_{21} &= 1,308119072 \cdot 10^{-5}; & a_{11} &= 2,995284926 \cdot 10^{-4}; \\
 A_{22} &= 6,047626338 \cdot 10^{-14}; & a_{12} &= 2,040000000 \cdot 10^{-1}.
 \end{aligned}$$

Skysčio klampa – skysčio savybė priešintis judėti vienam sluoksniui kito atžvilgiu, veikiant trinties jėgai. Pagal Niutono dėsnį trinties tangentiniai įtempimai τ proporcingi greičio gradientui:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dn}. \quad (2.2)$$

Iš (2.2) priklausomybės kyla, kad:

$$\eta = \frac{\tau}{(dv/dn)} = \frac{(F/S)}{(dv/dn)}; \quad (2.3)$$

čia η – proporcingumo koeficientas arba skysčio dinaminė klampa; v – tekėjimo greitis; n – atstumas tarp skysčio sluoksnių, išmatuotas statmenai skysčio tekėjimo greičiui; F – vidinė trinties jėga, veikianti tarp dviejų sluoksnių; S – sluoksnio storis.

SI matavimo vienetų sistemoje kinematinės klamos koeficiento matas yra m^2/s .

Skysčio dinaminė klampa pasireiškia tada, kai skystis teka, o skysčiui esant ramybės būsenoje tangentiniai įtempimai lygūs nuliui.

SI matavimo vienetų sistemoje klamos matas – $N \cdot \text{s}/\text{m}^2$ arba $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ arba $\text{Pa} \cdot \text{s}$.

Praktiniuose skaičiavimuose reikia įvertinti ne tik klampą, bet ir vidinių trinties jėgų priklausomybę nuo skysčio srauto inercijos. Todėl vartojamas kinematinės klamos koeficientas ν , kuris lygus dinaminės klamos η ir skysčio tankio ρ santykiui:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (2.4)$$

Skysčių tekėjimas, kai trinties įtempimai nustatomi pagal Niutono dėsnį, apibūdinamas tuo, kad esant be galo mažiems tangentiniams įtempimams skystis teka (deformuojasi). Tačiau yra skysčių, kurie pradeda tekėti, kai tangentiniai įtempimai pasiekia tam tikrą reikšmę τ_0 , kuri vadinama ribiniu šlyties įtempimu. Tada trinties tangentiniai įtempimai lygūs:

$$\tau = \begin{cases} \tau_0 + \eta \frac{dv}{dn}, & \text{kai } |\tau| \geq \tau_0, \\ 0, & \text{kai } |\tau| < \tau_0. \end{cases} \quad (2.5)$$

Skysčiai, kurių trinties tangentiniai įtempimai nustatomi pagal (2.5) priklausomybę, vadinami Bingamo (Bingham) skysčiais. Prie Bingamo skysčių galima priskirti dantų pastą, dažus, šokolado

mišinius. Be šių skysčių, dar yra viena grupė skysčių, kurių trinties tangentiniai įtempimai nustatomi pagal formulę:

$$\tau = K \left(\frac{dv}{dn} \right)^n; \quad (2.6)$$

čia K – konsistencijos rodiklis; n – būsenos rodiklis. Kai $n < 1$, tokie skysčiai vadinami pseudoplastiniais skysčiais. Prie jų galima priskirti plastiškuosius tepalus, majonezą ir kt. Kai $n > 1$, tokie skysčiai vadinami dilatantiniais skysčiais. Prie jų galima priskirti didelės miltelių koncentracijos vandenį.

Skysčių klampa priklauso nuo jų cheminės sudėties, temperatūros, slėgio. Didinant temperatūrą, skysčių klampa mažėja. Šią priklausomybę galima užrašyti taip:

$$\eta_1 = \eta_2 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^k; \quad (2.7)$$

čia η_1, η_2 – dinaminė klampa esant temperatūrai atitinkamai T_1 ir T_2 . Rodiklis k priklauso nuo skysčio rūšies. Hidraulinėse sistemose naudojamai alyvai rodiklis k kinta nuo 2,53 iki 3,27 intervale.

Vandens dinaminės klamos η priklausomybė nuo temperatūros, kai temperatūra kinta nuo 273,15 K iki krizinės reikšmės, yra tokia [30]:

$$\eta = \eta_0 \exp \left(\frac{\rho}{\rho_k} \sum_{i=0}^5 \sum_{j=0}^4 b_{ij} \left(\frac{T_k}{T} - 1 \right) \left(\frac{\rho}{\rho_k} - 1 \right)^j \right);$$

$$\text{čia } \eta_0 = \left(\frac{T}{T_k} \right)^{1/2} \left(\sum_{l=1}^3 a_l \left(\frac{T_k}{T} \right)^l \right)^{-1};$$

$$a_0 = 1,81583 \cdot 10^{-2}; a_1 = 1,77624 \cdot 10^{-2};$$

$$a_2 = 1,05287 \cdot 10^{-2}; a_3 = 3,6744 \cdot 10^{-3};$$

$T_k = 647,3 \text{ K}$; $\rho_k = 315,4574$; b_{ij} – koeficientai, kurių reikšmės yra lygios:

i	$j = 0$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$
0	0,501938	0,235622	-0,274637	0,145831	-0,0270448
1	0,162888	0,789393	-0,743539	0,263129	-0,0253093
2	-0,130356	0,673665	-0,959456	0,347247	-0,0267758
3	-0,907919	1,207552	-0,687343	0,213486	-0,0822904
4	-0,551119	0,0670665	-0,497089	0,100754	0,0602253
5	0,146543	-0,084337	-0,195286	-0,032932	-0,0202595

Skysčių klampa didėjant slėgiui didėja. Tai ypač svarbu nagrinėjant tūrinės hidraulines pavaras. Daugumos skysčių dinaminės klampos η priklausomybė nuo slėgio p yra tokia:

$$\eta = \eta_0 e^{ap}; \quad (2.8)$$

čia η_0 – skysčio dinaminė klampa, kai slėgis lygus atmosferiniam slėgiui; a – koeficientas.

Tam tikrais atvejais skysčio klampos dvejoja priklausomybė nuo temperatūros ir slėgio viena kitą gali kompensuoti. Pavyzdžiui, siauruose plyšiuose arba kanaluose skysčio klampos padidėjimas dėl didelio slėgio kanalo įėjime gali būti kompensuotas skysčio klampos sumažėjimu dėl padidėjusios skysčio temperatūros išilgai kanalo. Temperatūros poveikis skysčio tankiui apibūdinamas plėtimosi koeficientu α :

$$\alpha = \frac{\Delta V}{V \Delta T}; \quad (2.9)$$

čia V ir ΔV – skysčio pradinis tūris ir tūrio pokytis, pakitus temperatūrai dydžiu $\Delta T = T_2 - T_1$; T_1 , T_2 – pradinė ir galutinė skysčio temperatūra.

Skysčio tūris V_2 , tūrio pokytis ΔV , kai temperatūra T_2 , lygūs:

$$V_2 = V_1 (1 + \alpha \Delta T); \Delta V = \alpha V \Delta T;$$

čia V_1 – skysčio tūris, kai temperatūra T_1 .

Skysčio tankis esant temperatūrai $T_2 = T_1 + \Delta T$ lygus:

$$\rho_2 = \frac{\rho_1}{1 + \alpha \Delta T};$$

čia ρ_1 – skysčio tankis, kai temperatūra T_1 .

SI matavimo vienetų sistemoje temperatūrinio plėtimosi koeficiento matas yra $1/K$.

Skysčių spūdumas nusakomas tūriniu spūdumo koeficientu β :

$$\beta = -\frac{1}{V} \frac{dV}{dp}; \quad (2.10)$$

čia V, p – skysčio tūris ir slėgis.

Skysčių spūdumas yra nedidelis ir kai kuriais atvejais galima į jį neatsižvelgti. Tačiau žinoma daug atvejų, kai dėl skysčių spūdumo hidraulinėse sistemose atsiranda virpesių, hidrauliniuose mechanizmuose susidaro vibracijų, padidėja triukšmo. Dėl skysčių spūdumo dirba hidrauliniai automatinių virpesių vibratoriai.

Skysčio spūdimą dar galima apibūdinti santykinio skysčio tankio kitimu slėgio vienetui:

$$\beta = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp}. \quad (2.11)$$

Skysčių tankio priklausomybę nuo slėgio ir temperatūros galima užrašyti tokiu pavidalu:

$$\rho = \rho_0 (c_0 + c_1 p + c_2 p^2 + \dots + c_n p^n); \quad (2.12)$$

čia ρ – skysčio tankis esant slėgiui p ir temperatūrai T ; ρ_0 – skysčio tankis esant temperatūrai T ir atmosferos slėgiui; $c_i = c_i(T)$, ($i = 1, \dots, n$) – koeficientai, priklausantys nuo temperatūros T .

Pavyzdžiui, hidraulinėse pavarose naudojamų skysčių parametrai c_0 , c_1 ir c_2 lygūs: $c_0 = 1$, $c_1 = 10^{-10} \text{ 1/Pa}$ ir $c_2 = -1,16 \cdot 10^{-19} \text{ 1/Pa}^2$.

Jeigu įrašysime skysčių tankio priklausomybę nuo slėgio (2.12) į (2.11), gausime skysčio spūdumo koeficiento išraišką:

$$\beta = \frac{c_1 + 2c_2 p}{c_0 + c_1 p + c_2 p^2},$$

o šiaip skysčio spūdumo koeficiento išraiška lygi:

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n i c_i p^{i-1}}{\sum_{i=0}^n c_i p^i}. \quad (2.13)$$

Nagrinėjant hidrodinامينius procesus hidraulinėse sistemose, naudojamas dydis, atvirkštinis skysčio spūdumo koeficientui, kuris vadinamas tūriniu tamprumo modulių:

$$K = \rho \frac{dp}{d\rho}. \quad (2.14)$$

Skysčių tūrinio tamprumo modulio priklausomybė nuo temperatūros ir slėgio nustatoma eksperimentais. Jeigu skysčių tūrinis tamprumo modulis randamas esant pastoviai temperatūrai, jis vadinamas izoterminiu. Kai eksperimentas atliekamas esant sąlygoms, kai šilumos mainai tarp skysčio ir aplinkos yra labai silpni, toks skysčio tūrinis tamprumo modulis vadinamas adiabatiniu. Vidutinis izoterminis tūrinis tamprumo modulis nustatomas apdorojant eksperimentų rezultatus pagal formulę:

$$K = -V_0 \frac{\Delta p}{\Delta V}; \quad (2.15)$$

čia Δp , ΔV – slėgio ir tūrio pokytis; V_0 – pradinis skysčio tūris.

Skysčių lokalinis izoterminis ir adiabatinis tamprumo modulis lygus:

$$K = -V \frac{dp}{dV}. \quad (2.16)$$

Dažnai inžineriniuose skaičiavimuose skysčių tūrinio tamprumo modulio priklausomybė nuo temperatūros užrašoma taip:

$$K = K_0 + K_1(T)p + K_2(T)p^2 + \dots + K_n(T)p^n; \quad (2.17)$$

čia K_0 – tūrinis tamprumo modulis esant slėgiui $p = p_0$; $K_i(T)$, ($i = 1, \dots, n$) – koeficientai, priklausantys nuo temperatūros T .

Parametrų K_0 ir $K_1(T)$ reikšmės kelioms alyvoms pateiktos 2.1 lentelėje.

2.1 lentelė. Alyvų tūrinio tamprumo modulio K_0 ir koeficiento $K_1(T)$ reikšmės

Alyvos pavadinimas	Parametras	Dimensija	Temperatūra, K			
			293	313	333	353
Turbininė – 22	K_0	GPa	1,95	1,81	1,56	1,50
	K_1	–	12,00	12,00	12,00	12,00
Pramoninė – 20	K_0	GPa	1,88	1,74	1,53	1,25
	K_1	–	15,75	12,52	12,00	10,00
VNIINP	K_0	GPa	2,02	1,81	1,56	–
	K_1	–	10,00	10,00	10,00	–

Kai skystyje yra tam tikras dujų kiekis ir dujų būsena adiabiškai keičiasi, tada mišinio tūrinis tamprumo modulis skaičiuojamas taip:

$$K_m = \frac{K_s \left[1 + \varepsilon \left(\frac{p_0}{p} \right)^{1/k} \right]}{1 + \frac{K_s}{kp} \varepsilon \left(\frac{p_0}{p} \right)^{1/k}}, \quad (2.18)$$

čia K_s – skysčio tūrinis tamprumo modulis; p_0 – pradinis absoliutus slėgis; p – absoliutus slėgis; k – adiabatės rodiklis; ε – santykinis dujų kiekis, $\varepsilon = \frac{V_d}{V_s}$; V_d – dujų tūris, – skysčio tūris.

Kai skystyje yra žinomas tam tikras oro masės kiekis, tada mišinio tūrinis tamprumo modulis skaičiuojamas taip:

$$K_m = \frac{(K_s + 1,27p) \left[1 - \frac{p}{K_s + 0,5(p_a + p)} + m_{\text{oras}} \left(1 + \frac{p}{p_a} \right) \right]}{1 - \frac{p}{K_s + 0,5(p_a + p)} + m_{\text{oras}} (K_s + 1,27p) \left(\frac{p_a + p}{kp_a^{-1/k}} \right)^k} \quad (2.19)$$

čia p_a – atmosferinis slėgis; p – slėgis; K_s – skysčio tūrinis tamprumo modulis; m_{oras} – oro masės kiekis; k – adiabatės rodiklis.

Skysčių lokalinį tūrinį tamprumo modulį dar galima nustatyti kaip skysčio tankio ρ ir garso greičio (akustinis greitis) c kvadrato sandaugą:

$$K = \rho c^2. \quad (2.20)$$

Garso greitis – greitis, kuriuo sklinda maži sužadinimai tamprioje terpėje (kietasis kūnas, skystis, dujos). Mažais sužadinimais vadinami tokie terpės sužadinimai, kai sužadinimo vietoje slėgio pokytis, t. y. slėgio amplitudė, daug kartų mažesnis negu bendrasis slėgis terpėje. Jį lemia medžiagos savybės ir tankis. Kartais garso greitis priklauso nuo garso bangos dažnio. Garso greitis skysčiuose, išskyrus vandenį, mažėja didėjant temperatūrai. Garso greitis vandenyje iki 347 K temperatūros didėja, daugiau nei 347 K – mažėja.

Dyzelino tankis ir garso greitis yra lygūs:

$$\rho = 818,67 + 0,58738 \cdot 10^{-6} p - 0,13846 \cdot 10^{-14} p^2 \quad (2.21)$$

$$c = 1551,48 + 0,50045 \cdot 10^{-5} p - 0,698163 \cdot 10^{-14} p^2, \quad (2.22)$$

tada dyzelino tūrinis tamprumo modulis pagal 2.19 formulę yra lygus:

$$\begin{aligned} K_{\text{dyz}} = & 0,1970612526 \cdot 10^{10} + 14,12680931 p + \\ & 0,8556598127 \cdot 10^{-8} p^2 - 0,7672296793 \cdot 10^{-16} p^3 - \\ & 0,5822795650 \cdot 10^{-26} p^4 + 0,1253854057 \cdot 10^{-33} p^5 - \\ & 0,6748977582 \cdot 10^{-43} p^6 \end{aligned} \quad (2.23)$$

Daugiausiai naudojamų skysčių fizinės savybės pateiktos 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė. Skysčių tankio ρ , dinaminės klampos η , garso sklaidimo greičio c , tūrinio klampos modulio K reikšmės esant temperatūrai $T = 298 \text{ K}$ ir atmosferos slėgiui

Skystis	ρ , kg/m ³	η , (Pa · s) 10 ³	K , Pa · 10 ⁻⁹	c , m/s
Acetonas	787	0,316	1,084	1174
Etilo alkoholis	787	1,095	1,029	1144
Metilo alkoholis	789	0,56	0,959	1103
Benzinas	876	0,601	1,475	1298
Ricinos aliejus	960	650	2,08	1474
Chloroformas	1470	0,53	1,455	995
Eteris	715	0,223	0,693	985
Etileno glikolis	1100	16,2	1,067	1644
Glicerinas	1263	950	4,60	1909
Heptanas	681	0,376	0,881	1138
Heksanas	657	0,297	0,9508	1203
Žibalas	823	1,64	1,433	1320
Gyvsidabris	13600	1,53	28,6	1450
Sėmenų aliejus	930	33,1	–	–
Oktanas	701	0,51	0,961	1171
Propanas	495	0,11	–	–
Propilenas	516	0,09	–	–
Propileno glikolis	968	42	–	–
Terpentinai	870	1,375	1,337	1240
Jūros vanduo	1030	–	2,42	1535
Vanduo	1000	0,89	2,24	1498

2.2 lentelės pabaiga

Skystis	ρ , kg/m ³	η , (Pa · s) 10 ³	K, Pa · 10 ⁻⁹	c, m/s
Nitrobenzolas	1200	0,673	2,32	1390
Acto rūgštis	1049	1,27	1,228	1081

2.2 Dujų savybės

Dujų tankis – masės ir tūrio santykis:

$$\rho = \frac{m}{V}. \quad (2.24)$$

Tankio atvirkštinis dydis – lyginamasis tūris,

$$v = \frac{1}{\rho}. \quad (2.25)$$

Tankiui charakterizuoti kartais naudojami ne absoliutūs, o santykiniai dydžiai.

Normavimo daugiklis:

skysčiams – vandens tankis, kai 273 K temperatūra ir 0,101 MPa slėgis;

dujoms – sauso oro tankis, kai 273 K temperatūra ir 0,101 MPa slėgis (normalios sąlygos) arba kai 293,15 K temperatūra ir 0,101 MPa slėgis (standartinės sąlygos).

Dujų tankis esant p slėgiui, T temperatūrai ir žinomam tankiui $\rho_1 = \rho_1(p_1, T_1)$, nustatomas:

$$\rho = \rho_1 \frac{pTZ_1}{p_1TZ}. \quad (2.26)$$

Ši išraiška gaunama iš žinomo termodinaminio santykio:

$$\frac{p}{\rho} = pv = ZRT = idem; \quad (2.27)$$

čia Z – spudūmo koeficientas; R – dujų kostanta, $R = R_0 / M$ J/(kgK); R_0 – universali dujų konstanta, $R_0 = 8314.3$ J/(Kmol K).

Vidutinė dujų mišinio molinė masė lygi:

$$M_{vid} = 0,01 \sum_{i=1}^n x_i M_i; \quad (2.28)$$

čia M_i – i-jų dujų molinė masė (kilogramas molis); x_i – i-jų dujų tūrio santykis su mišinio tūriu.

Kilogramas molis – dujų kilogramų skaičius, skaitine reikšme lygus dujų molekulinei masei.

Bet kokios medžiagos viename molyje yra vienodas molekulių skaičius. Toks molekulių skaičius vadinamas Avogadro skaičiumi:

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{26} \text{ kg / mol} = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ g / mol}.$$

Idealiųjų dujų būsenos lygtis:

$$pV = \frac{m}{M} RT \quad (2.29)$$

Idealiųjų dujų mišinio būsenos lygtis:

$$pV = \left(\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \dots + \frac{m_n}{M_n} \right) RT. \quad (2.30)$$

Garso greitis dujose yra lygus:

$$c = \sqrt{\frac{K}{\rho}}; \quad (2.31)$$

čia K – dujų tūrinis tamprumo modulis;

$$K = - \frac{\Delta p}{\Delta V / V} = -V \frac{dp}{dV}, \quad (2.32)$$

V – dujų tūris; ρ – dujų tankis.

Kai dujų būsena keičiasi pagal adiabatinę dėsnį, ryšis tarp tūrio ir slėgio yra lygus:

$$pV^k = C; \quad (2.33)$$

čia k – adiabatės rodiklis; C – konstanta; $C = p_0 V_0^k$, p_0 , V_0 – pradinis slėgis ir tūris.

Iš išraiškos (2.33) reiškus slėgį,

$$p = CV^{-k}. \quad (2.34)$$

Dujų tūrinis tamprumo modulis yra lygus:

$$K = -V \frac{dp}{dV} = kC \frac{V}{V^{(1+k)}} = \frac{kC}{V^k}. \quad (2.35)$$

Panaudojant idealiųjų dujų būsenos lygtį (2,29), dujų tankį galima nustatyti taip:

$$\rho = \frac{m}{VM}. \quad (2.36)$$

Panaudojant (2.31) išraišką, garso greitis dujose yra lygus:

$$c = \sqrt{\frac{\frac{kC}{V^k}}{\frac{m}{VM}}} = \sqrt{\frac{kCVM}{V^k m}} = \sqrt{\frac{kCVMp}{mC}} = \sqrt{\frac{kpM}{m}}. \quad (2.37)$$

Idealiųjų dujų garso greitis lygus:

$$c = \sqrt{k \frac{p}{\rho}} = \sqrt{kRT}. \quad (2.38)$$

Pavyzdys. Nustatyti garso greitį ore, kai temperatūra $T = 273 + 20 = 293$ K. Oro molekulinė masė lygi $M_{\text{oro}} = 28,95 \frac{\text{kg}}{\text{mol}}$.

$$c = \sqrt{kRT} = \sqrt{k(R_0 / M_{\text{oro}})T} = \sqrt{\frac{1,4 \cdot 8314,3 \cdot T}{28,95}} = 343,2 \text{ m/s}$$

Apytiksliai garso greitį ore galima nustatyti iš tokios išraiškos:

$$c = 331,4 + 0,6T_c = 331,4 + 0,6(273 + T), \text{ m/s}; \quad (2.39)$$

čia T_c – temperatūra pagal Celsijaus skalę.

Idealiųjų dujų būsenos lygtis (Klapeirono ir Mendelejevo lygtis):

$$p = \rho RT; \quad (2.40)$$

čia R – dujų konstanta, priklausanti nuo dujų cheminės sudėties.

Realiosioms dujoms yra sudaryta daug empirinių būsenos lygčių. Paprasčiausia realiųjų dujų būsenos lygtis, gauta spaudžiant 1 kg dujų, yra:

$$p = Z\rho RT; \quad (2.41)$$

čia Z – spūdomo koeficientas (idealiosioms dujoms $Z = 1$).

Apibendrinus eksperimentinius duomenis, gauta Bogomolovo ir Majerio dujų būsenos lygtis:

$$Z = 1 + \sum_{i=1}^{\infty} B_i \rho^i; \quad (2.42)$$

čia B_i – koeficientai. Koeficientų B_i skaičius (2.42) išraiškoje parenkamas pagal reikalaujamą tikslumą, tada ši lygtis yra:

$$Z = 1 + \sum_{i=1}^{N_r} B_i \rho^i; \quad (2.43)$$

čia $B_i = \sum_{j=0}^{N_{Si}} \frac{b_{ij}}{\tau_T^j}$, N_{Si} – kitimo riba; b_{ij} – koeficientas; $\tau_T = \frac{T}{T_{kr}}$, T_{kr} – kritinė temperatūra.

Aproksimavus eksperimentinius duomenis, galima užrašyti Bogomolovo ir Majerio realiųjų dujų būsenos lygtį kita forma:

$$Z = 1 + \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=0}^{N_{Si}} b_{ij} \frac{\omega_p^i}{\tau_T^j}; \quad (2.44)$$

čia $\omega_p = \frac{\rho}{\rho_{kr}}$; ρ_{kr} – krizinis tankis.

Be anksčiau minėtų dujų būsenos lygčių, dar naudojamos: Bitės ir Bridžmano, Benedikto ir Rubino, Rabinovičiaus, Sičiovo, Vasermano, Kleckovo ir kt.

Nagrinėjant dinامينius procesus vamzdynuose, svarbus parametras yra garso greitis dujose. Garso greičio skirtumas tarp idealiųjų ir realiųjų dujų (oras) priklausomai nuo slėgio ir temperatūros parodytas 2.1 pav.

2.1 pav. Garso greičio skirtumo tarp idealiųjų ir realiųjų dujų (oras) priklausomybė nuo slėgio ir temperatūros

Dujų dinaminė klampos η priklausomybė nuo temperatūros T išreiškiama Saterlendo formule:

$$\eta = \eta_0 \frac{(273 + C_s)}{T + C_s} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2}; \quad (2.45)$$

čia η_0 – dinaminė klampa, kai temperatūra $T_c = 0^\circ C$; η – dinaminė klampa, kai absoliuti temperatūra T , K ; C_s – Saterlendo konstanta (2.3 lentelė).

2.3 lentelė. Tam tikrų dujų Saterlendo konstantos reikšmės

Dujos	C_s
Metanas	162
Etanas	252
Propanas	673
h butanas	377
Izobutanas	368
h pentanas	382
Etilenas	225
Propilenas	322

Dujų kinematinės klamos koeficientas ν , kuris lygus dinaminės klamos μ ir dujų tankio ρ santykiui:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} = \frac{\eta_0}{p} RT \frac{(273 + C_s)}{T + C_s} \left(\frac{T}{273} \right)^{3/2}. \quad (2.46)$$

Dujų mišinio dinaminės klamos koeficientas lygus:

$$\eta_m = \sum_{i=1}^n x_i \eta_i; \quad (2.47)$$

čia η_i – i-jų dujų dinaminės klamos koeficientas; x_i – i-jų dujų dalis mišinyje.

Daugiakomponenčio dujų mišinio dinaminės klamos koeficientas lygus:

$$\eta_m = \sum_{i=1}^n \frac{\eta_i}{1 + \frac{1}{x_i} \sum_{j=1}^n x_j A_{ji}}; \quad (2.48)$$

čia koeficientai A_{ij} yra lygūs:

$$A_{ij} = \frac{\left[1 + \left(\frac{\eta_i}{\eta_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2}{2\sqrt{2} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{1/2}}; \quad (2.49)$$

čia M_i, M_j – komponentų molinės masės.

Dujų šilumos laidumo koeficientas yra lygus:

$$\lambda = \lambda_0 \frac{C_p}{C_{p0}} \frac{(T_0 + C_s)}{T + C_s} \left(\frac{T}{T_0} \right)^{3/2}; \quad (2.50)$$

čia λ_0 – šilumos laidumo koeficientas, kai temperatūra T_0 ; C_{p0} , C_p – specifinės šilumos, kai temperatūros T_0 ir T .

Dujų šilumos laidumo koeficientą galima surasti panaudojant dujų kinetinę teoriją. Pagal šią teoriją Prandlio kriterijus Pr yra lygus:

$$Pr = \frac{C_p \eta}{\lambda} = \frac{4}{9 - 5 \frac{C_v}{C_p}} \quad (2.51)$$

ir Prandlio kriterijus nepriklauso nuo slėgio ir temperatūros.

Žinodami C_p, C_v surandame iš išraiškos

$$C_p - R = C_v$$

Pagal (2.51) išraišką apskaičiuojame Pr kriterijų ir žinodami dinaminės klampos koeficientą η , surandame dujų šilumos laidumo koeficientą:

$$\lambda = \frac{C_p \eta}{Pr}, \quad \frac{W}{mK}. \quad (2.52)$$

Daugiakomponenčio dujų mišinio šilumos laidumo koeficientas lygus:

$$\lambda_m = \sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i}{1 + x_i \sum_{j=1}^n x_j A_{ji}}; \quad (2.53)$$

čia koeficientai A_{ji} yra lygūs:

$$A_{ji} = \frac{1}{4} \left\{ 1 + \left[\left(\frac{\eta_j}{\eta_i} \right) \left(\frac{M_i}{M_j} \right)^{3/4} \left(\frac{1 + \frac{C_{sj}}{T}}{1 + \frac{C_{si}}{T}} \right) \right]^{1/2} \right\}^2 \frac{1 + \frac{\sqrt{C_{si} C_{sj}}}{T}}{1 + \frac{C_{sj}}{T}}; \quad (2.54)$$

čia C_{si} ir C_{sj} – Saterlendo konstantos.

2.3 Angliavandenilinės dujos

Dujos, kurias gaunamos iš žemės gelmių ir jas perdirbus, vadinamos gamtinėmis dujomis. Angliavandenilinės degančios dujos yra dviejų tipų: sausos ir riebiosios. Sausos dujos daugiausia susideda iš metano (90–98 % CH_4). Jos yra bespalvės, dega vos pastebima aukštos temperatūros liepsna. Riebiosios dujos, gaunamos kartu su nafta, turi, be metano, kitų sunkiųjų angliavandenių ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$).

Pavyzdžiui, Saratovo gamtinių dujų sudėtis: metanas (CH_4) – 94,0 %; etanas (C_2H_6) – 1,2 %; propanas (C_3H_8) – 0,7 %; butanas (C_4H_{10}) – 0,4 %; pentanas (C_5H_{12}) – 0,2 %; deguonis (O_2) – 0,37 %; azotas (N_2) – 5,42 %; tankis 0.765 Mg/m^3 ; tankis pagal orą (santykinis tankis) $d=0.6592$. Šilumos kiekis išsiskiriantis degimo metu: $\max Q = 9484 \cdot 4,19 \cdot 10^3 \frac{J}{kg}$ ir $\min Q = 8535 \cdot 4,19 \cdot 10^3 \frac{J}{kg}$.

Dėl didelio vandenilio kiekio šiose gamtinėse dujose šilumos kiekių skirtumas gana didelis, jis lygus $950 \cdot 4,19 \cdot 10^3 \frac{J}{kg}$.

Degimo metu išsiskiriantis dujų mišinio šilumos kiekis priklauso nuo mišinį sudarančių dujų išsiskiriančių šilumos kiekių.

Svarbi dujų charakteristika – užsiliepsnojimo temperatūra (minimali, pradinė degančių dujų užsiliepsnojimo temperatūra). Ši temperatūra priklauso nuo pagrindinių užsidegančių dujų savybių (šilumos laidumo, lyginamojo svorio ir kt.) ir nuo uždegimo sąlygų. Didžiausia užsiliepsnojimo temperatūra deguonyje yra metano (CH_4 516 K) ir anglies monoksido (CO 863 K). Inertinės dujos padidina užsiliepsnojimo temperatūrą. Dujų mišinio užsiliepsnojimo temperatūra lygi mažiausiai mišinį sudarančių dujų užsiliepsnojimo temperatūrai. Dujų mišinio šilumos laidumo koeficientas lygus:

$$\lambda_m = \frac{1}{100} \sum_{i=1}^n \lambda_i V_i, \quad \frac{W}{mK}; \quad (2.55)$$

čia λ_i – i-jų dujų sudedamosios šilumos laidumas, $W/(mK)$; V_i – i-jų dujų santykinis tūris.

Dujų mišinys užsiliepsnoja esant tam tikram deguonies ir degančių dujų santykiui. Kai dujų mišinį sudaro 5,1 % gamtinių dujų, dujų mišinys nedega. Kai dujų mišinį sudaro daugiau kaip 13,9 % gamtinių dujų, dujų mišinys nedega. Žemiausia užsiliepsnojimo temperatūros riba vadinamas toks degančių dujų tūris mišinyje su oru arba deguonimi, kurio pakanka, kad mišinys užsiliepsnotų. Viršutinė užsiliepsnojimo temperatūros riba vadinamas toks degančių dujų tūris mišinyje su oru arba deguonimi, kurio nepakanka kad mišinys užsiliepsnotų dėl nepakankamo oro kiekio. Dujų mišinio su deguonimi užsiliepsnojimo temperatūros ribos daug platesnės negu mišinio su oru. Degančių dujų mišinio užsiliepsnojimo ribos N % galima nustatyti pagal mišinį sudarančių dujų užsiliepsnojimo ribas:

$$N = \frac{\sum_{i=1}^n V_i}{\sum_{i=1}^n \frac{V_i}{N_i}}; \quad (2.56)$$

čia V_i – i -jų dujų tūrio procentinė dalis; N_i – užsiliepsnojimo ribos (apatinė arba viršutinė).

Saratovo gamtinių dujų mišinio su deguonimi apatinė užsiliepsnojimo riba lygi:

$$N_a = \frac{94,0 + 1,2 + 0,7 + 0,4 + 0,2}{\frac{84}{5,0} + \frac{1,2}{4,0} + \frac{0,7}{2,3} + \frac{0,4}{1,9} + \frac{0,2}{1,4}} = \frac{96,5}{19,70} = 5,0\%.$$

Viršutinė užsiliepsnojimo riba lygi:

$$N_v = \frac{94,0 + 1,2 + 0,7 + 0,4 + 0,2}{\frac{94}{59,0} + \frac{1,2}{46,0} + \frac{0,7}{9,5} + \frac{0,4}{8,4} + \frac{0,2}{8,0}} = \frac{96,5}{1,78} = 54,2\%.$$

Saratovo gamtinių dujų mišinio su oru užsiliepsnojimo ribos yra (5,1–13,9).

Liepsnos sklidimo, arba užsiliepsnojimo, greitis vadinamas judančios liepsnos greičiu, jo kryptis statmena užsiliepsnojimo paviršiui. Maksimalus užsiliepsnojimo greitis pasiekiamas esant tam tikrai dujų mišinio koncentracijai ore. Didžiausias užsiliepsnojimo greitis yra vandenilio, mažiausias – metano.

Gamtinių dujų pranašumai:

- Pigi gamtinių dujų gavyba;
- Nėra CO dujų;
- Maža aplinkos tarša;
- Didelė degimo temperatūra.

Gamtinės dujos kaip pramonėje naudojamos dujos turi tam tikrų technologinių pranašumų:

- Degimo procesui reikalingas minimalus oro kiekis;

- Turintis mažiausiai kenksmingų mechaninių ir cheminių priemaišų, kas sudaro geras sąlygas degimui;
- Deginant dujas galima užtikrinti tikslų degimo proceso reguliavimą;
- Panaudojant dujas nėra mechaninių nuostolių dėl nepakankamo kuro įkaitinimo;
- Liepsnos formą galima reguliuoti, tai leidžia greitai pasiekti reikiamą išilimą.

Trūkumas: dujų mišinys, susidedantis iš tam tikrų dedamųjų, gali sprogti.

Dujų mišinys dega tik esant orui, kuriame yra deguonies, be to, užsidega tik esant tam tikram dujų ir oro santykiui (2.4 lentelė).

2.4 lentelė. Dujų užsiliepsnojimo temperatūros

Dujos	Užsiliepsnojimo temperatūra, °C		Dujų mišinio su oru užsiliepsnojimo ribos, %	
	Apatinė	Viršutinė	Apatinė	Viršutinė
Metanas	645	850	5	15
Acitilenas	335	500	2,5	80
Butanas	490	569	1,86	8,4
Propanas	530	588	2.37	9,5
Etanas	530	594	3,2	12,45
Vandenilis	530	590	4	74

Degimo metu šiluma išsiskiria žaibiškai ir plečiantis, užimame tūryje didėja slėgis. Staigus dujų degimas – sproginas. Absoliutų slėgį (MPa), kuris atsiranda dujų mišinio degimo metu, galima nustatyti taip:

$$p_{\text{sprog}} = \frac{p_{\text{prad}} T_{\text{sprog}}}{T_{\text{prad}}} \cdot \frac{m}{n}; \quad (2.57)$$

čia p_{prad} – pradinis dujų mišinio slėgis, MPa; T_{sprog} – temperatūra sproginimo metu, K; T_{prad} – dujų mišinio temperatūra, K; m – degimo

produktų tūrių skaičius; n – dujų mišinio ir oro tūrių skaičius iki sprogimo.

Pavyzdys 1. Nustatyti maksimalų dujų slėgį, kai sprogsta metano ir oro dujų mišinys. Pradinė temperatūra 293 K; maksimali sprogimo temperatūra 2338 K.

Metano degimo proceso lygtis, įvertinant azoto (N_2) kiekį ore, yra:

Dujų mišinio tūris:

– iki degimo: $1+2+7,52=10,52$

– po sprogimo: $1+2+7,52=10,52$

$$p_{\text{sprog}} = \frac{0,1 \cdot 2338}{293} \cdot \frac{10,52}{10,52} = 0,80 \text{ MPa}.$$

Perteklinis slėgis: $0,80 - 0,10 = 0,70 \text{ Mpa}$.

Acitilenas visiškai sudega vykstant tokiai reakcijai:

Suspaustoms gamtinėms dujoms (CH_4) degant vyksta tokia reakcija:

Šios reakcijos charakterizuoja pradinę ir galutinę degimo proceso stadijas.

Iš tikrųjų degimo procese vyksta nuoseklūs virsmai tarpinių reakcijų metu. Pagrindinėje stadijoje degimo produktai suskyla į pagrindinius elementus (C ir H_2) ir degant susidaro vandens garai ($CO + H_2$). Angliavandeniai C_XH_Y įkaitinus aukščiau atitinkamos temperatūros suskyla į elementus:

Metanas $CH_4 \Rightarrow C + 2H_2$;

Acitilenas $C_2H_2 \Rightarrow 2C + H_2$;

Dujų mišinio skilimas esant deguoniui vyksta sudėtingiau, t. y. iš pradžių suskyla į atskirus elementus, o po to šie elementai reaguoja su deguonimi.

Saratovo gamtinės dujos, esant temperatūrai 1273–1573 K, suskyla į elementus:

Degant acitilenui deguonyje vyksta tokios reakcijos:

Degant metanui deguonyje vyksta šios reakcijos:

Degant metanui išsiskiriantis šilumos kiekis lygus:

$$Q = -Q_a + Q_1 + Q_2 + Q_3.$$

Saratovo gamtinėms dujoms $Q = 8535 \cdot 4,19 \cdot 10^3$ (J/kg)

Minimalus išsiskiriantis šilumos kiekis lygus:

$$Q_{\min} = 85,3\text{CH}_4 + 151,9\text{C}_2\text{H}_6 + 217,4\text{C}_3\text{H}_8 + \quad (2.64)$$

$$282,8\text{C}_4\text{H}_{10} \cdot 4,19 \cdot 10^3 \text{ (J/kg)}.$$

Sprogus dujų mišiniui dujotiekyje, esant dideliame vamzdyno ilgiui ir skersmeniui, liepsnos sklaidimo greitis gali viršyti garso greitį (smūginė banga). Tokiu atveju slėgis padidėja iki 8 MPa. Toks ypač greitas degimo procesas vadinamas **detonacija**.

Gamtinės dujos – nenuodingos, tačiau kai metano dujų koncentracija ore 10 % ir daugiau, galima uždusti dėl deguonies trūkumo.

Angliavandenių C_xH_y degimo proceso reakcija vyksta pagal bendrąją formulę:

2.5 lentelė. Teorinis deguonies ir oro poreikis deginant dujas

Dujos	1 nm ³ dujų tūriui	
	Deguonies, nm ³	Oro, nm ³
Metanas (CH ₄)	2,0	9,52
Etilenas (CH ₄)	3,0	14,28

2.5 lentelės pabaiga

Dujos	1 nm ³ dujų tūriui	
	Deguonies, nm ³	Oro, nm ³
Etanas (C ₂ H ₆)	3,5	16,66
Propilenas (C ₃ H ₆)	4,5	22,42
Propanas (C ₃ H ₈)	5,0	23,80
Butilenas (C ₄ H ₈)	6,0	28,56
Butanas (C ₄ H ₁₀)	6,5	30,94

Dujų drėgnumas gali būti: absoliutus ir santykinis. **Absoliutus drėgnumas** – vandens garų kiekis (gramai), esantis 1 m³ dujų tūryje. **Santykinis drėgnumas** – maksimalus faktinių vandens garų kiekis dujose esant tam tikrai temperatūrai ir slėgiui. Santykinis drėgnumas išreiškiamas procentais.

Aušinant neprisotintas dujas jų santykinis drėgnumas didėja ir atitinkamoje temperatūroje šios dujos taps prisotintos. Toliau mažinant temperatūrą, vandens garai pradės kondensuotis. Temperatūra, iki kurios reikia ataušinti dujas, kad jose esantys vandens garai pasiektų prisotinimo būseną, vadinama šių dujų **rasos tašku** esant tam tikram slėgiui.

Drėgmė dujose nepageidautina, kadangi transportuojant dujas gali atsirasti vamzdžių ir armatūros korozija, gali susidaryti hidratai ir kondensatai. **Hidratai** – vandens prisijungimas prie tam tikrų medžiagų. Drėgmės kiekis dujose mažina išsiskiriantį šilumos kiekį degimo procese.

Esant atitinkamai vandens koncentracijai dujose, dujų slėgiui ir temperatūrai dujotiekiuose gali susidaryti kristaliniai junginiai, kuriuose vandens molekulės yra savarankiškos. Tokie junginiai vadinami **kristalohidratais**. Kristalohidratai yra angliavandenių ir vandens junginiai (CH₄ · 6H₂O; CH₄ · 7H₂O).

Minimali temperatūra, kurioje nevyksta hidratų susidarymas dujose, vadinama **hidratų susidarymo krizine temperatūra**. Metanui (CH₄) tokia temperatūra yra 21,5 °C, etanui (C₂H₆) – 14,5 °C, propanui (C₃H₈) – 5,5 °C.

Faktoriai, kurie skatina hidratų susidarymą:

- Didelis dujų srauto greitis ir jo pulsacija;
- Staigus srauto susiaurėjimas;
- Staigūs dujotiekio posūkiai.

Norint sumažinti dujų hidratų susidarymą, dujos džiovinamos iki rasos taško. Rasos taško temperatūra turi būti mažesnė negu dujų temperatūra.

Pagal bendruosius dujų būsenos dėsnius galima padaryti išvadas, kad degant dujos išyla, o plečiantis – dujos aušta.

2.4 Degančios dujos

Degančios dujos skirstomos: gamtinės dujos ir dirbtinės dujos.

Gamtinės dujos skirstomos:

- Dujos, gaunamos iš dujų gręžinių (sausos dujos ir be sunkiųjų angliavandenių, daugiausiai yra metano);
- Dujos, gaunamos iš naftos gręžinių (sausos dujos benzino, propano ir butano frakcijomis);
- Dujos gaunamos iš kondensatų gręžinių (sausos dujos ir kondensatas);

Į dujinį kurą įeina deganti ir nedeganti dalys. Kuo didesnė deganti kuro dalis, tuo didesnė degimo temperatūra.

Prie degančiųjų dujų priklauso: vandenilis (H_2), metanas (CH_4), anglies monoksidas (CO), azotas (N_2), anglies dioksidas (CO_2), deguonis (O_2), sieros vandenilis (H_2S) ir kt.

Vandenilis (H_2) – bespalvės, bekvapės ir beskonės netoksiškos dujos. Masė 1 m^3 lygi $0,09\text{ kg}$. Vandenilis $14,5$ karto lengvesnis už orą. Degimo šiluma $Q_{\min}=10800\text{ KJ/m}^3$; $Q_{\max}=12750\text{ KJ/m}^3$.

Degimo proceso reakcija:

Sudegus 1 m^3 vandenilio dujų gaunama $2,88\text{ m}^3$ degimo produktų. Vandenilio ir oro mišinys – lengvai užsidegantis.

Metanas (CH₄) – bespalvės, bekvapės ir beskonės netoksiškos dujos. Metano sudėtis: 75 % anglies ir 25% vandenilio. Masė 1 m³ lygi 0,717 kg. Esant atmosferiniam slėgiui ir –162 °C temperatūrai metanas suspaudžiamas ir jo tūris sumažėja 600 kartų. Todėl skystas metanas yra geras ir perspektyvus energijos nešėjas. Degimo šiluma $Q_{\min} = 35880 \text{ kJ/m}^3$; $Q_{\max} = 39820 \text{ kJ/m}^3$. Gamtinėse dujose metano kiekis siekia 98 %. Todėl gamtinių dujų savybės nusako metano savybės.

Ore degimo proceso reakcija:

Sudegant 1 m³ vandenilio dujų gaunama 10,52 m³ degimo produktų.

Be metano, gamtinėse dujose gali būti etano (C₂H₆), propano (C₃H₈), butano (C₄H₁₀) ir kt.

Metano eilės angliavandeniai turi bendrąją formulę: C_nH_{2n+2}, čia n – anglies skaičius (metanui n=1; etanui n=2; propanui n=3).

Metanas (CH₄)

Etanas (C₂H₆)

Propanas (C₃H₈)

Anglies monooksidas (CO) – bespalvės, bekvapės ir beskos stipriai toksiškos dujos. Masė 1 m³ lygi 1,25 kg. Degimo šiluma Q=13250 KJ/m³. Didinant anglies monoksido kiekį mažinant balastą (CO₂+N₂) žymiai padidėja degimo šiluma. Degimo proceso reakcija:

Sudegus 1 m³ CO dujų gaunama 2,88 m³ degimo produktų.

Pastaba:

CO lengvai jungiasi su kraujo hemoglobinu. Ore esant 0,04 % CO, apie 30 % kraujo hemoglobino chemiškai susijungia su CO; 0,1 % CO – 50 %; 0,4 % – 80 %.

Patalpoje, kurioje yra 0,2 % CO, negalima būti ilgiau kaip 1 val. (kenkia sveikatai); esant 0,5 % CO – iki 5 min. (pavojinga gyvybei).

2.5 Suskystintų dujų savybės

Angliavandenilinės dujos sudarytos iš dujinių parafinių anglies vandenilių, tokių kaip metanas, etanas, propanas ir butanas.

Suskystintų dujų tankis nustatomas kaip tankiai skystos fazės ρ_{sk} , prisotintų garų ρ_{pr} ir dujų ρ_d :

$$\rho_{sk} = \frac{M_{sk}}{V_{sk}}; \rho_{pr} = \frac{M_{pr}}{V_{pr}}; \rho_d = \frac{M_d}{V_d}. \quad (2.66)$$

Suskystintų dujų tankį galima nustatyti iš tokios išraiškos:

$$\rho_T = \rho_{T_0} + \alpha(T - T_0) + \beta(T - T_0)^2 + \psi(T - T_0)^3; \quad (2.67)$$

čia α, β, ψ – koeficientai; T_0 – pradinė temperatūra; ρ_{T_0} – tankis, kai temperatūra T_0 .

Techniniuose skaičiavimuose galima taikyti suprastintą suskystintų dujų tankio nustatymo išraišką:

$$\rho_T = \rho_{T_0} + \alpha(T - T_0). \quad (2.68)$$

2.6 lentelėje pateiktos suskystintų dujų tankio reikšmės ρ_{T_0} , kai žinomi parametrai: koeficientas α ir temperatūrų intervalai.

2.6 lentelė. Tankio ρ_{T_0} reikšmės suskystintų anglies vandenilio dujų skaičiavimui, kai $T = 273\text{K}$

Dujos	ρ_{T_0} , kg/m ³	α , kg / (m ³ · K)	Temperatūra, T, K
Etilenas C ₂ H ₄	345,5	3,076	233–280
Propanas C ₃ H ₈	529,7	1,354	205–301
Propilenas C ₃ H ₆	543,5	1,477	233–313
n-Butanas (n = C ₄ H ₁₀)	601,1	1,068	227–331
Izo-Butanas (i = C ₄ H ₁₀)	581,0	1,145	223–289
n-Butilenas (n = C ₄ H ₈)	638,6	1,160	223–289
Izo-Butilenas (i = C ₄ H ₈)	618,1	1,096	203–273
n-Pentanas (n = C ₅ H ₁₂)	645,5	0,950	150–332
Pramoninis propanas	533,8	1,730	273–328
Pramoninis butanas	603,6	1,210	273–328
Anglies vandenilio kondensatas	602,8	1,160	273–328

Suskystintų dujų mišinio tankis lygus:

$$\rho_m = \frac{1}{\frac{x_1}{\rho_1} + \frac{x_2}{\rho_2} + \dots + \frac{x_i}{\rho_i} + \dots + \frac{x_n}{\rho_n}}; \quad (2.69)$$

čia ρ_m – suskystintų dujų mišinio tankis;

$x_1, x_2, \dots, x_n$ – suskystintų dujų komponentų koncentracija;

$\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ – i mišinį įeinančių komponentų tankiai.

Tankio atvirkštinis dydis – lyginamasis tūris. Suskystintų dujų lyginamasis tūris:

$$v_{sk} = \frac{1}{\rho_{sk}} = \frac{V_{sk}}{m_{sk}}; v_{pr} = \frac{1}{\rho_{pr}} = \frac{V_{pr}}{m_{pr}}; v_d = \frac{1}{\rho_d} = \frac{V_d}{m_d}. \quad (2.70)$$

Suskystintų dujų skystoji fazė staigiai padidina savo tūrį padidėjus temperatūrai. Tai reikia įvertinti projektuojant suskystintų dujų talpas. Suskystintų dujų skystos fazės tūris yra lygus:

$$V_{sk2} = V_{sk1} [1 + \beta(T_2 - T_1)]; \quad (2.71)$$

čia V_{sk2} , V_{sk1} – skysčio tūris, kai temperatūra T_2 ir T_1 ; β – tūrinio plėtimosi koeficientas, kuris priklauso nuo temperatūros kitimo ribų (2.7 lentelė):

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_p. \quad (2.72)$$

2.7 lentelė. Angliavandenilinių suskystintų dujų skystos fazės tūrio skaičiavimui naudojamos β reikšmės

Dujos	Temperatūrų pasikeitimo diapazonas, °C	
	Nuo -20 iki +10	Nuo +10 iki +40
Propanas	0,0029	0,00372
Butanas	0,00209	0,0022

Suskystintų dujų spūdumo koeficientas yra lygus:

$$\beta_p = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial p} \right)_T. \quad (2.73)$$

Dydis, atvirkštinis β_p , vadinamas tūriniu tamprumo moduliui:

$$K = \frac{1}{\beta_p} \quad (2.74)$$

Suskystintos dujos žymiai spūdesnės negu kiti skysčiai, todėl šią suskystintų dujų savybę reikia įvertinti skaičiuojant vamzdinius, kuriuose didelis slėgių skirtumas.

Suskystintų dujų dinaminės klampos koeficientą galima nustatyti panaudojant Anrade ir Pančenkovo išraišką:

$$\eta = A \exp\left(\frac{C}{T}\right); \quad (2.75)$$

čia A ir C – koeficientai, kurių reikšmės pateiktos 2.8 lentelėje, T – temperatūra, K.

2.8 lentelė. A ir C reikšmės angliavandenilinių dujų dinaminio klampumo koeficiento η nustatymui

Dujos	$A \cdot 10^5$	C	Reikšmės (Ns / cm^2), kai temperatūra T , K
Etanas (C_2H_4)	1,335	433,2	101,2–228,0
Etilenas (C_2H_4)	1,385	418,3	105,0–273,0
Propanas (C_3H_8)	0,703	777,20	213,0–342,0
Propelenas (C_2H_6)	1,220	574,95	102,6–174,8
n-Butanas ($n = \text{C}_4\text{H}_{10}$)	1,613	689,0	203,0–342,0
Izo-Butanas ($i = \text{C}_4\text{H}_{10}$)	3,351	463,94	203,0–342,0
n-Butilenas ($n = \text{C}_4\text{H}_8$)	2,114	590,0	163,0–233,0
n-Pentanas ($n = \text{C}_5\text{H}_{12}$)	2,151	700,15	153,0–342,0
Izo-Pentanas ($i = \text{C}_5\text{H}_{12}$)	1,229	851,0	273,0–298,0
n-Geksanas ($n = \text{C}_6\text{H}_{12}$)	1,726	841,92	183,0–313,0

Suskystintų dujų dinaminės klampos koeficiento priklausomybė nuo slėgio yra lygi:

$$\mu = a + bp + fp^2; \quad (2.76)$$

čia a , b , f – koeficientai, nustatomi eksperimentiniu būdu.

Kai kurių angliavandenilinių dujų skystos fazės dinaminio klampumo koeficiento η reikšmės, priklausomai nuo temperatūros, pateiktos 2.9 lentelėje.

2.9 lentelė. Kai kurių angliavandenilinių dujų skystos fazės dinaminės klampos koeficiento η priklausomybė nuo temperatūros

Dujos	Reikšmė $\mu \cdot 10^5 \text{ (N} \cdot \text{s / m}^2\text{)}, \text{ kai temperatūra, } ^\circ\text{C}$									
	-40	-20	-10	0	5	15	25	40	50	70
Etanas	9,0	7,8	7,2	6,8	6,6	6,2	6,0	–	–	–
Propanas	20,2	17,1	15,3	13,8	12,6	11,3	10,2	8,6	7,8	6,2
Izo-Butanas	29,0	23,0	21,2	19,2	18,4	16,8	14,9	13,2	11,8	9,9
n-Butanas	30,5	25,5	23,5	21,5	20,5	18,8	17,0	14,8	13,7	11,5
n-Pentanas	37,2	–	–	29,0	27,0	25,0	22,5	19,8	18,0	15,2

Suskystintų dujų mišinio dinaminės klampos koeficientas yra lygus:

$$\frac{1}{\eta_m} = \left(\frac{x_1}{\eta_1} + \frac{x_2}{\eta_2} + \dots + \frac{x_i}{\eta_i} + \dots + \frac{x_n}{\eta_n} \right) \frac{1}{100}; \quad (2.77)$$

čia: $\eta_m, \eta_1, \dots, \eta_n$ – dinaminiai klampos koeficientai;

$x_1, x_2, \dots, x_n$ – komponentų koncentracijos.

Suskystintų dujų šilumos laidumo koeficientas yra lygus:

$$\lambda = 540 C_p \rho V_M^{-1/3}; \quad (2.78)$$

čia C_p – specifinė šiluma, kai pastovus slėgis, kJ/(kg K)

ρ – skysčio tankis, kg/m³; V_M – vieno kilomolio tūris, m³/kmol.

$V_M = \frac{M}{\rho}$; M – kilomolinė masė.

Suskystintų dujų mišinio šilumos laidumo koeficientas yra lygus:

$$\lambda_m = \sum_{i=1}^n x_i \lambda_i; \quad (2.79)$$

čia λ_m – mišinio komponentų šilumos laidumo koeficientas.

3. PAGRINDINIAI HIDRODINAMIKOS DĖSNIAI

3.1 Boilio ir Marioto dėsnis

Boilio ir Marioto dėsnis teigia, kad dujų masės tūris ir jo slėgis yra atvirkščiai proporcingi. Priklausomybė tarp dujų slėgio ir dujų tūrio, kai temperatūra pastovi, išreiškiama tokia priklausomybe:

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{V_1}{V_2}, \quad (3.1)$$

čia V_1, p_1 – tūris ir slėgis iki jų pokyčio; V_2, p_2 – tūris ir slėgis po jų pokyčio.

Iš (3.1) išraiškos gauname: $pV = \text{const}$ prie $T = \text{const}$.

Panaudoję Mendelejevo ir Klapeirono būsenos lygtį, gauname tokias priklausomybes:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\rho_1}{\rho_2}, \quad (3.2)$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{\rho_2}{\rho_1}. \quad (3.3)$$

3.2 Gėjaus ir Liusako dėsnis

Gėjaus ir Liusako dėsnis teigia, kad esant pastoviam slėgiui dujų masės santykinis tūris tiesiog proporcingas temperatūros kitimui. Matematinė priklausomybė tarp dujų tūrio ir temperatūros esant pastoviam slėgiui turi tokį pavidalą:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}. \quad (3.4)$$

Iš eksperimentinių tyrimų nustatyta, kad pakėlus dujų temperatūrą vienu laipsniu (Kelvinu), esant pastoviam slėgiui, dujų tūris

padidėja pastoviu dydžiu, kuris lygus $\frac{1}{273,2} \approx 0.0036603$, nuo pradi-

nio tūrio. Šis dydis vadinamas *terminiu tūriniu plėtimosi koeficientu*

ir žymimas $\alpha = \frac{1}{273,2} \frac{1}{K}$. Tada Gėjaus ir Liusako dėsnį galime užrašyti:

$$V_T = V_0(1 + \alpha T), \text{ kai } [T] = \text{laipsniai} \quad (3.5a)$$

$$V_T = V_0\left(\frac{T}{273}\right), \text{ kai } [T] = K. \quad (3.5b)$$

3.3 Šarlio dėsnis

Šarlio dėsnis teigia, kad duotos dujų masės slėgis, esant pastoviam dujų tūriui, tiesiog proporcingas absoliučiai temperatūrai. Dujų masės slėgių santykis yra lygus absoliučių temperatūrų santykiui:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad (3.6)$$

čia p_1 ir p_2 – absoliutūs slėgiai; T_1 ir T_2 – absoliučios temperatūros, K.

1 pavyzdys. Kai temperatūra $T = 300$ K, dujų slėgis $p = 4$ MPa. Kiek padidės slėgis, kai temperatūra pakils iki $T = 320$ K?

Sprendimas: Pagal (3.6) formulę gauname:

$$p_2 = \frac{T_2}{T_1} p_1 = \frac{320}{300} \cdot (4 + 0,1) = 4,37 \text{ MPa.}$$

Todėl padidinus dujų temperatūrą nuo 300 K iki 320 K, slėgis padidės $\Delta p = 4,37 - 0,10 = 4,27$ MPa.

2 pavyzdys. Talpoje suspaustų dujų temperatūra $T = 280$ K, o perteklinis slėgis $p = 0,9$ MPa. Pakaitinus dujas, slėgis padidėjo iki $p = 1,1$ MPa. Iki kokios temperatūros buvo pakaitintos dujos?

Sprendimas: Pagal (3.6) formulę gauname:

$$T_2 = \frac{p_2}{p_1} T_1 = \frac{(0,1+1,1)}{(0,1+0,9)} \cdot (280) = 336 \text{ K}.$$

3.4 Van der Valso lygtis

Realiosioms dujoms Van der Valso lygtis turi tokį pavidalą:

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT; \quad (3.7)$$

čia a , b – dujų konstantos, kurių reikšmės konkrečioms dujoms pateiktos 3.1 lentelėje.

Konstanta a charakterizuoja dujų molekulių traukos jėgas; konstanta b charakterizuoja laisvojo tūrio, kuriame juda molekulės, mažėjimą.

Iš Van der Valso lygties galima gauti parametrų p , T , v krizines reikšmes:

$$p_k = \frac{a}{2b^2}; v_k = 3b; T_k = \frac{8a}{27bR}. \quad (3.8)$$

Jeigu žinomos parametrų p , T , v krizinės reikšmės, galima surasti Van der Valso lygties koeficientus a , b ir dujų konstantą R :

$$b = \frac{v_k}{3}; a = 3p_k v_k^2; R = \frac{8}{3} \frac{p_k v_k}{T_k}. \quad (3.9)$$

Jeigu gautas konstantas a , b ir R įstatysime į (3.7) lygtį, tai gausime apibendrintą Van der Valso lygtį:

$$\left(\pi + 3 / \varphi^2\right)(3\varphi - 1) = 8\tau; \quad (3.10)$$

$$\text{čia } \pi = \frac{p}{p_k}; \varphi = \frac{v}{v_k}; \tau = \frac{T}{T_k}.$$

3.1 lentelė. Tam tikrų dujų Van der Valso lygties koeficientų reikšmės

Dujos	$a, \frac{\text{MPa} \cdot \text{litras}}{\text{mol}}$	$b, \frac{\text{litras}}{\text{mol}}$
Azotas	0,1390	0,03913
Argonas	0,1345	0,322
Amoniakas	0,4170	0,0371
Acitilenas	0,4390	0,05136
n-Butanas	1,447	0,1226
Vandenilis	0,0244	0,0266
Vandens garai	0,5464	0,0305
Oras	0,1338	0,03634
Helis	0,003412	0,0237
Sieros dvideginis	0,6714	0,0563
Azoto dioksidas	0,5284	0,0443
Deguonis	0,1360	0,0318
Kriptonas	0,2318	0,0398
Ksenonas	0,4194	0,0510
Metanas	0,2253	0,0428
Neonas	0,0211	0,0171
Anglies oksidas	0,1485	0,0399
Azoto oksidas	0,1340	0,0278
Propanas	0,8664	0,0844
Propilenas	0,838	0,0830
Sieros vandenilis	0,4431	0,0428
Ozonas	0,2217	0,0299
Anglies dioksidas	0,3592	0,0429
Chloras	0,6493	0,0562
Ftoras	0,1179	0,0261
Etanas	0,5489	0,0638
Etilenas	0,447	0,0571

3.5 Džaulio ir Tomsono dėsnis

Droseliavimu vadinama dujų ar skysčių sumažinto slėgio tėkmė, kai teka vietine šaltinio varža (vožtuvas, čiaupas ir kt.) nesant šilumos mainų su išorine aplinka ir tėkmė neatlieka mechaninio darbo.

Droseliuojant dujų srautą, srauto energijos kiekis iki ir po vietinės varžos yra lygus:

$$(u_1 + p_1 v_1) + \frac{w_1^2}{2} = (u_2 + p_2 v_2) + \frac{w_2^2}{2}, \quad (3.11a)$$

arba

$$h_1 - h_2 = \frac{w_2^2}{2} - \frac{w_1^2}{2}; \quad (3.11b)$$

čia u_1, u_2 – lyginamoji vidinė energija prieš ir po vietinės varžos; w_1, w_2 – tekėjimo greitis prieš ir po vietinės varžos; u_1, u_2 – lyginamoji entalpija prieš ir po vietinės varžos.

Beveik visuose praktiniuose uždaviniuose srauto kinetinė energija mažai pakinta, tada

$$h_1 = h_2.$$

Droseliavimo procese prarandama energija – mechaninis $\int_1^2 v dp$,

kurio ekvivalentinis dydis dėl trinties ir atsirandančio turbulentiškumo virsta šiluma.

Kai dujos yra idealios, $h = \text{const}$ sutampa su izoterminiu, tada entropijos pokytis yra teigiamas:

$$\Delta s_{2-1} = \int_1^2 \frac{dq}{T} = - \int_1^2 \frac{v}{T} dp = -R \int_1^2 \frac{dp}{p} = R \ln \frac{p_1}{p_2} > 0.$$

Droseliavimo metu prarasta energija yra lygi $d = T_0 \Delta s_{2-1} = \Delta e_{1-2}$.

Kadangi droseliavimo metu entalpija $h_1 = h_2 = \text{const}$, tai idealių dujų temperatūra nepakinta. Dideliuose slėgių ir temperatūrų intervaluose droseliuojamos realiosios dujos keičia temperatūrą.

Toks efektas, kai droseliavimo metu keičiasi temperatūra, vadinamas Džaulio ir Tomsono efektu. Džaulio ir Tomsono efektas skirstomas į diferencialinį ir integralinį.

Diferencialinis efektas išreiškiamas be galo mažų temperatūros ir slėgio pokyčių santykiu, kai entalpija yra pastovi:

$$\alpha_h = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h. \quad (3.12)$$

Praktiškai diferencialiniu efektu laikoma, kai pakinta temperatūra pakitus slėgiui 0,1 MPa. Oro, esant normaliai temperatūrai, apytiksliai $\alpha_h = 1/4$.

Efektas esant dideliems slėgio pokyčiams vadinamas integraliniu efektu:

$$T_2 - T_1 = \int_{p_1}^{p_2} \alpha_h dp = \int_{p_1}^{p_2} \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h dp \quad (3.13a)$$

arba

$$T_2 - T_1 = \sum \alpha_h \Delta p = \alpha_{h,m} \Delta p_{\text{bendr}}; \quad (3.13b)$$

čia $\alpha_{h,m}$ – vidutinis temperatūros pokytis, pakitus slėgiui 0,1 MPa slėgių intervale Δp_{bendr} .

Droseliavimo proceso entalpijos diferencialinė lygtis kintant slėgiui ir temperatūrai yra lygi:

$$\left. \begin{aligned} c_p dT - \left[T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right] dp &= 0 \\ \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h = \alpha_h &= \frac{T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v}{c_p} \end{aligned} \right\}. \quad (3.14)$$

Kai dujos idealios, tada $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = v$ ir $\alpha_h = 0$.

Realųjų dujų iš Van der Valso dujų būsenos lygties

$$\alpha_h = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h = -\frac{1}{8} \frac{k_0 - 1}{k_0} \frac{T_k}{p_k} \cdot \frac{\tau - \frac{3}{4}(3 - 1/\varphi)^2}{\tau - (1/4\varphi)(3 - 1/\varphi)^2}, \quad (3.15)$$

čia $k_0 = \frac{C_p}{C_v}$; τ – temperatūra; φ – tūris.

Nagrinėjant kriogenines sistemas ypatingą reikšmę turi terminis droseliavimo efektas α_T , kuris išreiškiamas suspaustų ir išsiplėtusių dujų entalpijos skirtumu, esant tai pačiai droseliavimo pradžios temperatūrai. Sulyginę (3.14) su entalpijos pokyčiu esant pastoviai temperatūrai

$$\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = -\left[T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v\right], \quad (3.16)$$

gauname

$$\alpha_T = \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v = \alpha_h C_p. \quad (3.17)$$

Tos pačios dujos turi skirtingą pagal ženklą Džaulio ir Tomsono efektą: teigiamas (atšalimas) esant vienai temperatūrai; neigiamas (šilimas) esant kitai temperatūrai. Temperatūra, kurioje vyksta efekto ženklo kitimas $\alpha_h = 0$, vadinama inversine temperatūra. Iš (3.14) plaukia, kad esant inversinei temperatūrai galioja šios nelygybės:

1. $T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p > v$, tai $\alpha_h > 0$ – teigiamas efektas (atšalimas);
2. $T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p < v$, tai $\alpha_h < 0$ – neigiamas efektas (šilimas);

3. $T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = v$, tai $\alpha_h = 0$ – teigiamas efektas (nulinis efektas).

Naudojant Van der Valso lygtį galima rasti $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)$. Įstatę ją į (3.14)

lygybės, gauname:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h = \frac{\left(\frac{2a}{RT}\right)\left(1 - \frac{b}{v}\right)^2 - b}{c_p \left[1 - \left(\frac{2a}{v}\right)\left(1 - \frac{b}{v}\right)^2\right]}. \quad (3.18)$$

Mažo tankio dujų, kai v reikšmės didelės, ši lygybė gali būti supaprastinta:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h = \frac{1}{c_p} \left(\frac{2a}{RT} - b\right). \quad (3.19)$$

Iš (3.18) ir (3.19) išraiškų gauname inversinių temperatūrų priklausomybę ($\alpha_h = 0$):

$$T_{in} = \frac{2a}{Rb} \left(1 - \frac{b}{v}\right)^2. \quad (3.20)$$

Inversijos kreivės lygybę galima užrašyti koordinatėmis τ ir π :

$$\pi = 24\sqrt{3}\tau - 12\tau - 27 \text{ arba } \tau = \left(1 \pm \frac{1}{6}\sqrt{9\pi}\right)^2.$$

3.2 lentelė. Maksimalios Džaulio ir Tomsono diferencialinio efekto inversijų temperatūrų reikšmės, kai ($p \rightarrow 0$).

Dujos	$T_{in \max}, K$
Azotas	604
Argonas	765
Vandenilis	204
Oras	650
Helis-3	39

3.2 lentelės pabaiga

Dujos	$T_{\text{in max}}, \text{K}$
Helis-4	46
Deuteris	209–220
Degūnis	771
Kriptonas	1079
Ksenonas	1476
Metanas	953
Neonas	230
Vandenilio oksidas	644

Fizikinė Džaulio ir Tomsono efekto esmė

Izoterminiam droseliavimo efekto atveju lygtis (3.14) ir (3.15) galima užrašyti tokiu pavidalu:

$$dh_T = c_p dT = \left[T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v \right] dp \quad (3.21a)$$

arba

$$\Delta h_T = c_{pm} (T_1 - T_2) = \int_{p_1}^{p_2} T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp - \int_{p_1}^{p_2} v dp. \quad (3.21b)$$

Lygties (3.21b) dešinę lygybės pusę galima užrašyti tokiu pavidalu:

$$\begin{aligned} c_{pm} (T_1 - T_2) = \int_{v_2}^{v_1} -T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv + \int_{v_2}^{v_1} p dv - p_2 v_2 + p_1 v_1 = \\ \int_{v_2}^{v_1} - \left[T \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v + p \right] dv - p_2 v_2 + p_1 v_1 \end{aligned} \quad (3.22)$$

Iš Van der Valso lygties

$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT \quad (3.23)$$

išreiškiamo slėgį

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2}.$$

Istatę į (3.22) išraišką ir suintegravę gauname:

$$\Delta h_T = c_{pm} (T_1 - T_2) = \left(\frac{a}{v_1} - \frac{a}{v_2} \right) + p_1 v_1 - p_2 v_2. \quad (3.24)$$

Iš lygties (3.24) matyti, kad Džaulio ir Tomsono efektas apibūdina:

1. darbą, kurį atlieka dujų srautas iki ir po išsiplėtimo $(p_1 v_1 - p_2 v_2)$
2. darbą, kurį atlieka atskirų dujų molekulių traukos ir atostūmio jėgos. Pagal Van der Valsą šis darbas nustatomas kaip $\left(\frac{a}{v_1} - \frac{a}{v_2} \right)$.

Didėjant dujų tūriui, atstumas tarp molekulių didėja ir šiuo atveju atliekamas mechaninis darbas.

Džaulio ir Tomsono efektas α_h droseliuojant priklauso nuo dviejų mechaninių darbų: 1) darbas, kuris priklauso nuo p_v pasikeitimų, (α_{pv}) ir 2) darbas, kurį atlieka molekulių traukos ir atostūmio jėgos, α_u , todėl Džaulio ir Tomsono efektą galima užrašyti:

$$\alpha_h = \alpha_{pv} + \alpha_u. \quad (3.25)$$

Dauguma atvejų α_{pv} yra neigamas dydis, todėl $\alpha_h < \alpha_u$. Tačiau absoliutus dydis α_{pv} yra mažas (10–15 % α_u reikšmės).

3.6 Skyčių ir dujų judėjimo lygčių sistema

Skysčių judėjimą tiksliausiai aprašo **Navjė** ir **Stokso** lygčių sistema. Klampių ir spūdzių skysčių **Navjė** ir **Stokso** lygčių sistema turi tokį pavidalą:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} &= a_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{v}{3} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} + v \nabla V_x; \\ \frac{dV_y}{dt} &= a_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{v}{3} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} + v \nabla V_y; \\ \frac{dV_z}{dt} &= a_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{v}{3} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} + v \nabla V_z. \end{aligned} \right\} \quad (3.26)$$

čia V_x, V_y, V_z – greičio vektoriaus projekcijos į X, Y, Z ašis; t – laikas; a_x, a_y, a_z – pagreičio vektoriaus projekcijos į X, Y, Z ašis; x, y, z – Dekarto koordinatų sistema; ρ – skysčio tankis; p – skysčio slėgis; v – kinematinė klampa.

$$\theta = \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = \text{div}\{V\} \quad - \text{pagreičio vektoriaus } \{V\}$$

divergencija;

$$\nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} - \text{Laplaso operatorius.}$$

Navjė ir Stokso lygčių sistemoje pagreičius $\frac{\partial V_x}{dt}, \frac{\partial V_y}{dt}, \frac{\partial V_z}{dt}$ galima užrašyti taip:

$$\begin{aligned} \frac{\partial V_x}{dt} &= \frac{\partial V_x}{dt} + \frac{\partial V_x}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial V_x}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dt} + \frac{\partial V_x}{\partial z} \cdot \frac{dz}{dt} = \\ &= \frac{\partial V_x}{dt} + \frac{\partial V_x}{\partial x} V_x + \frac{\partial V_x}{\partial y} V_y + \frac{\partial V_x}{\partial z} V_z \end{aligned} \quad (3.27)$$

Kadangi greičių vektorius $\{V\} = \{V(x, y, z, t)\}$ yra sudėtinė funk-

cija, analogiškai galima užrašyti ir pagreičius: $\frac{\partial V_y}{dt}, \frac{\partial V_z}{dt}$. Pagreičiais

$\frac{\partial V_x}{\partial t}, \frac{\partial V_y}{\partial t}, \frac{\partial V_z}{\partial t}$ įvertinamas hidrostatinio slėgio poveikis skysčio srautui.

Nagrinėjant dujas šių pagreičių galima neįvertinti.

Dydžiai $-\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x}, -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y}, -\frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z}$ įvertina slėgio dinamines jėgas.

Dydžiai $v \nabla V_x + \frac{v}{3} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x}; v \nabla V_y + \frac{v}{3} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y}; v \nabla V_z + \frac{v}{3} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z}$ įvertina skysčių klampos įtaką. Klampiam ir nespūdžiam skysčiui

$$\rho = \text{const ir } \text{div}\{V\} = \theta = 0, \quad (3.28)$$

$$\text{t. y.} \quad \frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0 \quad (3.29)$$

ir (3.26) lygčių sistemoje

$$\frac{v}{3} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial x} = 0; \quad \frac{v}{3} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial y} = 0; \quad \frac{v}{3} \cdot \frac{\partial \theta}{\partial z} = 0. \quad (3.30)$$

Įvertinus (3.30) išraiškas, **Navjė** ir **Stokso** lygčių sistema bus lygi:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dV_x}{dt} &= a_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + v \Delta V_x; \\ \frac{dV_y}{dt} &= a_y - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} + v \Delta V_y; \\ \frac{dV_z}{dt} &= a_z - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} + v \Delta V_z. \end{aligned} \right\} \quad (3.31)$$

Nagrinėjant fluideo tekėjimą vamzdyje, t. y. nagrinėjant vienmatį skysčio judėjimą, greičio vektoriaus $\{V\}$ projekcijos į y ir z ašis lygios nuliui. Pagreičiai a_y, a_z irgi bus lygūs nuliui. Tada (3.31) lygčių sistema bus lygi:

$$\frac{dV_x}{dt} = a_x - \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} + v \Delta V_x. \quad (3.32)$$

[vertinę (3.27) išraišką, gauname

$$\frac{dV_x}{dt} = \frac{\partial V_x}{\partial t} + \frac{\partial V_x}{\partial x} V_x \quad (3.33)$$

ir

$$\nabla V_x = \frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2}. \quad (3.34)$$

čia $a_x = -\frac{\gamma}{\rho} \sin \alpha$, α – kampas tarp X ašies ir horizontalios plokštumos.

Tada (3.32) lygtis bus lygi:

$$\rho \left(\frac{\partial V_x}{\partial t} + \frac{\partial V_x}{\partial x} V_x \right) = -\gamma \sin \alpha - \frac{\partial p}{\partial x} + v \rho \Delta V_x$$

arba

$$\rho \frac{\partial V_x}{\partial t} = -\gamma \sin \alpha + v \rho \nabla V_x - \rho \frac{\partial V_x}{\partial x} V_x - \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (3.35)$$

Vientisos terpės (fluido) judėjimą charakterizuoja fluido vientisumo lygtis, kuri bendruoju atveju yra lygi:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho V_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho V_z)}{\partial z} = 0. \quad (3.36)$$

Esant vienmačiam judėjimui, (3.36) lygtis yra lygi:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} = 0. \quad (3.37)$$

Ryšys tarp dujų slėgio ir tankio yra lygus:

$$\frac{dp}{d\rho} = c^2, \quad (3.38)$$

čia c – garso greitis skystyje.

Išskleidus slėgio pilnąją išvestinę pagal tankį, gaunama tokia (3.38) išraiška:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} dt + \frac{\partial \rho}{\partial x} dx = \frac{1}{c^2} \left(\frac{\partial p}{\partial t} dt + \frac{\partial p}{\partial x} dx \right). \quad (3.39)$$

Esant bet kokioms dt ir dx reikšmėms turi galioti tokia išraiška:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial c}{\partial t}. \quad (3.40)$$

Tada (3.37) lygtis turi tokį pavidalą:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\partial (\rho V_x)}{\partial x}. \quad (3.41)$$

Grįžkime prie (3.35) lygties ir panagrinėkime jos nari:

$$\nu \rho \Delta V_x = \nu \rho \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right),$$

kuris įvertina slėgio nuostolius išilgai vamzdyno dėl trinties jėgų tarp skysčio sluoksnių.

Esant nusistovėjusiam tekėjimui iš (3.35) gauname:

$$\nu \rho \Delta V_x = \nu \rho \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial p}{\partial x} + \rho \frac{\partial V_x}{\partial x} V_x, \quad (3.42)$$

o srauto vientisumo lygtis (3.36) tada turi tokį pavidalą:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} = 0. \quad (3.43)$$

Įvertinus (3.43) lygtį, (3.42) lygtis turės tokį pavidalą:

$$\nu p \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) = \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (3.44)$$

Kadangi (3.44) lygties kairės pusės nariai priklauso tik nuo y ir z , o dešinės pusės tik nuo x , tai tokia lygybė galima tik tada, kai:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \text{const.}$$

Sakykime, kad

$$\frac{\partial p}{\partial x} = -\frac{\delta p}{L}, \quad (3.45)$$

čia δp – slėgio skirtumas vamzdyno ruože, kurio ilgis yra L . Tuomet

$$\nu p \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) = -\frac{\delta P}{L}. \quad (3.46)$$

Lygties (3.46) sprendinys, esant kraštinei sąlygai $V_x = 0$, kai $r = \sqrt{y^2 + z^2}$, yra Puazelio formulė:

$$V_x = \frac{\delta p}{4\mu L} \left[\left(\frac{d}{2} \right)^2 - r^2 \right], \quad (3.47)$$

čia d – vamzdyno skersmuo; μ – dinaminė klampa, $\mu = \rho \nu$.

Jeigu įvestume vidutinį tekėjimo greitį V , esant paraboliniam greičio pasiskirstymui vamzdyno skerspjūvyje,

$$V = \frac{V_x \max}{2}.$$

Tada iš (3.47) išraiškos, kai $V_x = \max$, kai $r = 0$ (nagrinėjamas taškas ant vamzdyno išilginės ašies), gauname

$$2V = \frac{\delta P}{4\mu L} \cdot \frac{d^2}{4},$$

arba

$$\delta p = \frac{32\mu}{d} \cdot \frac{L}{d} V. \quad (3.48)$$

Padauginę (3.48) išraiškos skaitiklį ir vardiklį iš ρV , gauname:

$$\delta p = \frac{64}{\frac{dV\rho}{\mu}} \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho V^2}{2}. \quad (3.49)$$

Dydis $\frac{dV\rho}{\mu} = \frac{Vd}{\frac{\mu}{\rho}}$ yra Reinoldso skaičius. Tokiu būdu

$$\delta p = \frac{64}{\text{Re}} \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{\rho V^2}{2}. \quad (3.50)$$

Tūrinis fluído našumas yra lygus:

$$Q = \int_0^{\frac{d}{2}} V_x 2\pi r dr. \quad (3.51)$$

Įstatę (3.47) išraišką į (3.51), gauname:

$$Q = \frac{\pi d^4}{128\mu L} \delta p. \quad (3.52)$$

Formulės (3.50) ir (3.52) gerai žinomos, jos charakterizuoja laminarinį tekėjimą droselyje.

Panaudojant (3.48), (3.46) lygtis turės tokį pavidalą:

$$\nu \rho \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) = - \frac{32\mu}{d^2} V. \quad (3.53)$$

Lygties (3.53) dešinė pusė gali būti užrašyta taip:

$$\frac{32\mu}{d^2} V = \frac{32\mu \frac{\pi}{4}}{\frac{\pi d^2}{4}} \cdot \frac{VS}{S} = \frac{8\pi\mu}{S^2} (VS), \quad (3.54)$$

čia S – vamzdyno skerspjūvio plotas.

Kadangi dydis SV yra tūrinis našumas, tai (3.53) lygtis turės tokį pavidalą:

$$\nu \rho \left(\frac{\partial^2 V_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V_x}{\partial z^2} \right) = - \frac{8\pi\mu}{S^2} Q. \quad (3.55)$$

Taigi gautos dvi fluído judėjimo lygtys: (3.35) judėjimo lygtis, kuri gauta iš Navjė ir Stokso lygčių sistemos, ir fluído srauto vientisumo lygtis (3.36):

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial t} + \frac{8\pi\mu}{S^2} Q + \gamma \sin \alpha + \rho \frac{\partial V_x}{\partial x} V_x \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} &= \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho V_x)}{\partial x} \end{aligned} \right\}. \quad (3.56)$$

Lygčių sistemoje (3.56) greitį V_x galima pakeisti vidutiniu greičiu V . Naši $\rho \frac{\partial V}{\partial x} V_x$ galima užrašyti tokiu pavidalu:

$$\rho \frac{\partial V}{\partial x} V_x = \frac{\partial}{\partial x} [(1 + \beta) \rho V^2],$$

o vidutinį greitį
$$V - V = \frac{1}{\frac{\pi d^2}{4}} \int_0^{d/2} 2\pi r v dr;$$

β – Kariolio pataisa, įvertinanti netolygų greičio pasiskirstymą skerspjūvyje; esant turbulentiniam tekėjimui $\beta = 0,020 - 0,030$, nusi-stovėjusio turbulentinio režimo $\beta = 0$. Nenusistovėjusio režimo β yra kintamas dydis.

Lygčių sistema (3.56) tada lygi:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \frac{\lambda}{8\delta} \rho V^2 + \gamma \sin \alpha + \frac{\partial}{\partial x} [(1+\beta)] \rho V^2 \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} &= \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho V)}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (3.57a)$$

arba

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial p}{\partial x} &= \frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \frac{\lambda}{2d} \rho V^2 + \gamma \sin \alpha + \frac{\partial}{\partial x} [(1+\beta)] \rho V^2 \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} &= \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial p}{\partial t} = -\frac{\partial(\rho V)}{\partial x} \end{aligned} \right\}; \quad (3.57b)$$

čia $\lambda = \frac{64}{\text{Re}} = \frac{64}{\frac{d\rho V}{\mu}}$ – pasipriešinimo koeficientas, įvertinantis slėgio

nuostolius dėl trinties (dydis $\lambda = \frac{64}{\text{Re}}$ įvertina slėgio nuostolius esant la-

minariniam tekėjimui); $\delta = \frac{f}{\chi}$ – hidraulinis spindulys, $\delta = \frac{\frac{\pi d^2}{4}}{\pi d} = \frac{d}{4}$;

χ – šlapias perimetras ($\chi = \pi d$).

Lygčių sistema (3.57) yra pagrindinė lygčių sistema nagrinėti per-
einamuosius procesus vamzdynuose. Ši sistema yra netiesinė pirmojo
laipsnio diferencialinių lygčių hiperbolinio tipo sistema.

Lygčių sistemą (3.57) galima užrašyti taip:

$$\left. \begin{aligned} A &= B + D + E + F \\ K &= M \end{aligned} \right\}; \quad (3.58)$$

$$\left. \begin{aligned} A &= -\frac{\partial P}{\partial x}; \quad B = \frac{\partial(\rho V)}{\partial t}; \\ D &= \frac{\lambda}{2d} \rho V^2; \quad E = \gamma \sin \alpha; \\ F &= \frac{\partial}{\partial x} \left[(1 + \beta) \rho V^2 \right]; \\ K &= \frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial p}{\partial t}; \quad M = -\frac{\partial(\rho V)}{\partial x} \end{aligned} \right\} \quad (3.59)$$

čia

Šių dydžių fizikinė prasmė: dydis $A = -\frac{\partial P}{\partial x}$ – nustato slėgį nenusistovėjusiam režime vamzdinio skerspjuvyje;
 dydis $B = \frac{\partial(\rho V)}{\partial t}$ – nustato slėgio kitimą nenusistovėjusiam režime veikiant inercijos jėgoms, nusistovėjusiam režime $B = 0$;

dydis $D = \frac{\lambda}{2d} \rho V^2$ – nustato slėgio nuostolius dėl trinties jėgų;

dydis D – netiesinis narys. Kartais dydis D linearizuojamas, priimamas, kad $\frac{\lambda V}{2d} = \text{const}$ lygus vidutinei reikšmei išilgai vamzdinio ir laike:

$$\frac{\lambda V}{2d} = \frac{\lambda V}{8\delta} \approx \left(\frac{\lambda V}{8\delta} \right)_{\text{vid}} = 2a = \text{const} \quad (3.60)$$

Laminariniam tekėjimui:

$$\frac{\lambda V}{2d} = \frac{\lambda V}{8\delta} = \frac{\frac{64\mu}{d} V}{8 \frac{d}{4}} = \frac{32\mu}{d^2} = 2a \quad (3.61)$$

Kai $a = 0$, tada $D = 0$.

Funkcija yra lygi $\frac{\lambda V^2}{8\delta} \cong 2a_1 V + a_0$;

čia $\delta = d / 4$; $2a_1 = \frac{\lambda}{12\delta}(V_0 + V_1) = \frac{\lambda}{3d}(V_0 + V_1)$;

$$a_0 = \frac{\lambda V_0^2}{8\delta} - 2a_1 V_0 = \frac{\lambda V_0^2}{8\delta} - \frac{\lambda V_0}{12\delta}(V_0 + V_1) = \frac{\lambda V_0^2}{2d} - \frac{\lambda V_0}{3d}(V_0 + V_1)$$

Arba $a_0 = -\frac{\lambda V_0}{24\delta}(V_0 + V_1) = -\frac{\lambda V_0}{6d}(V_0 + V_1)$, V_0, V_1 apatinis ir vir-

šutinis greičio ribos, $V \in [V_0, V_1]$.

Dydis $E = \gamma \sin \alpha$, kai $\rho = \text{const}$, $\gamma = \text{const}$ yra hidrostatinis slėgis; α – kampas tarp vamzdžio ašies ir horizontalios plokštumos; kai $\alpha = \frac{\pi}{2}$, tai $E_{\max} = \gamma$. Esant dujoms, paduodant dujų slėgį į vertikalų

vamzdį iš apačios, slėgio nuostoliai, kai vamzdžio ilgis $L = 1 \text{ m}$, slėgio nuostoliai lygūs $\Delta p = 12.2 \text{ N / m}^2$, todėl dujoms dydis E dažniausiai neivertinamas.

3.7 Vamzdynų hidrodinaminių procesų matematinis modeliavimas sutelktųjų parametrų metodu

Vamzdynų sistemos susideda iš įvairių hidraulinių sistemų elementų, tokių kaip: siurbiai, vožtuvai, vamzdžiai, purkštukai, papildomos talpos, komunalinis vandentiekio tinklas ir kitų elementų. Hidrodinaminių procesų matematiniam modeliavimui taikomi du pagrindiniai metodai: *sutelktųjų parametrų metodas ir vientisos terpės metodas*. Sutelktųjų parametrų metodas yra metodas, kai hidrodinaminė sistema suskaidoma į skirtingus tūrius, kuriuose slėgis ir temperatūra kinta tik laike, t. y. visuose tūrio taškuose slėgis ir temperatūra laike kinta vienodai. Slėgio ir temperatūros kitimas tūryje aprašomi

paprastomis netiesinėmis diferencialinėmis lygtimis. Vientisos terpės metodas yra, kai skysčio arba dujų judėjimas aprašomas diferencialinėmis lygtimis su dalinėmis išvestinėmis (Navjė ir Stokso lygčių sistema). Vientisos terpės metodas taikomas nagrinėti lokalius skysčio tekėjimus tam tikroje hidrodinaminės sistemos dalyje. Vientisos terpės metodas yra tiksliausias metodas tirti hidrodinامينius procesus. Šio metodo trūkumas – didelis lygčių skaičius, ilgas sprendimo laikas. Racionaliausias didelių hidraulinių sistemų modeliavimo metodas yra sutelktųjų parametrų metodas, arba jungtinis metodas, kuris sujungia sutelktųjų parametrų ir vientisos terpės metodus.

Sutelktųjų parametrų metodas. Modeliuojant skysčio tekėjimą vamzdyno sistemoje, hidraulinė sistema suskaidoma į skirtingus tūrius, kuriuose norima žinoti slėgio ir/ar temperatūros kitimus laike. Tarkime, turime hidraulinę sistemą, kuri parodyta 3.1 pav. a, ir ją suskaidome į charakteringus tūrius (ertmes) (3.1 pav. b).

a)

b)

c)

3.1 pav. Hidraulinės sistemos ir jos modeliai:

a – pradinė hidraulinė sistema; **b** – hidraulinės sistemos charakteringų tūrių schema; **c** – technologinio vamzdyno elementų ir mazgų schema

Panagrinėsime neizoterminį nestacionarų hidrodinaminį procesą (3.2 pav.).

3.2 pav. Vamzdyno mazge pagrindinių parametų skaičiavimo schema

Tūryje V_i slėgio kitimas laike aprašomas lygtimi:

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{K}{\rho V_i} \left(\sum_{k=1}^{N_{in}} G_{in,i,k} - \sum_{j=1}^{N_{out}} G_{out,i,j} - G_{in,i} \right), \quad (3.62a)$$

arba

$$\frac{dp_i}{dt} = \frac{K}{V_i} \left(\sum_{k=1}^{N_{in}} Q_{in,i,k} - \sum_{j=1}^{N_{out}} Q_{out,i,j} - Q_{out,i} \right) \quad (3.62b)$$

čia p_i – slėgis, Pa; K – skysčio tūrinis tamprumo modulis, Pa; ρ – skysčio tankis, kg/m³; $G_{in,i,k}$, $Q_{in,i,k}$ – skysčio, įtekančio k -ąja magistrale į i -ąjį tūrį, masės ir tūrio debitai, kg/s, m³/s atitinkamai; $G_{out,i,j}$, $Q_{out,i,j}$ – skysčio, ištekančio j -ąja magistrale iš i -ojo tūrio, masės ir tūrio debitai, atitinkamai; $G_{in,i}$, $Q_{out,i}$ – skysčio nuostolių masės ir tūrio debitai; N_{in} ir N_{out} – įtekančių ir ištekančių į i -ąjį tūrį magistralių skaičius.

Tūryje V_i temperatūros kitimas laike aprašomas lygtimi:

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{\rho V_i} \left(\sum_{k=1}^{N_{in}} G_{in,i,k} T_{in,k} - \sum_{j=1}^{N_{out}} G_{out,j} T_i \right) - \frac{1}{\rho V_i} \left(\frac{S_{vi}}{C_p} h_i(T_i, T_\infty) \right) (T_i - T_\infty), \quad (3.63a)$$

arba

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{V_i} \left(\sum_{k=1}^{N_{in}} Q_{in,i,k} T_{in,k} - \sum_{j=1}^{N_{out}} Q_{out,i,j} T_i \right) - \left(\frac{S_{vi}}{\rho V_i C_p} h_i(T_i - T_\infty) \right) (T_i - T_\infty); \quad (3.63b)$$

čia T_i – skysčio temperatūra i-ajame tūryje; $T_{in,k}$ – skysčio, įtekančio į i-ąjį tūrį, temperatūra; C_p – specifinė šiluma, J/(kg K); S_{vi} – vamzdžio paviršiaus plotas, m²; $h_i(T_i, T_\infty)$ – šilumos atidavimo koeficientas, W/(m² K); T_∞ – aplinkos temperatūra, K.

Skysčio srauto masės debito tarp tūrių V_i ir V_{i+1} kitimas:

$$\frac{dG_{out,i,i+1}}{dt} = \frac{1}{b_{i,i+1}} \left[p_i - p_{i+1} - \frac{1}{2\rho S_{i,i+1}^2} \xi_{i,i+1} G_{out,i,i+1}^2 \text{sign}(G_{out,i,i+1}) \right] \quad (3.64a)$$

arba

$$\frac{dQ_{out,i,i+1}}{dt} = \frac{1}{\rho b_i} \left[p_i - p_{i+1} - \rho \xi_{i,i+1} Q_{out,i,i+1}^2 \text{sign}(Q_{out,i,i+1}) \right]; \quad (3.64b)$$

čia $b_{i,i+1} = \frac{L_{i,i+1}}{S_{i,i+1}}$; $L_{i,i+1}$, $S_{i,i+1}$ – vamzdžio, esančio tarp tūrių V_i ir V_{i+1} ,

ilgis skerspjūvio plotas, atitinkamai; $\xi_{i,i+1}$ – hidraulinių nuostolių koeficientas.

Hidraulinius nuostolius sudaro skysčio transportavimo ir vietiniai nuostoliai. Hidraulinių nuostolių koeficientas yra lygus:

$$\xi_{i,i+1} = \xi_{tr,i,i+1} + \xi_{viet,i,i+1}; \quad (3.65)$$

$$\text{čia } \xi_{tr,i,i+1} = \lambda(\text{Re}, \Delta) \frac{L_{i,i+1}}{D_{i,i+1}} \quad (3.66)$$

$\lambda(\text{Re}, \Delta)$ – hidraulinis pasipriešinimo koeficientas, kuris priklauso nuo Reinoldso skaičiaus, $\text{Re} = \frac{vD}{\nu(T)}$ (D – vamzdžio skersmuo; ν –

tekėjimo greitis; ν – kinematinė klampa) ir vamzdžio vidinio paviršiaus santykinio šiurkštumo $\Delta = \frac{k}{D}$ (k – ekvivalentinis absoliutus šiurkštumas).

Konkrečio vamzdžio hidraulinio trinties koeficiento reikšmės galima nustatyti tik atlikus eksperimentinius tyrimus. Todėl mokslininkai apibendrinami eksperimentinius tyrimus pasiūlė įvairias formules nustatyti hidraulinio pasipriešinimo koeficiento reikšmės.

Sritis, kai $\lambda = \lambda(\text{Re})$, vadinama lygios trinties sritimi. Didinant Re skaičių, nuo nelygumų susidaro sukūriai. Tada tekėjimo pasipriešinimas priklauso $\lambda = \lambda(\text{Re}, k/D)$, tokia sritis vadinama mišrios trinties sritimi. Esant dideliame Re skaičiui $\lambda = \lambda(k/D)$, tokia sritis vadinama kvadratinio tekėjimo režimo sritimi.

Kai tekėjimas laminarinis $\text{Re} < 2000$, $\lambda = 64 / \text{Re}$ (Stokso formulė). Laminarinis tekėjimas būna transportuojant klampią naftą.

Kai tekėjimas turbulentinis $\text{Re} > 3000$, lygios trinties zonoje naudojam Blauzijaus formulė: $\lambda = 0.3164 / \sqrt[4]{\text{Re}}$. Ši formulė naudojama transportuojant vidutinės klampos naftą. Esant kvadratinio tekėjimo režimo zonoje galima naudotis Šifrinskio formule: $\lambda = 0.11(k/D)^{0.25}$.

Mišrios trinties zonoje naudojamos kelios formulės:

$$\frac{1}{\lambda} = -2 \lg \left[\frac{k}{3.7D} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{\lambda}} \right] \quad (\text{Kolbruko ir Vaito formulė}); \quad (3.67a)$$

$$\frac{1}{\lambda} = -2 \lg \left[\frac{k}{3.7D} + \left(\frac{6.81}{\text{Re}} \right)^{0.9} \right] \quad (\text{Frenkelio formulė}); \quad (3.67b)$$

$$\frac{1}{\lambda} = -1.8 \lg \left[\left(\frac{k}{3.7D} \right)^{1.11} + \frac{6.8}{\text{Re}} \right] \quad (\text{Isajevio formulė}); \quad (3.67c)$$

$$\lambda = 0.11 \left(\frac{k}{D} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0.25} \quad (\text{Atšulerio formulė}). \quad (3.67d)$$

Hidraulinio pasipriešinimo koeficiento reikšmės $\lambda = \lambda(\text{Re}, k / D)$ galima nustatyti panaudojant Mudi diagramą (*Moody diagram*) 3.3 pav.

3.3 pav. Mudi diagrama (*Moody diagram*)

Vietinių nuostolių koeficiento reikšmės ζ_{viet} nustatomos iš literatūros priklausomai nuo kliūčių geometrijos, 3.4 pav.

ζ_{exp}	0.81	0.64	0.49	0.36	0.25	0.16	0.09	0.04	0.01
D_2/d_1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
ζ_{cont}	0.38	0.38	0.34	0.3	0.24	0.18	0.1	0.05	0.15

a)

<p>Sharp entry $\zeta = 0.5 \text{ to } 1.0$</p>	<p>Extended entry $\zeta = 0.68 \text{ to } 2.5$</p>	<p>Conical entry 90 degrees $\zeta = 0.25$</p>	<p>Conical entry 60 degrees $\zeta = 0.1 \text{ to } 0.18$</p>	<p>Rounde entry $\zeta = 0.04 \text{ to } 0.1$</p>
---	---	---	---	---

b)

T-junction 90 degrees $\zeta = 1.2$	T-junction 90 degrees $\zeta = 0.1$	T-junction 45 degrees $\zeta = 0.5$	T-junction 45 degrees $\zeta = 2.5$ to 3	T-junction 45 degrees $\zeta = 0.06$	T-junction 45 degrees $\zeta = 0.15$

c)

$\zeta = 0.6$ to 0.9	$\zeta = 0.15$	$\zeta = 0.6$	$\zeta = 0.5$	$\zeta = 1.1$

d)

3.4 pav. Vietinių kliūčių tipai: **a** – staigus susiaurėjimas; **b** – įėjimas iš ertmės į vamzdį; **c** – trišakis; **d** –vamzdžių susikirtimai

Vandens kinematinė klampa yra lygi:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}; \quad (3.68)$$

čia μ – dinaminė klampa.

Skysčių klampa priklauso nuo temperatūros (3.4 lentelė).

3.4 lentelė. Vandens fizikinių ir cheminių savybių reikšmės esant skirtingoms temperatūroms

T, °C	ρ kg/m ³	Cp kJ/(kg·K)	$\lambda \cdot 10^2$ W/(m · K)	$\sigma \cdot 10^4$ N/m	$\nu \cdot 10^6$ m ² /s	Pr	$\beta \cdot 10^4$ 1/K
0	999,9	4,212	0,551	756,4	1,789	13,67	0,63
10	999,7	4,191	0,575	741,6	1,306	9,52	0,70
20	998,2	4,183	0,599	726,9	1,006	7,02	1,82
30	995,7	4,174	0,618	712,2	0,805	5,42	3,21

3.4 lentelės pabaiga

T, °C	ρ kg/m ³	Cp kJ/(kg·K)	$\lambda \cdot 10^2$ W/(m · K)	$\sigma \cdot 10^4$ N/m	$\nu \cdot 10^6$ m ² /s	Pr	$\beta \cdot 10^4$ 1/K
40	992,2	4,174	0,634	696,9	0,659	4,31	3,87
50	988,1	4,174	0,648	676,9	0,556	3,54	4,49
60	983,1	4,178	0,659	662,2	0,478	2,98	5,11
70	977,8	4,187	0,663	643,9	0,415	2,55	5,70
80	971,8	4,195	0,675	625,9	0,365	2,21	6,32
90	965,3	4,208	0,630	607,2	0,326	1,95	6,95
100	958,4	4,220	0,683	588,0	0,295	1,75	7,52
110	951,0	4,233	0,685	569,0	0,272	1,60	8,08
120	943,1	4,250	0,686	548,4	0,252	1,47	8,64
130	934,8	4,266	0,686	528,8	0,233	1,36	9,19
140	926,1	4,287	0,685	507,2	0,217	1,26	9,72
150	917,0	4,312	0,684	486,9	0,203	1,17	10,30
160	907,0	4,346	0,683	466,0	0,191	1,10	10,70
170	897,3	4,379	0,679	443,4	0,181	1,05	10,30

3.5 pav. Specifinės šilumos priklausomybė nuo temperatūros kitimo

Konvekciniai šilumos mainai, arba **šilumos atidavimu**, vadinamas šilumos pernešimo tarp kieto kūno paviršiaus ir jį apiplaunančio fluido procesas. Fluidas – tai bendras skysčio bei dujų pavadinimas. Toks šilumos pernešimas vyksta vienu metu tiek laidumu, tiek konvekcija.

Pagal konvekcijos atsiradimo priežastį skiriamos dvi konvekcijos rūšys – **laisvoji** ir **priverstinė**.

Laisvąja konvekcija vadinamas fluido judėjimas, vykstantis šiltesnio ir šaltesnio fluido dalelių skirtingų tankių dėka gravitaciniame lauke.

Priverstiniu vadinamas judėjimas, vykstantis išorinių veiksnių, pvz., ventiliatorių, siurbių, vėjo ir pan. dėka.

Konvekcinių šilumos mainų intensyvumas apibūdinamas **šilumos atidavimo koeficientu** $h(T)$, nustatomu pagal Niutono–Rimano (*Newton–Richmann*) formulę:

$$Q = h(T) A \Delta t \Delta T. \quad (3.69)$$

Pagal šį dėsnį šilumos kiekis Q proporcingas šilumos atidavimo paviršiaus plotui bei sienelės ir fluido temperatūrų skirtumui.

Šilumos atidavimo koeficientas apskaičiuojamas pagal tokią formulę

$$h = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{h_2}}, \quad (3.70)$$

čia h – šilumos atidavimo koeficientas $W/(m^2K)$; h_1 – šilumos atidavimo koeficientas tarp vamzdžiaus judančio agento ir vamzdžio vidinio paviršiaus $W/(m^2K)$; h_2 – šilumos atidavimo koeficientas tarp vamzdžio išorinio paviršiaus ir tarpvamzdinėje erdvėje judančio agento $W/(m^2K)$; λ_i – atskiro sienelės sluoksnio laidumo šilumai koeficientas $W/(mK)$; δ_i – atskiro sienelės sluoksnio storis m ; n – sienelės sluoksnių skaičius.

3.8 Vienmačio nestacionaraus skysčio judėjimo charakteristikos

Nagrinėsime skystį (fluidą) kaip spūdžią terpę. Svarbiausi reiškiniai, su kuriais susiduriama nagrinėjant nestacionarų spūdaus skysčio ar dujų judėjimą, yra bangos. Srauto parametrų trūkiai sklinda kaip smūginės bangos, o išvestinių trūkiai – kaip suspaudimo arba išretinimo bangų ribos. Fluido judėjimo metu bangų skaičius didėja,

kadangi banga, pasiekusi skirtingų terpių ribą, praeina ją ir atsispindi nuo jos. Sprendžiant šiuos uždavinius baigtinių skirtumų metodais ir norint padidinti skaičiavimo tikslumą, į pradinės lygtis įvedami nariai su dirbtiniu klampiu tam, kad būtų sušvelninti šuolių trūkiai. Toks metodas yra efektyvus nagrinėjant bendrą fluido judėjimą ir galima gauti gerus rezultatus padidinus skaičiavimo laiką. Tačiau toks metodas turi ir keletą trūkumų. Netikslūs rezultatai gaunami modeliuojant atsispindėjusias išretinimo bangas, kurios susidaro sąveikaujant smūginėms bangoms su atskyrimo riba. Dažnai atsiranda sprendinio maži svyravimai, kurie susidaro nesant fiziniame procese banginio judėjimo.

Jeigu nagrinėjant fluido judėjimą neišvertinama tokių disipatyvinių procesų kaip klampa ir šilumos laidumas, tai fluido judėjimas aprašomas hiperbolinio tipo diferencialinėmis lygtimis su dalinėmis išvestinėmis ir jų charakteristikos yra realios.

Fluido vienmačio judėjimo lygtis galima užrašyti kaip n -osios eilės kvazitiesinių diferencialinių lygčių sistemą

$$[A] \frac{\partial \{u\}}{\partial t} + [B] \frac{\partial \{u\}}{\partial x} = \{f\}; \quad (3.71)$$

čia a_{ij}, b_{ij}, f_i – matricų $[A], [B]$ ir vektoriaus $\{f\}$ elementai, kurie priklauso nuo t, x ir vektoriaus $\{u\}$ elementų u_i .

Prilyginę (3.71) lygties determinantą nuliui, gauname lygtį:

$$\left| [B] - [A] \frac{dx}{dt} \right| = 0, \quad (3.72)$$

iš kurios galima surasti dx / dt išvestinę, kuri nustato charakteristikos kryptį.

Jeigu ši lygtis turi n skirtingų realių šaknų $dx / dt = \lambda_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$), tai pradinė diferencialinių lygčių sistema vadinama hiperbolinio tipo. Charakteristikos liestinės posviris λ_i priklauso ne tik nuo koordinatų, bet ir nuo $\{u\}$ sprendinio. Todėl plokštumoje t, x nubraižyti cha-

rakteristikas galima tik konkrečiam diferencialinių lygčių sistemos sprendiniui. Kita vertus, jeigu egzistuoja sprendinys, tada matricos

$$\left([B] \, dt - [A] \, dx, \{f\} \, dt - [A] \, d\{u\} \right), \quad (3.73)$$

rangas lygus $n-1$.

Prilyginę (3.73) matricos determinantą nuliui, kuris sudarytas iš (3.72) matricos $n-1$ stulpelių ir vektoriaus $\{f\} \, dt - [A] \, d\{u\}$,

$$|[B] \, dt - [A] \, dx, \{f\} \, dt - [A] \, d\{u\}| = 0, \quad (3.74)$$

gausime lygtį, kuri vadinama suderinamumo sąlyga arba diferencialine sąsaja ant charakteristikos. Charakteristikos yra linijos, kurios atskiria sritis su mažais sužadinimais. Ant charakteristikų gali būti fluído parametrų išvestinių silpni trūkiai. Lygtis (3.74) vadinama charakteristikų kryptinių lygtimi.

Nestacionarus, izoterminis klampaus ir spūdaus skysčio judėjimas aprašomas skysčio vientisumo ir judėjimo kiekio lygtimis:

$$\frac{\partial}{\partial t}[S(x)\rho] + \frac{\partial}{\partial x}[S(x)\rho v] = F_1(x), \quad (3.75)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}[S(x)\rho v] + \frac{\partial}{\partial x}\left[S(x)(p + \rho v^2)\right] = F_2(p, v); \quad (3.76)$$

čia $S(x)$ – vamzdžio skerspjūvio plotas; ρ – skysčio tankis; $F_1(x)$ – skysčio masės debitas į ilgio vienetą, patenkantis į vamzdį; p, v – skysčio slėgis ir greitis; $F_2(p, v)$ – funkcija, priklausanti nuo slėgio ir greičio.

Skystyje, kuriame yra tam tikras dujų kiekis ir skystis patalpintas tampriame vamzdyje, garso greitis lygus:

$$a = \sqrt{\frac{K(p)/\rho}{1 + \frac{K(p) \cdot d}{E \cdot e} + \frac{\varepsilon}{\gamma} \left[\frac{K(p)}{\gamma p} - 1 \right]}}; \quad (3.77)$$

čia $K(p)$ – skysčio tūrinis tamprumo modulis; E – vamzdžio tamprumo modulis; d – vamzdžio vidinis skersmuo; e – vamzdžio sienelės storis; γ – adiabatinio proceso rodiklis; ε – dujų tūrio, esančio skystyje, santykis su bendru skysčio (mišinio) tūriu.

Bendruoju atveju naudojamų skysčių tūrinis tamprumo modulis priklauso nuo slėgio:

$$K(p) = \frac{\sum_{i=0}^{n_1} a_i p^i}{\sum_{j=0}^{n_2} b_j p^j}; \quad (3.78)$$

čia a_i, b_i – koeficientai, kurie nustatomi iš eksperimentų. Bendruoju atveju garso greitis terpėje lygus:

$$a^2 = \frac{dp}{d\rho}. \quad (3.79)$$

Išreiškę tankio diferencialą iš (3.79) išraiškos ir įrašę į skysčio vientisumo (3.75) lygtį, gausime:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + v \frac{\partial p}{\partial x} + \rho a^2 \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{a^2 \rho v}{S(x)} \frac{\partial S}{\partial x} = \frac{a^2 F_1}{S(x)}. \quad (3.80)$$

Skysčio vientisumo (3.80) ir momentų (3.76) lygtis galima užrašyti matricine forma:

$$[A] \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} \right\} + [B] \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} \right\} = \{f\}; \quad (3.81)$$

$$\text{čia } [A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; [B] = \begin{bmatrix} v & a^2 \rho \\ \frac{1}{\rho} & v \end{bmatrix}, \{u\}^T = [p, v],$$

$$\{f\} = \left\{ \begin{array}{c} \frac{a^2 F_1(x)}{S(x)} - \frac{a^2 \rho v}{S(x)} \frac{\partial S}{\partial x} \\ \frac{1}{S(x) \rho} [F_2(x) - v F_1(x)] - \frac{\tau \Pi(x)}{S(x) \rho} - a_x \end{array} \right\}. \quad (3.82)$$

Išrašę iš (3.81) $[A]$ ir $[B]$ matricų išraiškas į (3.71) lygtį ir ją išsprendę, gauname dvi charakteristikų lygtis:

$$\frac{dx}{dt} = v + a; \quad \frac{dx}{dt} = v - a, \quad (3.83)$$

kurios vadinamos C^+ ir C^- charakteristikomis. Sudarome (3.74) matricą

$$\begin{bmatrix} v dt - dx & f_1 dt - dp \\ \frac{dt}{\rho} & f_2 dt - dv \end{bmatrix}$$

ir prilyginę jos determinantą nuliui, gauname suderinamumo sąlygas ant charakteristikų:

$$C^+ : \frac{dv}{dt} + \frac{1}{a\rho} \frac{dp}{dt} = \frac{f_1}{a\rho} + f_2, \quad (3.84)$$

$$C^- : \frac{dv}{dt} - \frac{1}{a\rho} \frac{dp}{dt} = -\frac{f_1}{a\rho} + f_2. \quad (3.85)$$

Visas vamzdyno ilgis suskaidomas į elementus, kurių ilgis Δx . Laiko momentu $t + \Delta t$ uždavinio nežinomieji – slėgis p ir greitis v nustatomi iš jų žinomų reikšmių laiko momentu t (3.6 pav.). Lygčių sistemoje (3.84) ir (3.85) pakeitę diferencialus baigtiniais skirtumais, gauname dviejų netiesinių algebrinių lygčių sistemą:

$$C^+ : \Phi_1 = v_D - v_L + \frac{1}{2}(p_D - p_L) \left[\left(\frac{1}{a\rho} \right)_L + \left(\frac{1}{a\rho} \right)_D \right] -$$

$$-\frac{\Delta t}{2} \left[\left(\frac{f_1}{a\rho} \right)_L + \left(\frac{f_1}{a\rho} \right)_D \right] - \frac{\Delta t}{2} \left[(f_2)_L + (f_2)_D \right] = 0; \quad (3.86)$$

$$C^- : \Phi_2 = v_D - v_R - \frac{1}{2}(p_D - p_R) \left[\left(\frac{1}{a\rho} \right)_R + \left(\frac{1}{a\rho} \right)_D \right] +$$

$$+ \frac{\Delta t}{2} \left[\left(\frac{f_1}{a\rho} \right)_R + \left(\frac{f_1}{a\rho} \right)_D \right] - \frac{\Delta t}{2} \left[(f_2)_R + (f_2)_D \right] = 0 \quad (3.87)$$

čia L, R, D – indeksai, kuriais pažymėti kintamieji ir funkcijos atitinkamuose taškuose.

3.6 pav. Taške D skysčio srauto parametrų nustatymo schema

Netiesinė algebrinių lygčių sistema (3.87) ir (3.88) sprendžiama Niutono metodu. Šios lygčių sistemos Jakobio matrica ir jos elementai lygūs:

$$[I] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_1}{\partial p_D} & \frac{\partial \Phi_1}{\partial v_D} \\ \frac{\partial \Phi_2}{\partial p_D} & \frac{\partial \Phi_2}{\partial v_D} \end{bmatrix}; \quad (3.88)$$

$$\begin{aligned} \text{čia } \frac{\partial \Phi_1}{\partial p_D} &= \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{a\rho} \right)_L + \left(\frac{1}{a\rho} \right)_D \right] + \frac{1}{2} (p_D - p_L) \frac{\partial}{\partial p_D} \left[\left(\frac{1}{a(p)\rho} \right)_D \right] - \\ &- \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial p_D} \left[\left(\frac{f_1}{a(p)\rho} \right)_D \right], \\ \frac{\partial \Phi_1}{\partial v_D} &= 1 - \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial v_D} \left[\left(\frac{f_1}{a\rho} \right)_D \right] - \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial v_D} [(f_2)_D], \\ \frac{\partial \Phi_2}{\partial p_D} &= -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{a(p)\rho} \right)_R + \left(\frac{1}{a(p)\rho} \right)_D \right] - \frac{1}{2} (p_D - p_R) \frac{\partial}{\partial p_D} \left[\left(\frac{1}{a(p)\rho} \right)_D \right] + \\ &+ \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial p_D} \left[\left(\frac{f_1}{a(p)\rho} \right)_D \right], \\ \frac{\partial \Phi_2}{\partial v_D} &= 1 + \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial v_D} \left[\left(\frac{f_1}{a\rho} \right)_D \right] - \frac{\Delta t}{2} \frac{\partial}{\partial v_D} [(f_2)_D], \\ \frac{\partial}{\partial p_D} \left[\left(\frac{f_1}{a\rho} \right)_D \right] &= 2a(p_D) \frac{\partial a(p)}{\partial p_D} \left[\frac{F_1(x)}{S(x)} - \frac{\rho v}{S(x)} \frac{\partial S(x)}{\partial x} \right], \\ \frac{\partial}{\partial v_D} \left[\left(\frac{f_1}{a\rho} \right)_D \right] &= -\frac{a}{S(x)} \frac{\partial S(x)}{\partial x}, \\ \frac{\partial}{\partial v_D} [(f_2)_D] &= \frac{\Pi(x)}{8S(x)} \left[2\lambda(\text{Re})|v_D| + \frac{\partial \lambda}{\partial \text{Re}} \frac{\partial \text{Re}}{\partial v_D} v_D |v_D| \right]. \end{aligned} \quad (3.89)$$

Sprendinio stabilumui laiduoti, būtina tenkinti Kuranto sąlygą:

$$\Delta t |v + a| \leq \Delta x. \quad (3.90)$$

Per taškus l ir d praeina C^+ charakteristika, kurios lygtis yra:

$$\frac{dx}{dt} = v + a. \quad (3.91)$$

Integravę (3.84) išraišką tarp taškų L ir D , gauname taško Lx koordinatę:

$$x_L = x_D - (v_L + a_L) \Delta t. \quad (3.92)$$

Tarp taškų A ir C greitis ir slėgis aproksimuojami pirmojo laipsnio daugianariais:

$$v(x) = \frac{x_D - x}{\Delta x} v_A + \frac{x - x_A}{\Delta x} v_C, \quad (3.93)$$

$$p(x) = \frac{x_D - x}{\Delta x} p_A + \frac{x - x_A}{\Delta x} p_C. \quad (3.94)$$

Įrašę (3.83) išraišką į (3.93) ir (3.94) išraiškas, gauname dviejų netiesinių algebrinių lygčių sistemą su nežinomaisiais p_L ir v_L :

$$\Phi_3 = p_L - p_C - \theta(p_A - p_C) [v_L + a(p_L)] = 0, \quad (3.95)$$

$$\Phi_4 = v_L - v_C - \theta(v_A - v_C) [v_L + a(p_L)] = 0; \quad (3.96)$$

čia $\theta = \Delta t / \Delta x$.

Netiesinių algebrinių lygčių sistema (3.95) ir (3.96) sprendžiama Niutono metodu. Šios lygčių sistemos Jakobi matrica lygi:

$$[I] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_3}{\partial p_L} & \frac{\partial \Phi_3}{\partial v_L} \\ \frac{\partial \Phi_4}{\partial p_L} & \frac{\partial \Phi_4}{\partial v_L} \end{bmatrix}; \quad (3.97)$$

$$\begin{aligned} \text{čia } \frac{\partial \Phi_3}{\partial p_L} &= 1 - \theta(p_A - p_C) \frac{\partial a}{\partial p_L}, \quad \frac{\partial \Phi_3}{\partial v_L} = -\theta(p_A - p_C), \\ \frac{\partial \Phi_4}{\partial p_L} &= -\theta(v_A - v_C) \frac{\partial a}{\partial p_L}, \quad \frac{\partial \Phi_4}{\partial v_L} = 1 - \theta(v_A - v_C). \end{aligned} \quad (3.98)$$

Analogiškai nustatomos kintamųjų reikšmės taške R . Šiuo atveju per taškus R ir D praeina C^- charakteristika, kurios lygtis yra:

$$\frac{dx}{dt} = v - a. \quad (3.99)$$

Integruvę šią išraišką tarp taškų R ir D , gauname taško R koordinatę:

$$x_R = x_D (v_R - a_R) \Delta t. \quad (3.100)$$

Tarp taškų C ir B greitį ir slėgį aproksimuojame pirmojo laipsnio daugianariais (3.93) ir (3.94). Įstatę (3.100) išraišką į (3.93) ir (3.94), gauname dviejų netiesinių algebrinių lygčių sistemą su nežinomaisiais p_R ir v_R :

$$\Phi_5 = p_R - p_C + \theta(p_B - p_C) [v_R - a(p_R)] = 0, \quad (3.101)$$

$$\Phi_6 = v_R - v_C + \theta(v_B - v_C) [v_R - a(p_R)] = 0. \quad (3.102)$$

Netiesinių algebrinių lygčių sistema (3.101) ir (3.102) sprendžiama Niutono metodu. Šios lygčių sistemos Jakobi matrica lygi:

$$[I] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_5}{\partial p_R} & \frac{\partial \Phi_5}{\partial v_R} \\ \frac{\partial \Phi_6}{\partial p_R} & \frac{\partial \Phi_6}{\partial v_R} \end{bmatrix}; \quad (3.103)$$

$$\text{čia } \frac{\partial \Phi_5}{\partial p_R} = 1 - \theta(p_B - p_C) \frac{\partial a}{\partial p_R}, \frac{\partial \Phi_5}{\partial v_R} = -\theta(p_B - p_C);$$

$$\frac{\partial \Phi_6}{\partial p_R} = -\theta(v_B - v_C) \frac{\partial a}{\partial p_R}, \frac{\partial \Phi_6}{\partial v_R} = 1 + \theta(v_B - v_C). \quad (3.104)$$

Panagrinėsime hidraulinę sistemą, kurią sudaro ašinis rotorinis stūmoklinis siurblys, hidraulinis akumuliatorius ir vamzdžiai (3.7 pav.). Sprendinio rezultatai pateikti 3.8 pav. ir 3.9 pav.

3.7 pav. Hidraulinė sistema

1 – ašinis rotorinis stūmoklinis siurblys; 2, 4 – vamzdžiai;
3 – hidraulinis akumuliatorius; 5 – bakas

3.8 pav. Slėgio kitimas hidraulinės sistemos įėjime

3.9 pav. Slėgio pulsacijos hidraulinėje sistemoje su vienu hidraulinio akumuliatoriumi

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, nes prisotintų garų, t. y. slėgis, 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 zonos atsiranda didesnis triukšmo lygis ir vibracija. Kavitacijai atsirasti įtakos turi dujų burbuliukų buvimas skystyje.

Nagrinėjant dinامينius procesus greitaigėse hidraulinėse sistemose, būtina sudaryti matematinę modelį tirti kavitacijos susidarymo priežastis, kavitacijos reiškinio dinaminiams procesams įtaką.

Tarkime, pradiniu laiko momentu vamzdžio mazguose žinomi srauto parametrai (p, v) . Laiko momentu $t + \Delta t$ srauto parametrai nustatomi sprendžiant (3.86) ir (3.87) algebrinių lygčių sistemą. Jeigu slėgis taške D yra mažesnis už prisotintų garų slėgį p ($p_D > p_{\text{garai}}$), tada šiame D taške slėgis p_D prilyginamas prisotintų garų slėgiui ($p_D > p_{\text{garai}}$). Skysčio greitį D taške galima užrašyti kiekvienai charakteristikai C^+ ir C^- , būtent v_D^+ ir v_D^- nustatomi iš lygčių (3.86) ir (3.87), kai slėgis D taške lygus prisotintų garų slėgiui:

$$\Phi_7 = v_D^+ - v_L + \frac{1}{2}(p_{\text{garai}} - p_L) \left[\left(\frac{1}{a\rho} \right)_L + \left(\frac{1}{a\rho} \right)_D \right] -$$

$$\frac{\Delta t}{2} \left[\left(\frac{f_1}{a\rho} \right)_L + \left(\frac{f_1}{a\rho} \right)_D \right] - \frac{\Delta t}{2} [(f_2)_L + (f_2)_D] = 0, \quad (3.105)$$

$$\Phi_8 = v_D^- - v_R + \frac{1}{2}(p_{\text{garai}} - p_R) \left[\left(\frac{1}{a\rho} \right)_L + \left(\frac{1}{a\rho} \right)_D \right] -$$

$$\frac{\Delta t}{2} \left[\left(\frac{f_1}{a\rho} \right)_R + \left(\frac{f_1}{a\rho} \right)_D \right] + \frac{\Delta t}{2} [(f_2)_R + (f_2)_D] = 0. \quad (3.106)$$

Laiko momentu $t + \Delta t$ kavitacijos zonos turį taško D aplinkoje galima nustatyti

$$V_{cav,D} = V_{cav,C} + S_D (u_D^- - u_D^+) \Delta t, \quad (3.107)$$

čia $V_{cav,C}$ – kavitacijos zonos tūris laiko momentu t ; S_D – vamzdžio skerspjūvio plotas D taške, u_D^+, u_D^- – D taške vidutiniai greičiai ant C^+ ir C^- charakteristikų,

$$u_D^+ = \frac{1}{2}(v_L + v_D^+); u_D^- = \frac{1}{2}(v_R + v_D^-). \quad (3.108)$$

Jeigu kavitacijos zonos tūris D taške yra neteigiamas ($V_{cav,D} \leq 0$), tada šiame taške kavitacijos reiškiny nesusidaro ($V_{cav,D} = 0$) ir skysčio srauto parametrai nustatomi sprendžiant (3.105) ir (3.106) lygčių sistemą.

3.9 Vienmatis nestacionarus neizoterminis dujų judėjimas

Vienmatis nestacionarus neizoterminis realiųjų dujų judėjimas aprašomas srauto vientisumo, judėjimo kiekio, energijos ir būsenos lygtimis. Realiųjų dujų judėjimą aprašysime kintamaisiais ρ, v, T . Dujų srauto vientisumo lygtį užrašysime tokia forma:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v \frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial x} = R_1 \frac{F_1(x)}{S(x)} - \frac{\rho}{S(x)} \frac{dS}{dt}; \quad (3.109)$$

$$\text{čia } R_1 = \frac{F_1(x)}{S(x)} - \frac{\rho}{S(x)} \frac{dS}{dt}. \quad (3.110)$$

Dujų srauto momentų lygtį užrašysime tokia forma:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{1}{\rho S(x)} [F_2(x) - v F_1(x) - \tau \Pi(x) - \rho S(x) a_x]. \quad (3.111)$$

Pasinaudoję realiųjų dujų būsenos lygtimi

$$p = Z \rho R T;$$

čia Z – spūdomo koeficientas (idealiosioms dujoms $Z=1$), lygtyje (3.111) slėgį pakeisime pagrindiniais kintamaisiais (ρ, v, T) :

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial p}{\partial \rho} \frac{\partial \rho}{\partial x}, \quad (3.112)$$

$$\frac{\partial p}{\partial \rho} = ZRT + \rho RT \frac{\partial Z}{\partial \rho} = c_1, \quad \frac{\partial p}{\partial T} = Z\rho R + \rho RT \frac{\partial Z}{\partial T} = c_2. \quad (3.113)$$

Tada

$$\frac{\partial p}{\partial x} = c_1 \frac{\partial \rho}{\partial x} + c_2 \frac{\partial T}{\partial x}. \quad (3.114)$$

Dujų srauto momentų lygtis:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \left[c_1 \frac{\partial \rho}{\partial x} + c_2 \frac{\partial T}{\partial x} \right] = R_2; \quad (3.115)$$

$$\text{čia } R_2 = \frac{1}{\rho S(x)} \left[F_2(x) - v F_1(x) - \tau \Pi(x) - \rho S(x) a_x \right]. \quad (3.116)$$

Panaudoję dujų vientisumo lygtį

$$\frac{\partial}{\partial t} [S(x)\rho] + \frac{\partial}{\partial x} [S(x)\rho v] = F_1(x);$$

čia ρ, v – skysčio tankis ir greitis; $S(x)$ – vamzdyno skerspjūvio plotas; dujų srauto energijos lygtį užrašysime tokia forma:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + v \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} - \frac{p}{\rho^2} \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + v \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) = R_{30}; \quad (3.117)$$

$$\text{čia } R_{30} = \frac{1}{\rho S(x)} \left[p \frac{\partial S}{\partial t} + v^2 F_1(x) - v F_2(x) + v \tau \Pi(x) + q(T) \Pi(x) \right]. \quad (3.118)$$

Ryšis tarp dujų vidinės energijos ir entalpijos yra:

$$\varepsilon = h - \frac{p}{\rho} = h - Z(\rho, T)RT. \quad (3.119)$$

Realųjų dujų entalpiją galima išreikšti:

$$h(\rho, T) = h_0(T) + h_1(\rho, T); \quad (3.120)$$

čia $h_0(T)$ – idealiųjų dujų entalpija; $h_1(\rho, T)$ – entalpijos pataisa, įvertinanti skirtumą tarp realiųjų ir idealiųjų dujų. Tada realiųjų dujų vidinė energija lygi:

$$\varepsilon = h_0(T) + h_1(\rho, T) - Z(\rho, T)RT. \quad (3.121)$$

Turėdami (3.121) išraišką, galime realiųjų dujų vidinę energiją išreikšti per pagrindinius kintamuosius (ρ, v, T) . Tada dujų vidinės energijos išvestinės lygios:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} = \frac{\partial h_1}{\partial \rho} - RT \frac{\partial Z}{\partial \rho} = b_1, \quad (3.122)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial T} = \frac{\partial h_0}{\partial T} + \frac{\partial h_1}{\partial T} - R \left(Z + T \frac{\partial Z}{\partial T} \right) = b_2. \quad (3.123)$$

Pasinaudoję (3.112) ir (3.113) išraiškomis, realiųjų dujų energijos lygtį galime užrašyti:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + v \frac{\partial \rho}{\partial x} + b_3 \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right) = R_3; \quad (3.124)$$

$$\text{čia } b_3 = \frac{b_2 \rho}{b_1 \rho - ZRT}, \quad (3.125)$$

$$R_3 = \frac{\rho R_{30}}{b_1 \rho - ZRT}. \quad (3.126)$$

Realųjų dujų judėjimo lygčių sistemą su kintamaisiais (ρ, v, T) galima užrašyti matricos forma, būtent:

$$[A] \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} \right\} + [B] \left\{ \frac{\partial u}{\partial x} \right\} = \{f\}; \quad (3.127)$$

$$\text{čia } [A] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & b_3 \end{bmatrix}, [B] = \begin{bmatrix} v & \rho & 0 \\ c_1 / \rho & v & c_2 / \rho \\ v & 0 & b_3 v \end{bmatrix},$$

$$\{u\} = [\rho, v, T]; \{f\}^T = [f_1, f_2, f_3] = [R_1, R_2, R_3]. \quad (3.128)$$

Įrašę iš (3.128) matricų $[A]$ ir $[B]$ išraiškas į

$$\left| [B] - [A] \frac{dx}{dt} \right| = 0,$$

lygtį ir ją išsprendę, gauname tris charakteristikų lygtis:

$$C^+ : \frac{dx}{dt} = v + a, C^- : \frac{dx}{dt} = v - a, C_0 : \frac{dx}{dt} = v; \quad (3.129)$$

čia a – garso greitis realiosiose dujose,

$$a^2 = c_1 - c_2 / b_3. \quad (3.130)$$

Suderinamumo sąlygos ant charakteristikų yra lygios:

$$C^+ : \frac{d\rho}{dt} + \left(\frac{\rho a}{c_1} \right) \frac{dv}{dt} + c_3 \frac{dT}{dt} = \frac{a^2 f_1}{c_1} + \frac{\rho a f_2}{c_1} + \frac{c_3 f_3}{b_3}, \quad (3.131)$$

$$C^- : \frac{d\rho}{dt} - \left(\frac{\rho a}{c_1} \right) \frac{dv}{dt} + c_3 \frac{dT}{dt} = \frac{a^2 f_1}{c_1} + \frac{\rho a f_2}{c_1} + \frac{c_3 f_3}{b_3}, \quad (3.132)$$

$$C_0 : \frac{d\rho}{dt} + c_3 \frac{dT}{dt} = \frac{a^2 f_1}{c_1} + \frac{c_3 f_3}{b_3}; \quad (3.133)$$

$$\text{čia } c_3 = c_2 / c_1. \quad (3.134)$$

Visas dujų vamzdyno ilgis suskaidomas į elementus, kurių ilgis Δx . Laiko momentu $t + \Delta t$ uždavinio nežinomieji – tankis ρ , greitis v ir temperatūra T nustatomi iš gerai žinomų reikšmių laiko momentu t (3.10 pav.).

3.10 pav. Taške D dujų parametrų nustatymo schema

Lygčių sistemoje (3.131), (3.132) ir (3.133) pakeitę diferencialus baigtiniais skirtumais, gauname trijų netiesinių algebrinių lygčių sistemą:

$$\begin{aligned} C^+ : \Phi_1 = \rho_D - \rho_L + \frac{1}{2}(v_D - v_L)[(r_1)_L + (r_1)_D] + \frac{1}{2}(T_D - T_L) \cdot [(c_3)_L + (c_3)_D] - \\ \frac{1}{2}(T_D - T_L) \cdot [(c_3)_L + (c_3)_D] - \\ - \frac{\Delta t}{2}[(r_2)_L + (r_2)_D] - \frac{\Delta t}{2}[(r_3)_L + (r_3)_D] - \frac{\Delta t}{2}[(r_4)_L + (r_4)_D] = 0, \end{aligned} \quad (3.135)$$

$$\begin{aligned}
C^- : \Phi_2 = & \rho_D - \rho_R - \frac{1}{2}(v_D - v_R) \left[(r_1)_R + (r_1)_D \right] + \\
& \frac{1}{2}(T_D - T_R) \cdot \left[(c_3)_R + (c_3)_D \right] - \\
& - \frac{\Delta t}{2} \left[(r_2)_R + (r_2)_D \right] + \frac{\Delta t}{2} \left[(r_3)_R + (r_3)_D \right] - \frac{\Delta t}{2} \left[(r_4)_R + (r_4)_D \right] = 0,
\end{aligned} \tag{3.136}$$

$$\begin{aligned}
C_0 : \Phi_3 = & \rho_D - \rho_E + \frac{1}{2}(T_D - T_E) \left[(c_3)_E + (c_3)_D \right] - \frac{\Delta t}{2} \left[(r_2)_E + (r_2)_D \right] - \\
& - \frac{\Delta t}{2} \left[(r_4)_E + (r_4)_D \right] = 0;
\end{aligned} \tag{3.137}$$

$$\text{čia } r_1 = \frac{\rho a}{c_1}, r_2 = \frac{a^2 f_1}{c_1}, r_3 = \frac{\rho a f_2}{c_1}, r_4 = \frac{c_3 f_3}{b_3}. \tag{3.138}$$

Netiesinė algebrinių lygčių sistema (3.135), (3.136) ir (3.137) sprendžiama Niutono metodu.

Per taškus L ir D pereina C^+ charakteristika, kurios lygtis yra:

$$\frac{dx}{dt} = v + a. \tag{3.139}$$

Integravę šią išraišką tarp taškų L ir D , gauname taško Lx koordinatę:

$$x_L = x_D - (v_L - a_L) \Delta t. \tag{3.140}$$

Tarp taškų A ir C dujų srauto parametrai (ρ, v, T) aproksimuojami pirmo laipsnio daugianariais:

$$\rho(x) = \frac{x_D - x}{\Delta x} \rho_A + \frac{x - x_A}{\Delta x} \rho_C,$$

$$v(x) = \frac{x_D - x}{\Delta x} \rho v_A + \frac{x - x_A}{\Delta x} v_C,$$

$$T(x) = \frac{x_D - x}{\Delta x} T_A + \frac{x - x_A}{\Delta x} T_C. \quad (3.141)$$

Įrašę (3.140) išraišką į (3.141) išraiškas, gauname trijų netiesinių algebrinių lygčių sistemą:

$$\Phi_4 = \rho_L - \rho_C + \theta(v_L + a_L)(\rho_C - \rho_A) = 0, \quad (3.142)$$

$$\Phi_5 = v_L - v_C + \theta(v_L + a_L)(v_C - v_A) = 0, \quad (3.143)$$

$$\Phi_6 = T_L - T_C + \theta(v_L + a_L)(T_C - T_A) = 0; \quad (3.144)$$

čia $\theta = \Delta t / \Delta x$.

Netiesinė algebrinių lygčių sistema sprendžiama Niutono metodu.

Per taškus E ir D pereina C_0 charakteristika, kurios lygtis:

$$\frac{dx}{dt} = v. \quad (3.145)$$

Suintegravę šią lygtį tarp taškų E ir D , gauname taško E x koordinatę:

$$x_E = x_D - v_E \Delta t. \quad (3.146)$$

Dujų srauto parametrai taške E yra lygūs:

$$\rho_E = \frac{\rho_C + \theta(v_C \rho_A - v_A \rho_C)}{1 + \theta(v_C - v_A)},$$

$$v_E = \frac{v_C}{1 + \theta(v_C - v_A)},$$

$$T_E = \frac{T_C + \theta(v_C T_A - v_A T_C)}{1 + \theta(v_C - v_A)}. \quad (3.147)$$

Per taškus R ir D pereina C^- charakteristika, kurios lygtis yra:

$$\frac{dx}{dt} = v - a. \quad (3.148)$$

Integruvę šią išraišką tarp taškų R ir D , gauname taško R koordinatę:

$$x_R = x_D - (v_R - a_R) \Delta t. \quad (3.149)$$

Tarp taškų C ir B dujų srauto parametrus aproksimuojame pirmo laipsnio daugianariais (3.141). Skysčio srauto parametrai ρ_R, v_R, T_R taške R nustatomi iš trijų netiesinių algebrinių lygčių sistemos:

$$\Phi_7 = \rho_R - \rho_C - \theta(v_R - a_R) (\rho_C - \rho_B) = 0, \quad (3.150)$$

$$\Phi_8 = v_R - v_C - \theta(v_R - a_R) (v_C - v_B) = 0, \quad (3.151)$$

$$\Phi_9 = T_R - T_C - \theta(v_R - a_R) (T_C - T_B) = 0. \quad (3.152)$$

Netiesinė algebrinių lygčių sistema sprendžiama Niutono metodu.

Idealiųjų dujų entalpijos priklausomybė nuo temperatūros yra:

$$h_0 = h_{00} + h_{01} + h_{02}(T); \quad (3.153)$$

čia

$$h_{02}(T) = R \left\{ \alpha_1 (T - T_0) + 100\beta_1 \ln(T / T_0) + \sum_{j=2}^{10} \frac{\alpha_j}{j} [T \cdot \chi^{j-1} - T_0 \chi^j] + \right\}$$

$$\frac{10^{2j} \cdot \beta_j}{1-j} (T^{1-j} - T_0^{1-j}).$$

Entalpiją $h_1(\rho, T)$ galima išreikšti dviejų kintamųjų daugianariu:

$$h_1(\rho, T) = RT \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=0}^{N_{si}} \frac{i+j}{i} b_{ij} \frac{\omega_p^i}{\tau_T^j}; \quad (3.154)$$

čia b_{ij} – koeficientai, jų reikšmės nustatomos iš eksperimentinių duomenų, $\tau_T = T / T_{kr}$; T_{kr} – krizinė dujų temperatūra, $\omega_p = \rho / \rho_{kr}$; ρ_{kr} – krizinis dujų tankis.

Dujų spūdumo koeficiento Z priklausomybė nuo tankio ir temperatūros užrašoma tokia išraiška:

$$Z = 1 + \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=0}^{N_{si}} b_{ij} \frac{\omega_p^i}{\tau_T^j}.$$

Tada spūdumo koeficiento išvestinės $\frac{\partial Z}{\partial \rho}$ ir $\frac{\partial Z}{\partial T}$, kurias naudojamės koeficientams b_1 ir c_1 nustatyti, lygios:

$$\begin{aligned} \frac{\partial Z}{\partial \rho} &= \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{j=1}^{N_{si}} b_{ij} \frac{i \cdot \omega_p^{i-1}}{\rho_{kr} \cdot \tau_T^{j-1}}, \\ \frac{\partial Z}{\partial T} &= \sum_{i=1}^{N_r} \sum_{i=2}^{N_{si}} b_{ij} \frac{(1-j) \omega_p^i}{T_{kr} \cdot \tau_T^j}. \end{aligned} \quad (3.155)$$

Pasinaudosime realiųjų dujų būsenos lygtimi

$$p = Z \rho R T$$

nustatyti entalpijas h_0 ir h_1 . Idealiųjų dujų entalpija lygi:

$$h_0 = h_{00} + h_{01} + \int_{T_0}^T C_{p0} dt; \quad (3.156)$$

čia h_{00} – entalpija esant temperatūrai $T_0 = 100$ K; h_{01} – sublimacijos šiluma esant temperatūrai $T = 0$ K; C_{po} – izobarinis šilumos imlumas,

$$C_{po} = R \left(\sum_{j=0}^{n_1} \alpha_j \chi_T^j + \sum_{j=1}^{n_2} \beta_j \chi_T^{-j} \right), \quad (3.157)$$

$\chi_T = T / 100$; α_j ir β_j – koeficientai, nustatomi iš eksperimentinių duomenų.

4. PAGRINDINĖS IŠCENTRINIŲ SIURBLIŲ CHARAKTERISTIKOS IR MATEMATINIAI MODELIAI

4.1 Pagrindinės išcentrinių siurblių charakteristikos

Išcentrinuose naftos siurbliuose besisukant darbiniam siurblio ratui atsiranda išcentrinė jėga, dėl kurios skystis juda iš mažesnio slėgio skerspjuvio į didesnio slėgio skerspjuvį.

Paprasčiausiu siurblio matematiniu modeliu yra lygtis

$$\Delta H = \frac{p_2 - p_1}{\rho g} = F(Q), \quad (4.1)$$

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

$$\Delta H = a - b \cdot Q^2; \quad (4.2)$$

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

$$\Delta H = (a_1 + a_2) - (b_1 + b_2) Q^2 = a - b Q^2; \quad (4.3)$$

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

Dviejų lygiagrečiai sujungtų išcentrinų 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 $\Delta H_1 = a_1 - b_1 Q_1^2$, o antrojo siurblio charakteristika $\Delta H_2 = a_2 - b_2 \cdot Q_2^2$, dviejų išcentrinų siurblių sistemos charakteristika yra:

$$\sqrt{\frac{a_1 - \Delta H}{b_1}} + \sqrt{\frac{a_2 - \Delta H}{b_2}} = Q; \quad (4.4)$$

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

1 pavyzdys. Išcentrinio siurblio P-124, kurio modelis „10x14x19 DVS“, charakteristikos $\Delta H = F(Q)$ parametrai yra:

$$\Delta H_{P-124} = F(Q) = a - bQ^2;$$

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

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

Kitų penkių išcentrinų siurblių P-117, P-118, P-121, P-122, P-123, kurių modelis „14x25 DVS“, charakteristikos yra vienodos, t. y.:

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

Transportuojant naftą iš terminalo rezervuarų į naftos perdirbimo įmonės talpas nafta pumpuojama nuosekliai sujungtais siurbliais.

Rasti šešių nuosekliai sujungtų išcentrinų siurblių charakteristiką.

Sprendimas.

Išcentrinų siurblių ($Q - \Delta H$) charakteristikos sudedamos. Šiuo atveju debitas visuose siurbliuose gaunamas vienodas, o diferencialiniai siurblių slėgiai sudedami:

$$Q = Q_1 = Q_2 = \dots = Q_6;$$

$$\Delta H = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \dots + \Delta H_6.$$

Dviejų nuosekliai sujungtų siurblių sistemos charakteristika:

$$\Delta H = (a_1 + a_2) - (b_1 + b_2) \cdot Q^2.$$

Apskaičiuojama siurblių sistemos charakteristika, kai nuosekliai sujungti visi 6 siurbliai:

$$\begin{aligned} \Delta H &= \Delta H_{P-124} + 5\Delta H_{P-117} = \\ &= (354 + 5 \cdot 165) - (1,25 + 5 \cdot 1,22) \cdot 10^{-5} \cdot Q^2 = 1179 - 7,35 \cdot 10^{-5} \cdot Q^2 \end{aligned}$$

Nuosekliai sujungtų išcentrinų siurblių ($Q - \Delta H$) charakteristikos pavaizduotos 4.1 pav.

4.1 pav. Nuosekliai sujungtų siurblių $Q - \Delta H$ charakteristikos

2 pavyzdys. Duoti du išcentriniai siurbliai HM 1260-260. Kai pirmojo siurblio darbinio rato spindulys yra 0,400 m, o antrojo 0,465 m, siurblio charakteristika yra:

$$\Delta H_1 = 331 - 0,451 \cdot 10^{-4} Q_1^2 = a_1 - b_1 Q_1^2;$$

$$\Delta H_2 = 374 - 0,451 \cdot 10^{-4} Q_2^2 = a_2 - b_2 Q_2^2.$$

Rasti siurblių sistemos charakteristikas, kai siurbliai sujungti nuosekliai ir lygiagrečiai.

Nuoseklus siurblių jungimas:

$$\begin{aligned} a &= a_1 + a_2 = 331 + 374 = 705 \text{ m}; \\ b &= (b_1 + b_2) = 0,451 \cdot 10^{-4} + 0,451 \cdot 10^{-4} = \\ &0,902 \cdot 10^{-4} \left(\frac{m}{(\text{m}^3/\text{h})^2} \right) \quad ; \\ \Delta H &= 705 - 0,902 \cdot 10^{-4} Q^2 = a - b Q^2. \end{aligned}$$

Lygiagretus siurblių jungimas:

$$\sqrt{\frac{331 - \Delta H}{0,451 \cdot 10^{-4}}} + \sqrt{\frac{374 - \Delta H}{0,451 \cdot 10^{-4}}} = Q, \text{ kai } \Delta H < 331 \text{ m}.$$

Siurblinės charakteristika $(Q - \Delta H)$ vadinama visų siurblių, sujungtų nuosekliai ir lygiagrečiai, atėmus įėjimo magistralės $(Q_{in} - \Delta H_{in})$, charakteristika.

3 pavyzdys. Tegu siurblinėje dirba du nuosekliai sujungti išcentriniai siurbliai, kurių charakteristikos yra:

$$\begin{aligned} \Delta H_1 &= F_1(Q) = 331 - 0,451 \cdot 10^{-4} Q^2 = a_1 - b_1 Q^2; \\ \Delta H_2 &= F_2(Q) = 374 - 0,451 \cdot 10^{-4} Q^2 = a_2 - b_2 Q^2. \end{aligned}$$

Taip pat žinoma, kad slėgio aukščio nuostoliai vidinėje siurblinės sistemoje yra:

$$\Delta H_s = F_s(Q) = 20 - 0,030 \cdot 10^{-4} Q^2 = a_s - b_s Q^2.$$

Sprendimas.

Siurblinės charakteristika ($Q - \Delta H$) yra lygi :

$$\begin{aligned}\Delta H_s &= F_1(Q) + F_2(Q) - \Delta H_s = 331 - 0,451 \cdot 10^{-4} Q^2 + \\ &374 - 0,451 \cdot 10^{-4} Q^2 - 20 + 0,030 \cdot 10^{-4} Q^2 = \\ &685 - 0,872 \cdot 10^{-4} Q^2.\end{aligned}$$

Jeigu žinoma siurblinės ($Q - \Delta H$) charakteristika $\Delta H = F(Q)$, tai vamzdyno pjūvyje $x = 0$ kraštinė sąlyga gali būti sąlyga:

$$\frac{p_s - p_{in}}{\rho g} = F(Q), \quad (4.5)$$

arba

$$\frac{p(x=0)}{\rho g} = \frac{p_{in}}{\rho g} + F(v) = \frac{p_{in}}{\rho g} = a - (3600S)^2 bv^2. \quad (4.6)$$

Pagrindinės siurblinės ir vamzdyno darbas įvertinamas panaudojant Bernulio lygtį:

$$\left(\frac{p}{\rho g} + z \right)_{x=0} - \left(\frac{p}{\rho g} + z \right)_{x=L} = \lambda(\text{Re}, \varepsilon) \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (4.7)$$

ir (4.6) išraišką, t. y.

$$\begin{cases} \frac{p_0}{\rho g} + z_0 - \frac{p_L}{\rho g} + z_L = \lambda(\text{Re}, \varepsilon) \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} \\ \frac{p_0}{\rho g} = \frac{p_{in}}{\rho g} + a - (3600S)^2 bv^2 \end{cases} \quad (4.8)$$

Eliminavę p_0 , gausime:

$$\frac{p_{in}}{\rho g} - \frac{p_L}{\rho g} + z_0 - z_L + a - (3600S)^2 bv^2 = \lambda(\text{Re}, \varepsilon) \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}. \quad (4.9)$$

Lygtis (4.9) vadinama slėgio aukščių balanso lygtimi. Žinodami įėjimo magistralės slėgį p_{in} ir slėgį vamzdyno gale p_L , galime surasti

tekėjimo greitį v . Iš lygties (4.9) tekėjimo greitis v nustatomas sprendžiant netiesinę algebrinę lygtį, pavyzdžiui, taikant iteracinį Niutono-Rafsono metodą,

$$\Delta v_k = -\frac{\Phi(v_k)}{\frac{d\Phi(v_k)}{dv}}, v_{k+1} = v_k + \Delta v_k; \quad (4.10)$$

čia

$$\Phi(v_k) = \frac{p_{in}}{\rho g} - \frac{p_L}{\rho g} + z_0 - z_L + a - (3600S)^2 b v_k^2 - \lambda(\text{Re}, \varepsilon) \frac{L}{D} \frac{v_k^2}{2g}. \quad (4.11)$$

Kai vamzdynas susideda iš tarpinių siurblių, kuriose nėra srauto nuvedimo (skystis transportuojamas iš siurblio į siurblių), galioja tokia lygčių sistema:

$$\begin{aligned} (z_1 + \Delta H_{in1}) + F_1(Q) - (z_2 + \Delta H_{in2}) &= \Delta H_{1-2}(Q) \\ (z_2 + \Delta H_{in2}) + F_2(Q) - (z_3 + \Delta H_{in3}) &= \Delta H_{2-3}(Q); \quad (4.12) \\ \text{-----} \\ (z_n + \Delta H_{inn}) + F_n(Q) - (z_L + \Delta H_{inL}) &= \Delta H_{n-L}(Q) \end{aligned}$$

čia $\Delta H_{k-(k+1)}(Q)$ – slėgio aukščio nuostoliai.

Sudėję visas (4.12) lygtis, gauname viso vamzdyno slėgių aukščių balanso lygtį:

$$\Delta H_{in1} - \Delta H_{inL} + \sum_{i=1}^n F_i(Q) = (z_L - z_1) + \sum_{i=1}^n \Delta H_{i-(i+1)}(Q). \quad (4.13)$$

Iš (4.13) lygties galima nustatyti vamzdyno našumą Q .

4.2 Išcentrinio siurblio matematinis modelis

Išcentrinio siurblio matematinis modelis sudarytas iš elektros variklio, kuris generuoja sukimo momentą M_v ir sukimo

momentas apkrauna siurblio ratą, išcentrinio siurblio charakteristikos $\Delta H_s = F(Q_s)$, tarpinės magistralės, kurios ilgis L_0 , papildomos ertmės, kurios tūris yra V_0 ir slėgis p_0 .

Nagrinėsime išcentrinio siurblio darbą kartu su elektros varikliu (4.2 pav.).

4.2 pav. Sistemos „elektros variklis – išcentrinis siurblys“ schema

Elektros variklio (asynchroninis arba nuolatinės srovės variklis) sukimo momento kitimas nustatomas iš lygties:

$$\dot{M}_v = c_v (\omega_0 - \omega_v) - d_v M_v; \quad (4.14)$$

čia $\dot{M}_v \equiv \frac{dM_v}{dt}$; ω_0 – elektros variklio sinkchroninis kampinis greitis;

ω_v – elektros variklio rotoriaus kampinis greitis; c_v , d_v – variklio parametrai.

Elektros variklio rotoriaus judėjimo lygtis yra:

$$I_v \dot{\omega}_v = M_v - M_{pas}; \quad (4.15)$$

čia I_v – variklio rotoriaus masių inercijos momentas; M_{pas} – elektros variklio pasipriešinimo momentas;

$$M_{pas} = \frac{S_0 \Delta p_\omega}{\eta} \frac{v}{\omega_v}; \quad (4.16)$$

čia S_0 – išcentrinio siurblio magistralės skerspjūvio plotas; v – skysčio tekėjimo greitis; η – siurblio naudingojo veiksmo koeficientas; Δp_ω – diferencialinis slėgis, išvystomas išcentrinio siurblio prie ω_v kampinio greičio.

Remiantis panašumo teorija, siurblio išvystomas diferencialinis slėgis Δp_ω prie siurblio sūkių ω_v , susietas su siurblio išvystomu diferencialiniu slėgiu $\Delta p_{\omega 0}$ prie siurblio sūkių ω_{v0} tokia priklausomybe:

$$\Delta p_\omega = \left(\frac{\omega_v}{\omega_{v0}} \right)^2 \Delta p_{\omega 0} \left(\frac{\omega_{v0}}{\omega_v} Q \right). \quad (4.17).$$

Remiantis (4.17) priklausomybe, išcentrinio siurblio su kintamu siurblio rato kampiniu greičiu ir elektros varikliu matematinis modelis yra lygus:

$$\begin{aligned} \dot{M}_v &= c_v (\omega_0 - \omega_v) - d_v M_v; \\ I_v \dot{\omega}_v &= M_v - \frac{S_0 \left(\frac{\omega_v}{\omega_{v0}} \right)^2}{\eta} \frac{v \Delta p_\omega}{\omega_v}; \end{aligned}$$

$$\Delta p_\omega = \left(\frac{\omega_v}{\omega_{v0}} \right)^2 F \left(v \frac{\omega_{v0}}{\omega_v} \right);$$

arba

$$\Delta p_\omega = \left(\frac{\omega_v}{\omega_{v0}} \right)^2 F \left(\frac{Q}{S_0} \frac{\omega_{v0}}{\omega_v} \right);$$

čia $F(Q = S_0 v, \omega_{v0})$ yra siurblio $Q_s - \Delta H_s$ charakteristika.

Panagrinėsimė hidraulinę sistemą, kuri sudaryta iš elektros variklio (asinkroninis variklis), išcentrinio siurblio, vamzdžių, kurių ilgiai ir skersmenys yra: L_{01} , L_1 ; D_{01} , D_1 , ir talpos, kurioje skysčio aukštis yra H_r .

4.3 pav. Hidraulinės sistemos: „elektros variklis – išcentrinis siurblys – vamzdynas – talpa“ schema

Hidraulinės sistemos pradiniai duomenys:

$$\text{Išcentrinis siurblys: } a = 165 \text{ m; } b = 129,6 \frac{\text{m}}{(\text{m}^3/\text{s})^2};$$

$$p_s = \rho g (a - bQ^2);$$

$$V_0 = 10 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3;$$

$$L_0 = 0.30 \text{ m};$$

$$D_0 = 0,30 \text{ m};$$

$$\eta = 0,90.$$

Skystis (nafta): $\rho = 862 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$; $\nu = 13,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$.

Vamzdynas: $L_{01} = 100 \cdot 10^3 \text{ m}$; $D_{01} = 0,540 \text{ m}$;

$L_{01} = 100 \cdot 10^3 \text{ m}$; $D_{01} = 0,540 \text{ m}$.

Talpa: $Vr = 500 \text{ m}^3$; $Hr(t=0) = 5,0 \text{ m}$; $Dr = 10 \text{ m}$.

a)

b)

c)

4.4 pav. Elektros variklio parametrų kitimas:

a – ω_v ; **b** – M_v ; **c** – M_{pas}

a)

b)

c)

4.5 pav. Išcentrinio siurblio parametrų kitimas:

a – Q_s ; b – Δp_ω ; c – p_0

a)

b)

c)

d)

e)

4.6 pav. Išcentrinio siurblio parametrų kitimas:

a – Q_{01} ; b – p_1 ; c – H_r ; d – v_{01} ; e – λ_{01}

5. VAMZDYNŲ ATSPARUMINIS SKAIČIAVIMAS

5.1 Konstrukcinių medžiagų stiprumo ir plastiškumo kriterijai

Eksplotacijos metu vamzdynas yra sudėtingame įtempimų būvyje. Jeigu vamzdynas būtų tik tempiamas arba gniuždomas (kirpiamas, sukimas), tai kiekviename taške pagrindiniai įtempimai būtų tarpusavyje lygūs ir priešingų krypčių, tada stiprumo sąlygos būtų labai paprastos. Šiais atvejais stiprumas bus užtikrintas, kai maksimalūs normaliniai arba tangentiniai įtempimai neviršytų atitinkamų leistinų įtempimų, kurie nustatomi iš eksperimentų, nustačius takumo ribas σ_T ir τ_T (plastinėms medžiagoms) arba stiprumo ribas σ_B ir τ_B (trapioms medžiagoms) ir atsargos koeficientą η . Pavyzdžiui, trapioms medžiagoms, esant tempimui arba gniuždymui, atsargos koeficientas lygus:

$$\sigma_{\max} \leq [\sigma] = \sigma_B / \eta \quad (5.1)$$

Tokia stiprumo sąlyga gaunama, kaiskaičiuojamieji įtempimai sutampa su leistiniais įtempimais, kurie gauti iš eksperimentų. Esant sudėtingam įtempimų būviui, stiprumo sąlygas galima nustatyti atlikus eksperimentus. Tačiau kiekviena nauja įtempimų kombinacija reikalauja atlikti naują eksperimentą. Pagrindinių įtempimų $\sigma_1 : \sigma_2 : \sigma_3$ kombinacijų skaičius yra be galo didelis, todėl ir eksperimentų skaičius labai didelis. Iš čia atsiranda poreikis kurti stiprumo teorijas, pagal kurias, esant sudėtingam įtempimų būviui, galima nustatyti sąlygas, kada medžiaga pereina prie pavoingo įtempimo būvio.

5.1 pav. Stiprumo sąlygos schema

Klasikinių hipotezių idėja yra ta, kad iš daugelio faktorių, nuo kurių priklauso medžiagos stiprumas, išrenkamas vienas. Hipotezės patikimumas tikrinamas eksperimentu.

Įvedus ekvivalentinių įtempimų σ_{ekv} sąvoką, stiprumo skaičiavimas, esant sudėtingam įtempimų būviui, suvedamas prie paprasto tempimo atvejo skaičiavimo.

Problemos sprendimas suvedamas prie to, kokius įtempimus ir kokią jų kombinaciją pasirinkti, esant bendrajam įtempimų būviui, pasirenkant stiprumo ir plastiškumo kriterijų. Hipotezės, kuriose užrašomas analitinis ryšis tarp pagrindinių ir ekvivalentinių įtempimų sudaro vadinamos stiprumo hipotezėmis.

Pirma stiprumo teorija – didžiausių normalinių įtempimų teorija (Lemie (1830 m.) ir Rekin (1890 m.): esant sudėtingam įtempimų būviui, ribinis įtempimų būvis atsiranda, kai didžiausi normaliniai įtempimai pasiekia įtempimus, esant vienaašiam įtempimų būviui.

Pagal šią teoriją, du kūnai turės vienodą stiprumą, jeigu jų didžiausi normaliniai įtempimai bus vienodi (5.1 pav.):

$$\sigma_{\max} = \sigma_1 = \sigma_{\text{ekv}}. \quad (5.2)$$

Esant sudėtingam įtempimų būviui, stiprumo sąlyga (5.2) turės tokį pavidalą:

$$\sigma_{sk}^I = \sigma_{\text{ekv}}. \quad (5.3)$$

Kai $|\sigma_3| > |\sigma_1|$, tai (5.3) išraiška turės pavidalą:

$$\sigma_{sk}^I = |\sigma_3| \leq [\sigma]. \quad (5.4)$$

Kai medžiagos leistini įtempimai tempimui ir gniuždymui yra skirtingi, tada:

$$\sigma_{sk}^I = \sigma_1 \leq [\sigma]_t, \quad \sigma_{sk}^I = |\sigma_3| \leq [\sigma]_g. \quad (5.5)$$

Pirmoji stiprumo teorija neįvertina:

- Tangentinių įtempimų;
- Dviejų paskutinių pagrindinių įtempimų (σ_2, σ_3) .

Pirmoji stiprumo teorija tinka labai trapioms medžiagoms.

Antra stiprumo teorija – didžiausių ašinių deformacijų teorija (Sen_Venanas (1885 m.): esant sudėtingam įtempimų būviui, stiprumas garantuojamas, jeigu didžiausia santykinė linijinė deformacija neviršija leistinos santykinės linijinės deformacijos, esant vienašiam tempimui. Stiprumo kriterijus – didžiausia santykinė deformacija $\varepsilon_{\max}$. Esant sudėtingam įtempimų būviui, $\varepsilon_{\max}$ sutampa su didžiausiu pagrindiniu įtempimu σ_1 , todėl

$$\varepsilon_{\max} = \varepsilon_1 = \frac{1}{E} [\sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3)], \quad (5.6)$$

čia μ – Puasono koeficientas; E – tamprumo modulis.

Esant ekvivalentinei įtempimų būsenai, didžiausia santykinė deformacija $\varepsilon_{\max}$ yra lygiagreti ekvivalentiniam įtempimui σ_{ekv} , t. y.

$$(\varepsilon_{\max})_{\text{ekv}} = \frac{1}{E} \sigma_{\text{ekv}}. \quad (5.7)$$

Du kūnai bus vienodai atsparūs, kai didžiausios santykinės deformacijos bus vienodos:

$$(\varepsilon_{\max})_{\text{ekv}} = \varepsilon_1 \text{ arba } \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_{\text{ekv}}. \quad (5.8)$$

Pasinaudoję stiprumo sąlyga ekvivalentiniam įtempimų būviui $\sigma_{\text{ekv}} \leq [\sigma]$ ir (5.8) išraiška, gauname antros stiprumo teorijos išraišką:

$$\sigma_{sk}^{\text{II}} = \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \leq [\sigma]. \quad (5.9)$$

Kai medžiagos leistini įtempimai tempimui ir gniuždymui yra skirtingi, stiprumo sąlyga:

$$\begin{aligned}\sigma_{sk}^{II} &= \sigma_1 - \mu(\sigma_2 + \sigma_3) \leq [\sigma]_t, \\ \sigma_{sk}^{II} &= \sigma_3 - \mu(\sigma_1 + \sigma_2) \leq [\sigma]_g.\end{aligned}\quad (5.10)$$

Antroji stiprumo teorija neįvertina:

– Tangentinių įtempimų.

Antroji stiprumo teorija tinka trapioms medžiagoms, o plastinėms medžiagoms ją naudoti nerekomenduojama.

Trečia stiprumo teorija – didžiausių tangentinių įtempimų teorija (Kulonas (1770 m.), Treska (1864), Gestas (1900): esant sudėtingam įtempimų būviui, ribinis įtempimų būvis atsiranda, kai didžiausi tangentiniai įtempimai viršija leistinus tangentinius įtempimus.

Esant ašiniam tempimui, didžiausi tangentiniai įtempimai lygūs $\tau_{\max} = \sigma_1 / 2$, o esant ekvivalentiniam įtempimų būviui, gauname $\tau_{\max} = \sigma_{\text{ekv}} / 2$.

Esant sudėtingam įtempimų būviui, didžiausi tangentiniai įtempimai yra lygūs:

$$\tau_{\max} = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2. \quad (5.11)$$

Trečios stiprumo teorijos išraiška yra lygi:

$$\sigma_{sk}^{III} = \sigma_1 - \sigma_3 \leq [\sigma]. \quad (5.12)$$

Trečioji stiprumo teorija:

– Neįvertina tarpinio pagrindinių σ_2 įtempimų.

Trečioji stiprumo teorija plačiai taikoma plastinėms medžiagoms.

Energetinėse stiprumo teorijose įvertinama įtempimų ir deformacijų įtaka įtempimų būviui, kadangi energetinių teorijų kriterijus yra sukaupta kūno potencinė energija tūrio vienetu, t. y. lyginamoji potencinė energija

Ketvirta stiprumo teorija – pirmoji energetinė teorija (Beltrami (1884 m.), Chejem (1919): esant sudėtingam įtempimų būviui, ribinis įtempimų būvis atsiranda, kai kūno lyginamoji potencinė energija pasiekia ar viršija leistiną lyginamosios potencinės energijos reikšmę.

Esant triašiam įtempimų būviui, kūno lyginamoji potencinė energija lygi:

$$U_0 = \frac{1}{2E} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]; \quad (5.13)$$

čia E – tamprumo modulis; μ – Puasono koeficientas.

Kadangi kūno lyginamoji potencinė energija visuomet teigiama ($U_0 \geq 0$), tai skirtumas tarp tempimo ir gniuždymo įtempimų neivertinamas, t. y.

$$[\sigma]_t = [\sigma]_g = [\sigma]. \quad (5.14)$$

Kūno elementui, esant ekvivalentiniam vienašiam įtempimų būviui, lyginamoji potencinė energija lygi:

$$(U_0)_{\text{ekv}} = \frac{\sigma_{\text{ekv}}^2}{2E}. \quad (5.15)$$

Sulyginę U_0 ir $(U_0)_{\text{ekv}}$, gauname stiprumo sąlygą:

$$\sqrt{[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]} = \sigma_{\text{ekv}}. \quad (5.16)$$

Pasinaudoję stiprumo sąlyga $\sigma_{\text{ekv}} \leq [\sigma]$, gauname ketvirtosios stiprumo teorijos sąlygos išraišką:

$$\sigma_{sk}^{IV} = \sqrt{[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\mu(\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]} \leq [\sigma]. \quad (5.17)$$

Penktoji stiprumo teorija – antroji energetinė teorija (Guber (1904 m.), Mizes (1919), Chenkin (1924): esant sudėtingam įtempimų būviui, ribinis įtempimų būvis atsiranda, kai dalis kūno lyginamosios potencinės energijos, kuri sunaudojama pakeisti kūno formą, viršija dalį leistinos lyginamosios potencinės energijos, kuri sunaudojama pakeisti kūno formą, reikšmę.

Žinoma, kad esant Puasono koeficiento reikšmei $\mu = 0.5$, deformuojamo kūno tūris nekinta. Todėl iš (5.16) sąlygos gauname penktosios stiprumo teorijos sąlygos išraišką:

$$\sigma_{sk}^V = \sqrt{\left[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1) \right]} \leq [\sigma]. \quad (5.18)$$

Esant plokščiam įtempimų būviui, penktosios stiprumo teorijos sąlygos išraiška:

$$\sigma_{sk}^V = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2} \leq [\sigma]. \quad (5.19)$$

Skaičiavimų rezultatai, gauti pagal ketvirtąją ir penktąją stiprumo teoriją, gerai sutampa su eksperimentiniais rezultatais, kai medžiaga yra plastinė.

Stiprumo sąlygą (5.18) rekomenduojama, kai kūnas yra gniuždomas, o stiprumo sąlygą (5.16), kai kūnas yra tempiamas.

Trapioms medžiagoms gauti rezultatai pagal ketvirtąją ir penktąją stiprumo teorijas ne visuomet derinasi su eksperimentiniais rezultatais.

Moro stiprumo teorija – Moro ribinių būvių teorija (Moras (1900 m.). Vidutinis pagrindinis tempimas mažai turi įtakos ribinio būvio atsiradimui, todėl jį galima neįvertinti. Moro stiprumo teorija įvertina medžiagos stiprumą tempimui bei gniuždymui.

Pagal Moro stiprumo teoriją ekvivalentiniai įtempimai lygūs:

$$\sigma_{ekv}^M = \sigma_1 - k\sigma_3, \quad (5.20)$$

čia $k = \sigma_{T,t} / \sigma_{T,g}$, (5.21)
 $\sigma_{T,t}$ – takumo riba tempimui;
 $\sigma_{T,g}$ – takumo riba gniuždymui.

Moro teorijos stiprumo sąlyga:

$$\sigma_1 - k\sigma_3 \leq [\sigma]_t, \quad (5.22)$$

čia $[\sigma]_t$ – leistini tempimo įtempimai.

Kai medžiaga trapi, tada

$$k = \sigma_{B,t} / \sigma_{B,g}, \quad (5.23)$$

čia $\sigma_{B,t}$ – stiprumo riba tempimui; $\sigma_{B,g}$ – stiprumo riba gniuždymui.

Atskiru atveju, kai $k=1$, gauname trečiąją stiprumo teoriją.

Jango stiprumo teorija (Jangas (1937 m.): esant sudėtingam įtempimų būviui, ribinis įtempimų būvis atsiranda, kai dalis kūno lyginamosios potencinės energijos, kuri sunaudojama pakeisti kūno formą, ir kita lyginamosios potencinės energijos dalis – pakeisti kūno tūrį, pasiekia ribinę lyginamosios potencinės energijos reikšmę, be to, energijos ribinė reikšmė yra tiesinė funkcija nuo vidutinio įtempimo σ_{vid} .

Jango teorijos stiprumo sąlyga:

$$\begin{aligned} &(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 + \\ &+ a(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + b(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \leq c, \end{aligned} \quad (5.24)$$

čia $a = \frac{6\tau_B^2 - 2\sigma_{B,t}\sigma_{B,g}}{\sigma_{B,t}\sigma_{B,g}}$; $b = \frac{6\tau_B^2(\sigma_{B,g} - \sigma_{B,t})}{\sigma_{B,t}\sigma_{B,g}}$; $c = 6\tau_B^2$, τ_B – šlities stiprumo riba.

Jango teorijos stiprumo sąlygoje įeina trys konstantos, todėl ši teorija yra bendresnė. Be to, kai $\sigma_{B,t} = \sigma_{B,g} = \sigma_B$ ir $\tau_B = \sigma_B / \sqrt{3}$, tai stiprumo sąlyga (5.23) sutampa su penktąja stiprumo teorija.

Balandino stiprumo teorija: esant sudėtingam įtempimų būviui, ribinis įtempimų būvis atsiranda, kai dalis kūno lyginamosios potencinės energijos, kuri sunaudojama pakeisti kūno formą, pasiekia ribinę lyginamosios potencinės energijos reikšmę, be to, energijos ribinė reikšmė yra tiesinė funkcija nuo vidutinio įtempimo σ_{vid} .

Pagal Balandino teoriją, ekvivalentiniai įtempimai lygūs:

$$\sigma_{ekv} = \frac{1+k}{2}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) + \frac{1}{2}\sqrt{(1+k)^2(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)^2 + 4k[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1\sigma_2 + \sigma_2\sigma_3 + \sigma_3\sigma_1)]}, \quad (5.25)$$

čia $k = \sigma_{B,t} / \sigma_{B,g}$.

Balandino teorijos stiprumo sąlyga:

$$\sigma_{ekv} \leq [\sigma]. \quad (5.26)$$

Kai $\sigma_{B,t} = \sigma_{B,g} = \sigma_B$, tai stiprumo sąlyga (5.25) sutampa su penktąja stiprumo teorija.

Bandymai rodo, kad Balandino stiprumo teorija duoda gerus rezultatus.

Idomi Goldenblato–Kupnovo stiprumo teorija, kurioje įvertinti daugelis tokioms teorijoms keliamų reikalavimų:

- Stiprumo (plastiškumo) kriterijus turi duoti irimo sąlygas (arba takumo pradžia), kai kūno elementas yra sudėtingame įtempimų būvyje;
- Kriterijaus išraiškoje turi būti įtempimų tenzoriaus komponentai ir medžiagos stipruminės charakteristikos;
- Kriterijus turi įvertinti medžiagos charakteristikas (takumo riba, stiprumo riba) esant tempimui ir gniuždymui;

Izotropinei medžiagai apibendrinta Goldenblato–Kupnovo teorija stiprumo sąlyga:

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\sigma_{B,t}} - \frac{1}{\sigma_{B,g}} \right) (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) + \left\{ \frac{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2 + 2\tau_{xy}^2 + 2\tau_{yz}^2 + 2\tau_{zx}^2}{2\tau_B^2} + \right. \\ \left. + \left[\frac{1}{4} \left(\frac{1}{\sigma_{B,t}} + \frac{1}{\sigma_{B,g}} \right)^2 - \frac{1}{\tau_B^2} \right] (\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)^2 \right\}^{1/2} \leq 1, \quad (5.27)$$

čia $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy} = \tau_{yx}, \tau_{yz} = \tau_{zy}, \tau_{zx} = \tau_{xz}$ – įtempimų tenzoriaus komponentai x, y, z koordinačių sistemoje.

Jeigu $\sigma_{B,t} = \sigma_{B,g}$ ir $\tau_B = \sigma_B / \sqrt{3}$, tai (5.27) išraiška sutampa su penktąja stiprumo teorija, o jeigu $\tau_B = \frac{\sigma_B}{\sqrt{2(1+\mu)}}$, tai gauname stiprumo sąlygą pagal ketvirtąją stiprumo teoriją.

Konstantos $\sigma_{B,t}, \sigma_{B,g}$ ir τ_B turi patenkinti šias sąlygas:

$$\left[\frac{9}{4} \left(\frac{1}{\sigma_{B,t}} + \frac{1}{\sigma_{B,g}} \right)^2 - \frac{3}{\tau_B^2} \right]^{1/2} \geq 0;$$

$$\sqrt{\frac{9}{4} \left(\frac{1}{\sigma_{B,t}} + \frac{1}{\sigma_{B,g}} \right)^2} - \frac{3}{\tau_B^2} \geq \frac{3}{2} \left| \frac{1}{\sigma_{B,t}} - \frac{1}{\sigma_{B,g}} \right|. \quad (5.28)$$

Ilgalaikio stiprumo kriterijai

Eksplotacijos metu vamzdynai apkraunami kintamomis apkrovomis. Tokių apkrovų šaltiniai gali būti: siurblių ir kompresorinių stočių darbas; antžeminiams vamzdynams vėjo apkrovos; o vamzdynai, gulintys upės dugne, apkraunami vandens srove; temperatūrų skirtuma(i)s.

Esant ciklinėms apkrovoms medžiagos irimas prasideda esant mažesnėms apkrovoms, nei esant statinėms apkrovoms.

Esant ciklinėms apkrovoms, medžiagos stiprumo mažėjimas dėl atsiradusių mikroplyšių vadinamas medžiagos nuovargiu, o jos gebėjimas priešintis irimui – patvarumu.

Indeksas r nuovargio riboje charakterizuoja apkrovimo ciklo asimetriją ir nustatomas santykiu $\sigma_{\min} / \sigma_{\max}$. Kai $\sigma_{\max} = -\sigma_{\min}$, tai $r = -1$ ciklas vadinamas simetriniu. Kai $\sigma_{\min}$ arba $\sigma_{\max}$ lygūs, tai ciklai vadinami pulsaciniais ir jiems taikomas indeksas: $r = 0$ arba $r = \infty$. Ciklai, turintys vienodus rodiklius r , vadinami panašūs. Bet kokiame apkrovimo cikle galime išskirti pastovų įtempimą σ_m ir kintamą dalį (amplitudę) σ_a :

$$\begin{aligned} \sigma_m &= \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}; \\ \sigma_a &= \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}. \end{aligned} \quad (5.29)$$

Nuovargio riba σ_{-1} yra nepastovus dydis, skirtingų metalų nuovargio riba skirtinga:

- Plieno $\sigma_{-1} = (0.4 \div 0.5)\sigma_B$;
- Spalvotųjų lydinų $\sigma_{-1} \approx (0.25 \div 0.5)\sigma_B$.

Kartais iš anksto yra žinoma, kad tam tikra konstrukcija per savo tarnavimo laiką bus apkrauta mažesniu apkrovos ciklų skaičiumi. Tada leistinus įtempimus galima gauti taip: pagal žinomą ciklų skaičių iš nuovargio diagramos (5.3 pav.) nustatomi ribiniai įtempimai σ_{rib} . Tada leistini įtempimai lygūs:

$$[\sigma] = \frac{\sigma_{rib}}{\eta_r}, \quad (5.30)$$

čia η_r – nuovargio stiprumo koeficientas.

5.2 pav. Ciklinio apkrovimo grafikas

5.3 pav. Nuovargio diagrama

Esant kintamoms apkrovoms, konstrukcijoje nuovargio pažeidimai kaupiasi. Inžinerinėje praktikoje naudojama apytiksli teorija, pagal kurią sudedami visi pažeidimai. Pagal tokią teoriją, konstrukcija irsta, kai konstrukcijoje negrįžtamai susikaupia tam tikras defor-

macijos energijos dydis A . Dydis A proporcingas apkrovimo ciklų skaičiui:

$$a_i / A = n_i / N_i \text{ arba } a_i = A n_i / N_i,$$

čia a_i – negrįžtama deformacijos energija, kuri sukaupta po n_i apkrovimo ciklų;

A – negrįžtamas susikauptos deformacijos energijos kiekis per N_i apkrovos ciklų;

n_i / N_i – statinio nuovargio sumažinimas veikiant n_i apkrovos ciklams.

Irimo metu

$$\sum_{i=1}^v a_i = \sum_{i=1}^v A \frac{n_i}{N_i} = A. \quad (5.31)$$

Paskutinė lygybė įmanoma, kai $\sum_{i=1}^v n_i / N_i = 1$, čia v – atskirų apkrovimo lygių skaičius.

Kadangi kintamų apkrovų dydžiai kinta plačiose ribose, ši suma kinta nuo 0.5 iki 3. Jeigu tiksli suma nežinoma, tikslinga priimti 0.5.

Konstrukcijos ilgaamžiškumas (metais) gali būti paskaičiuotas taip:

$$t = \frac{0.5}{\sum_{i=1}^v \frac{n_i}{N_i}}. \quad (5.32)$$

5.2 Vamzdynų stipruminis skaičiavimas

Projektinio skaičiavimo paskirtis – vamzdyno stiprumo užtikrinimas (SNIP 11–45–75).

1929 m. N. Chocialov pirmas paskaičiavo užtvankos stiprumo atsargą įvertindamas stochastinį medžiagų savybių pobūdį.

Rusijoje naudojama metodika, kurioje įvertinamas ribinis būvis, o kitose šalyse – leistini įtempimai.

Rusiškose statybų normose ir taisyklėse SNIP 11–45–75, naudojama didžiausių normalinių įtempimų teorija, kai ašiniai įtempimai $\sigma_t \geq 0$ ir energetinė stiprumo teorija, kai $\sigma_t < 0$.

JAV, Vokietijoje, Kanadoje, Anglijoje – vamzdžio medžiagos stiprumo charakteristika yra sąlyginė stiprumo riba. Prancūzijoje – takumo ir stiprumo ribos.

Pagal statybų normas ir taisykles dujotiekio vamzdžio sienelės storis lygus, kai vamzdžio išorinis diametras D_{is} 1400 mm, o darbinis normatyvinis slėgis $p = 10$ MPa:

$$\delta = \frac{npD_{is}}{2(R_1 + np)}; \quad (5.33)$$

čia n – slėgio padidėjimo koeficientas;

R_1 – skaičiuojamieji įtempimai:

$$R_1 = \frac{R_1^n m}{K_1 \cdot K_p}, \quad (5.34)$$

R_1^n – priimti minimalūs laikini įtempimai σ_e pagal standartus ar technines sąlygas;

m – darbo sąlygų koeficientas;

K_1 – saugos koeficientas, priklausantis nuo skaičiuojamosios medžiagos ($K_1 = 1,34 \div 1,55$);

K_p – patikimumo koeficientas.

$$\delta = \frac{npdD_n}{2(\varphi_1 R_1 + np)}; \quad (5.35)$$

čia φ_1 – koeficientas, įnertinantis dviašį įtempimo būvį:

$$\varphi_1 = \sqrt{1 - 0,75 \left(\frac{\sigma_{isn}}{R_1} \right)^2} - 0,5 \frac{\sigma_{isn}}{R_1}; \quad (5.36)$$

σ_{isn} – absoliutūs ašiniai gniuždymo įtempimai, atsirandantys dėl skaičiuojamųjų apkrovų.

Minimalus vamzdžio sienelės storis turi būti:

$$\delta > \min \left(4 \text{ mm}; \frac{D_{is}}{140} \right). \quad (5.37)$$

Požeminių vamzdžių stiprumo patikrinimas atliekamas pagal formulę:

$$\sigma_{isn} = \varphi_2 R_1; \quad (5.38)$$

čia φ_2 koeficientas, įnertinantis dviašį įtempimo kūną:

$$\varphi_2 = \sqrt{1 - 0,75 \left(\frac{\sigma_{apskr.n}}{R_1} \right)^2} - 0,5 \frac{\sigma_{apskr.n}}{R_1}; \quad (5.39)$$

čia σ_{isn} – apskritiminiai įtempimai,

$$\sigma_{apskr.} = \frac{p D_V}{2\delta}; \quad (5.40)$$

čia D_V – vidinis vamzdžio skersmuo.

Tiesialinijinių vamzdžių išilginiai įtempimai lygūs:

$$\sigma_{isl} = -\alpha_T E \Delta T + 0,25 \frac{np D_V}{2\delta}$$

čia α_T – linijinio plėtimosi koeficientas;

E – tamprumo modulis;

ΔT – skaičiuojamasis tempimo skirtumas, $\Delta T > 0$ (kai šildomas).

Požeminių vamzdinių deformacijos tikrinimas pagal schemą:

$$\sigma_{apskr.}^n \leq \frac{c}{K_p} R_2^n,$$

$$\sigma_{apskr.}^n \leq \varphi_3 \frac{c}{K_p} R_2^n; \quad (5.41)$$

čia $\sigma_{apskr.}^n$ – apskritiminiai įtempimai nuo vidinio slėgio,

$$\sigma_{is}^n = \frac{pD_V}{2\delta}; \quad (5.42)$$

c – koeficientas pagal СНиП 11–45–75;

σ_{is}^n – maksimalūs sumariniai išilginiai įtempimai, įvertinant vidinį slėgį, temperatūrų skirtumus ir vamzdžio tamprųjį lenkimą:

$$\sigma_{is}^n = 0,15 \frac{pD_V}{\delta}, -\alpha_T E \Delta T \pm \frac{ED_V}{\rho} \quad (5.43)$$

φ_3 – koeficientas, įvertinantis dviašį įtempimų būvį,

$$\varphi_3 = \begin{cases} 1, & \sigma_{is}^n \geq 0 \\ \sqrt{1 - 0,75 \left(\frac{\sigma_{apskr}}{\frac{c}{K_p} R_2^n} \right)^2} - 0,5 \frac{\sigma_{apskr}^n}{\frac{c}{K_p} R_2^H} \end{cases} \quad (5.44)$$

Norint nustatyti sienelės storį reikia atlikti iteracinį procesą pirmoje iteracijoje $\varphi_1 = 1$, pagal (5.9) randami σ_{is}^n . Kai $\sigma_{is}^n \geq 0$, tai sienelės storis prilyginamas.

5.3 Vamzdyno patvarumas

5.3.1 Vamzdyno patvarumo įvertinimas

Svarbiausi parametrai, apibūdinantys vamzdyno stiprumą, yra: vidinis slėgis; medžiagos stipruminės charakteristikos; geometriniai parametrai.

Įvesime vamzdyno irimo funkciją:

$$\eta = S - N; \quad (5.45)$$

čia S – leistina apkrova; N – veikianti apkrova.

Vamzdynas tinkamas eksploatuoti, kai $\eta > 0$.
Jeigu priimtume apkrovą – vidinį slėgį, tada:

$$\eta = p_{sk} - p_d; \quad (5.46)$$

čia p_{sk} – max slėgis, kurį gali išlaikyti; p_d – darbinis slėgis.

Kai irimas – plastinis, tada

$$p_{sk} = \frac{2\sigma_T \delta}{D_v}, \quad (5.47)$$

o esant trapiam irimui

$$p_{sk} = \frac{2\sigma_{BS} \delta}{D_v}; \quad (5.48)$$

čia σ_{BS} – sąlyginė stiprumo riba. Šios formulės neįvertina įtempimo būvio įtakos deformavimui ir vamzdyno geometrijos kitimą irimo metu.

Mokslininkai pasiūlė įvertinti tampriai plastinės medžiagos savybes:

A. Monoškov:
$$p_{sk} = \frac{4\sigma_{BS}}{(\sqrt{3})^{1+\varepsilon_{\max}}} \cdot \frac{\delta}{D_v}, \quad (5.49)$$

M. Ziuzina:
$$p_{sk} = \frac{4A}{(\sqrt{3})^{n+1}} \cdot \frac{\delta}{D_v} \left(\frac{n}{e}\right)^n, \quad (5.50)$$

$$p_{sk} = \sigma_{BS} \left(\frac{0,25}{\varepsilon_{\max} + 0,227} \right) \left(\frac{e}{\varepsilon_{\max}} \right)^{\varepsilon_{\max}} \cdot \frac{2\delta}{D_v + \delta}; \quad (5.51)$$

čia $\varepsilon_{\max}$ – galutinė liekamoji deformacija;

$$A = \frac{\sigma_{BS}}{(\varepsilon_{\max})^n};$$

$$n = \frac{\lg\left(\frac{\sigma_{BS}}{\sigma_{0,2}}\right)}{\lg\left(\frac{\varepsilon_{\max}}{\varepsilon_{0,2}}\right)},$$

$\varepsilon_{0,2} = 0,002$ – liekamoji deformacija, kai $\sigma_{0,2}(\sigma_T)$.

5.1 lentelė

Plienai	$\sigma_{0,2} \cdot 10^8$, Pa	$\sigma_{BS} \cdot 10^8$, Pa	$\varepsilon_{\max}$, %	$\sigma_{BS} / \sigma_{0,2}$
304SS	2,20	5,77	0,585	2,62
A516	3,63	5,23	0,189	1,44
A517	8,07	8,68	0,085	1,08

5.2 lentelė. Maksimalus slėgis

Plienai	δ , mm	D_{is} , mm	$p_{sk \cdot 10^3}$, N/cm ²				$p_{sk \cdot 10^3}$ N/cm ² ekspert.
			Formulės				
			7	6	4	5	
304SS	12,8	384	$\frac{2,82}{-13}$	$\frac{2,96}{8,47}$	$\frac{4,12}{2,72}$	$\frac{3,45}{6,53}$	3,24
A516	13,5	384	$\frac{3,52}{-3,56}$	$\frac{3,76}{3,2}$	$\frac{3,95}{8,32}$	$\frac{4,12}{12,7}$	3,65
A517	12,8	378	$\frac{6,55}{2,17}$	$\frac{6,87}{7,7}$	$\frac{6,31}{-1,02}$	$\frac{6,95}{9,1}$	6,37

5.3.2 Vamzdžio ribinio būvio tikimybinių įvertinimas

Tegu vamzdžio patvarumo funkcija

$$\eta = \frac{2\sigma_{BS}\delta}{D_{is}} - p_d. \quad (5.52)$$

Formulėje (5.52) parametrai yra atsitiktiniai dydžiai. Funkcija η yra netiesinė, o parametų kitimas nuo savo vidutinių reikšmių nedi-

delis. Tada (5.52) galima išskleisti Teiloro eilute parametrų vidurkių atžvilgiu:

$$\eta = \frac{2\sigma_{BS0}\delta_0}{D_{is0}} + \frac{2\delta_0}{D_{is0}}(\sigma_B - \sigma_{BS0}) + \frac{2\sigma_{BS0}}{D_{is0}}(\delta - \delta_0) - \\ - \frac{2\sigma_{BS0}\delta_0}{D_{is0}^2}(D_{is} - D_{is0}) - p_d, \quad (5.53)$$

čia $\sigma_{BS0}, \delta_0, D_{is0}$ – matematinės viltys (vidurkiai).

5.51 formulę galima užrašyti:

$$\eta = \sum_{k=1}^n a_k X_k; \quad (5.54)$$

čia a_k – koeficientas; X_k – atsitiktinis dydis; n – atsitiktinis dydžių skaičius. Tegu visi $X_1, X_2, \dots, X_k$ pasiskirsto pagal normalinį dėsnį, todėl vamzdyno suirimo tikimybė yra:

$$P_{ir} = \frac{1}{2} - \Phi(\gamma), \quad (5.55)$$

čia $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-t^2/2} dt$ – Laplaso funkcija;

$\gamma = \frac{1}{\omega_\eta}$ – rangos charakteristika (A. Ržanicinas), kuri parodo

standartų, telpančių intervale $0 - \eta$, skaičių.

$$\omega_\eta = \frac{\xi_\eta}{\eta_0}; \quad (5.56)$$

ω_η – koeficientas, įvertinantis patvarumo funkcijos kitimą (variacijos koeficientas).

$$\eta_0 = \sum_{k=1}^n a_k X_{0k}; \quad (5.57)$$

η_0 – patvarumo funkcijos matematinė viltis;

$$\xi_\eta = \sqrt{(\eta - \eta_0)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n a_i a_k K_{X_i X_k}}; \quad (5.58)$$

ξ_n – vidutinė kvadratinė η nuokrypa.

Tada rangos charakteristika:

$$\gamma = \frac{\sum_{k=1}^n a_k X_k}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n a_i a_k K_{X_i X_k}}}. \quad (5.59)$$

Iš eksperimentinių duomenų nustatyta, kad ryšio tarp δ ir σ_{BS} nėra, t. y. $K_{\delta\sigma_{BS}} = 0$.

5.4 pav. Patvarumo funkcijos F_η – tikimybės skirstinio tankio funkcija

Faktoriai, nuo kurių priklauso vamzdžio stiprumas. Nustatyta, kad didėjant bandinio tūriui stiprumo riba σ_{BS} , o kartu ir stiprumas mažėja.

Nustatysime mastelio faktoriaus koeficientą. Sakykime, kad mastelio faktorius pasiskirsto pagal normalinę dėsnį.

Vamzdžio irimo tikimybę P_v galima išreikšti per bandinio irimo tikimybę

$$P_v = 1 - [1 - P_b]^{V_v/V_b}; \quad (5.60)$$

čia V_v – vamzdžio tūris; V_b – bandinio tūris.

Pažymėsime patvarumo tikimybę $1 - P_b = \zeta_b$, tada vamzdžio patvarumo tikimybė

$$\zeta_v = \zeta_b^{\frac{V_v}{V_b}}. \quad (5.61)$$

Vamzdžio stiprumo ribos matematinė viltis atitinka bandinio stiprumą esant tikimybei

$$\zeta_b^* = 0,5^{\frac{V_b}{V_v}}, \quad (5.62)$$

t. y.

$$\sigma_{BS0(v)} = \sigma_{BS0(b)}^{\partial}, \quad (5.63)$$

$$\text{čia } \partial = 1 - t_{\zeta^*} \omega_{\sigma_{BS(b)}}, \quad (5.64)$$

∂ – mastelio koeficientas,

$\omega_{\sigma_{BS(b)}}$ – bandinio stiprumo ribos variacijos koeficientas;

t_{ζ^*} – nustatomas iš lygties:

$$0,5 + \Phi(t_{\zeta^*}) = \zeta_b^* = (0,5)^{\frac{V_b}{V_v}}. \quad (5.65)$$

$\Phi(t_{\zeta^*})$ – Laplaso funkcija.

Iš eksperimentų gauto vamzdžio $\varnothing$ 720 mm, $\varnothing$ 820 mm, $\varnothing$ 1220 mm $\partial = 0,84; 0,84; 0,85$. Kitas faktorius, kuris įtakoja medžiagos stiprumo ribą σ_{BS} – medžiagos nevienalytiškumas, kurį įvertinsime vienalytiškumo koeficientu, $k_{\text{vien.}}$.

$$k_{\text{vien.}} = 1 - K_T^{\infty} \omega_{\sigma_{BS0(b)}}, \quad (5.66)$$

K_T^{∞} – tolerantiškumo riba generalinei imčiai ($n = \infty$), apibūdinan-

ti, kiek vidutinių kvadratinų nuokrypų reikia atimti iš vamzdžio stiprumo ribos matematinės vilties, kad irimo tikimybė būtų $1 - P(T)$

$P(T)$ – patvarumo tikimybė.

K_T^∞ – nustatoma iš

$$\Phi(K_T^\infty) = P(T) - 0,5 \quad (5.67)$$

Jeigu stiprumo ribos σ_{BS} pasiskirstymas gautas iš imties n , tai

$$K_T^n = K_T^\infty \left(1 + \frac{tq}{\sqrt{n}} - \frac{5t_q^2 + 10}{12n} \right), \quad (5.68)$$

čia q – gedimų tikimybė; t_q – randamos

$$\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{tq}^{\infty} e^{-t^2/2} dt = 1 - q. \quad (5.69)$$

5.3 lentelė

P(T)	99%	99,9%	99,99%
K_T^∞	2,33	3,10	3,72

Stiprumas, kai duota patvarumo tikimybė, neturi viršyti:

$$\sigma = k_{\text{vien.}} \cdot \partial \cdot \sigma_{BS0(b)}. \quad (5.70)$$

Pavyzdys.

Žinomas vamzdžio diametras $\varnothing 1220 \times 14,5$ mm, patvarumo tikimybė $P(T) = 99\%$.

$$\sigma_{BS} = k_{\text{vien.}} \cdot \partial \cdot \sigma_{BS0} = 0,8361 \cdot 0,85 \cdot 5,771 \cdot 10^4 = 4,1 \cdot 10^3 \frac{N}{\text{cm}^2} = 41 \text{ MPa}.$$

Tai 28% mažiau negu vidutinė σ_{BS0} reikšmė, gauta eksperimentiniu būdu.

Vamzdžio sąlyginis atsargos koeficientas:

$$\vartheta = \frac{\sigma_{BS0}}{\sigma_{aps0}} = \frac{2\delta_0\sigma_{BS0}}{D_{v0}p_{d0}}, \quad (5.71)$$

čia σ_{aps0} ; δ_0 ; D_{is0} ; p_{d0} – apskritiminių įtempimų, sienelės storio, vidinio diametro ir darbinio slėgio matematinės viltys.

Saugos charakteristika:

$$\gamma = \frac{\vartheta - 1}{\sqrt{\vartheta^2 \left(\omega_{\sigma_{BS}}^2 + \omega_{\delta}^2 + \omega_D^2 \right) + \omega_{p_d}^2}}; \quad (5.72)$$

čia $\omega_{\sigma_{BS}}$, ω_{δ} , ω_D – atitinkamų dydžių variacijos koeficientai.

Priklausomai nuo atsargos koeficiento ϑ , saugos charakteristika turi skirtingas reikšmes.

5.4 lentelė

Vidutinė parametro reikšmė (matematinė viltis)	Standartas arba vidutinis kvadratinis nuokrypis	Variacijos koeficientas
$\sigma_{BS0} = 582 \text{ MPa}$	$\zeta_{\sigma_{BS}} = 22 \text{ MPa}$	$\omega_{\sigma_{BS}} = 0,0381$
$\delta_0 = 11,89 \text{ mm}$	$\zeta_{\delta} = 0,2135 \text{ mm}$	$\omega_{\delta} = 0,01795$
$D_{v0} = 119,6 \text{ mm}$	$\zeta_{D_v} = 2,343 \text{ mm}$	$\omega_{D_v} = 0,00196$

Plienas 17G1C 1220x12 mm.

Kai $\sigma_{apsk} = 0,65\sigma_{BS}$, tai $\vartheta = 1,53$, $\gamma = 9,77$, $P_{irim} = 1,93 \cdot 10^{-13}$, tada patvarumo tikimybė $P(T) = 0,999999999$.

Vamzdynas be defektų turi labai didelį patikimumo lygį.

5.3.3 Vamzdyno sudėtingas įtempimo būvis

Esant sudėtingam įtempimų būviui vamzdyje veikia apskritiminiai σ_{aprk} ir σ_{as} įtempimai. Tada panaudojant energetinę stiprumo teoriją vamzdžio patvarumo funkcija bus lygi:

$$\eta = \frac{2\sigma_{Br}\delta}{D_v} - p_d \sqrt{1 - \mu + \mu^2 + \beta_2 + (1 - 2\mu)\beta}, \quad (5.73)$$

čia μ – Puasono koeficientas;

$$\beta = \frac{\sigma_{\text{as}}^0}{\sigma_{\text{aprk}}};$$

σ_{as}^0 – determinuoti ašiniai įtempimai.

Saugos charakteristika pagal energijos stiprumo teoriją:

$$\gamma_e = \frac{\vartheta - \sqrt{1 - \mu + \mu^2 + \beta^2 + (1 - 2\mu)\beta}}{\sqrt{\vartheta^2 (\omega_{\sigma_{BS}}^2 + \omega_{D_v}^2 + \omega_{\delta}^2) + \omega_{p_d}^2 [1 - \mu + \mu^2 + \beta^2 + 1 - 2\mu] \beta}} \quad (5.74)$$

5.3.4 Įtempimų koncentracijos ir vidinio slėgio įtaka vamzdyno ruožo patikimumui

Įtempimų koncentracijos koeficientas

$$k = \frac{\sigma_{\text{konc}}}{\sigma_{\text{be def}}}.$$

čia σ_{konc} – įtempimai koncentratuose; $\sigma_{\text{be def}}$ – įtempimai be defektų.

Vamzdžio ruožo su defektu atsargos koeficientas

$$\vartheta_{\text{def}} = \frac{1}{k} \frac{\sigma_{BS}}{\sigma_{\text{be def}}} = \frac{1}{k} \vartheta_{\text{be def}}. \quad (5.75)$$

$\mathfrak{G}_{be\ def.}$ – atsargos koeficiento be defekto charakteristika:

$$\gamma_D = \frac{\frac{\gamma_{be\ def.}}{k} - 1}{\sqrt{\frac{\mathfrak{G}_{be\ def.}^2}{k^2} (\omega_{\sigma_{BS}}^2 + \omega_{\delta}^2 + \omega_{D_v}^2) + \omega_p^2}} \quad (5.76)$$

Iš (5.75) seka, kad kai $k = \mathfrak{G}_{be\ def.}$ irimo tikimybė bus lygi 0,5.

Irimo tikimybė esant defektui nustatoma taip pat kaip ir be defekto, tik atsargos koeficientas ir saugos charakteristika bus lygios

$$\mathfrak{G}_D = \frac{\mathfrak{G}_{be\ def.}}{k}; \gamma_D = \gamma_{be\ def.} \left(\frac{\mathfrak{G}_{be\ def.}}{k} \right)$$

5.3.5 Vamzdyno stiprumo skaičiavimo metodika pagal patikimumo lygį

1. Vamzdyno ruožo irimo tikimybės nustatymas

Vamzdyną sudaro nuosekliai sujungti vamzdžiai, dirbantys vienodomis sąlygomis, tada nesuirimo tikimybė lygi:

$$P(T) = (1 - P_{\text{irim}})^n, \quad (5.77)$$

čia P_{irim} – vieno vamzdžio irimo tikimybė; n – nuosekliai sujungtų vamzdžių skaičius.

Iš (5.77) vamzdžio suirimo tikimybė lygi

$$p_{ir} \leq 1 - \sqrt[n]{P(T)}. \quad (5.78)$$

Išskleisime (5.78) išraišką Teiloro eilute:

$$P_{\text{irim}} \leq [1 - (T)] + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{n^2} \right) [1 - P^2(T)] + \dots \quad (5.79)$$

Nustačius P_{irim} pagal (5.79) iš 5.2 pav. nustatome leistiną rangos charakteristiką $\gamma \cdot l_{\text{leist}}$ Iš 5.1 pav. nustatome leistiną atsargos koeficiento $\vartheta_{be \text{ def}/k}$ reikšmę.

Pvz.: vamzdyno ilgis 40 km; vamzdžio ilgis 12 m;
 $n = 40000 / 12 = 3,3 \cdot 10^3$

5.5 lentelė

$P_1(T) = 0,99$	Pagal (5.76) $P_{\text{irim}} \leq 3 \cdot 10^{-7}$
$P_1(T) = 0,999$	$P_{\text{irim}} \leq 3 \cdot 10^{-8}$

Tegu vamzdynas – sistema nuosekliai sujungtų vienodo ilgio ruožų, kurių irimo tikimybė paskaičiuota pagal (5.79).

Viso vamzdyno nesuirimo tikimybė yra $P \sum T$, tada suirimo tikimybė:

$$P_{\text{irim}}(\zeta) \leq \frac{1}{n} [1 - P(\zeta T)] + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n^2} \right) [1 - P(\zeta T)] + \quad (5.80)$$

2. Vidinio slėgio priklausomybė nuo vamzdyno patikimumo lygio

Vamzdyno pagrindinė apkrova – vidinis slėgis. Vamzdyje be defekto veikiant slėgiui, atsiranda normaliniai apskritiminiai įtempimai $\sigma_{\text{apsk.}n}$. Defekto vietoje šie įtempimai padidėja iki

$$\sigma_{\text{apsk.}def} = k \sigma_{\text{apsk.}n}; \quad (5.81)$$

čia k – įtempimų koncentracijos koeficientas.

Vamzdis pradeda irti, kai

$$k \sigma_{\text{apsk.}n} = \sigma_{BS}. \quad (5.82)$$

Tegu visame vamzdyje slėgis p vienodas. Bet defektai išilgai

vamzdyno bus skirtingi. Jeigu norime užtikrinti vienodą vamzdyno patikimumo lygį, turi būti patenkinta sąlyga:

$$\gamma \left(\frac{Jn}{k} \right)^3 \gamma_{\text{leist}} [P(T)], \quad (5.83)$$

čia $P(T)$ – vamzdyno patikimumo lygis; $\gamma_{\text{leist}} [P(T)]$ – rangos charakteristika. Įtempimų koncentracijos koeficientui įvedamas apribojimas

$$K \leq \frac{\vartheta_{be \text{ def}}}{\vartheta_{\text{leist}}}, \quad (5.84)$$

čia ϑ_{leist} – leistinas stiprumo atsargos koeficientas, kai žinoma saugos charakteristika $\gamma_{\text{leist}} [P(T)]$;

$$\vartheta_{be \text{ def}} = \frac{\sigma_{BS0}}{\sigma_{\text{apsk.}n0}};$$

σ_{BS0} – stiprumo ribos matematinė viltis; $\sigma_{\text{apsk.}n0}$ – apskr. įtempimų matematinė viltis;

$$\vartheta_{be \text{ def}} = \frac{\sigma_{BS0}}{\sigma_{T0}} \cdot \frac{\sigma_{T0}}{\sigma_{\text{apsk.}n0}} = \vartheta_T m, \quad (5.85)$$

čia σ_{T0} – takumo ribos matematinė viltis; ϑ_T – takumo ribos atsargos koeficiento matematinė viltis; m – atsargos koeficientas pagal vidinį slėgį.

Tada (5.84) bus lygi:

$$K \leq \frac{\vartheta_T m}{\vartheta_{\text{leist}}}. \quad (5.86)$$

Išvada: leistinas įtempimų koncentracijos koeficientas keičiasi kintant vamzdyno medžiagos parametrams ir patikimumo lygiui.

Vamzdyno stiprumo skaičiavimas

Duota:

$$D_v = 1200 \text{ mm};$$

$$l_v = 12 \text{ m};$$

$$L = 48 \text{ km};$$

$$\sigma_{BS0} = 5,77 \cdot 10^4 \text{ N/cm}^2;$$

$$\sigma_{T0} = 3,8 \cdot 10^4 \text{ N/cm}^2;$$

$$p_1 = 7,5 \text{ MPa} = 750 \frac{\text{N}}{\text{cm}^2};$$

$$P(T) = 0,95; 0,99; 0,999; 0,9999;$$

$$\partial = 0,85 \text{ mastelio koeficientas};$$

$$\omega_{\sigma BS} = 0,042;$$

$$K = 1,3 \text{ (suvirinimo siūlė)}.$$

5.6 lentelė

$K_T^\infty =$	1	2,33	3,1	3,72
$P(T) =$	0,95	0,99	0,999	0,9999

Apskritiminiai įtempimai: $\sigma_{\text{ap.sk}} = k_{\text{vien}} \cdot \partial \cdot \sigma_{BS0};$

$$1) \quad k_{\text{vien}}^{(P(T))} 1 - K_T^\infty \omega_{\sigma BS} = ?$$

$$2) \quad \sigma_{\text{ap.sk}}(P(R)) = k_{\text{vien}} \cdot \partial \cdot \sigma_{BS0} = ?$$

$$3) \quad \delta(P(T)) = \frac{P_{\text{band}} \cdot D_v}{2\sigma_{\text{ap.sk}}} = ?$$

$$P_{\text{band}} = 1,3p.$$

$$4) \quad \sigma_{\text{apsk}}[P(T)] = \frac{p \cdot D_v}{2\delta[P(T)]};$$

$$5) \quad \vartheta = \sigma_{BS0} / \sigma_{\text{apsk}0};$$

$$\vartheta(P(T)) = \frac{\sigma_{BS0}}{\sigma_{\text{apsk}}[P(T)]} = ?$$

$$6) \quad \gamma = \frac{\vartheta(P(T)) - 1}{\sqrt{\vartheta^2(\omega_{BS}^2 + \omega_{\delta}^2 + \omega_{D_v}^2) + \omega_{p_d}^2}} = ?$$

Vamzdynas be defektų:

$$7) \quad \vartheta_D = \frac{\vartheta_{\text{be def}}}{k}.$$

$$\text{Pagal } P(T) = P(\vartheta_D) \rightarrow \gamma = (\vartheta_D)$$

Viso vamzdyno patikimumo lygis: $L = 48 \text{ km}$, $L_v = 12 \text{ m}$.

$$P_L(\Sigma T) = [1 - (1 - P(T))]^n;$$

$$n = \frac{L}{l_v} = \frac{48000}{12} = 40 \cdot 10^3 \text{ (vamzdžių skaičius).}$$

$$P_{\text{irim}} = \frac{1}{n} [1 - P(\zeta T)] + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{n} + \frac{1}{n^2} \right) [1 - P(\Sigma T)] + \dots$$

5.7 lentelė. $\gamma = \gamma(P_{\text{irim}})$

$\lg P_{\text{irim}}$	γ
-6	5
-5	4,1
-4	3,8
-3	3,0
-2	2,2
-1	1,5
-0,3	1,0

ϑ	γ
1	1
1,2	3,5
1,4	6,0
1,6	8,0
1,8	10,0

a) $\gamma = \gamma(\lg P_{\text{irim}})$

a) $\gamma = \gamma(\vartheta)$

b) $\lg P_{\text{irim}} = F(\gamma)$

b) $\vartheta = \vartheta(\gamma)$

5.8 lentelė. $\gamma = (P(T))$

γ	$P(T)$
0	0,5
0,2	0,6
0,4	0,7
0,6	0,8
1,0	0,9
6,0	1,0

ϑ	γ
1	0
1,1	1,75
1,2	3,3
1,3	4,7
1,4	6
1,5	7

5.4 Magistralinių vamzdynų bandymai

Magistralinių vamzdynų patikimumas negali būti užtikrintas be išbandymų. Vamzdynų bandymų tikslas – atskirų vamzdyno ruožų ir viso vamzdyno realaus darbo patikrinimas.

Skaičiuojamojo ir bandomojo įtempimų būvio ryšys

Vamzdynų bandymų metu atliekamas faktinio ir skaičiuojamojo stiprumo patikrinimas. Vamzdžio be defektų irimo patikimumas labai didelis. Tačiau bandymo metu beveik pusė vamzdžių įtrūkimų

atsiranda esant daug mažesniems darbiniais slėgiams. Po bandymų, eksploatacijos metu vėl atsiranda vamzdžių irimas esant darbiniam ir mažesniams slėgiams. Nors sienelės storis yra pakankamas vamzdžio darbui, tačiau yra įtempimų koncentracijos zonos. Šiose zonose įtempimai viršija įtempimus vamzdžiuose be defektų. 2 pav. parodytas skaičiuojamasis apskritiminis įtempimų lygis $\sigma_{\text{apskr.}}(p_2)$, kuris gaunamas, kai vidinis slėgis p_2 , o ištisine linija parodytas faktinis apskritiminis įtempimų lygis.

5.5 pav. Skaičiuojamieji ir bandomieji apskritiminiai įtempimai

Kai mažesnis slėgis $p_1 < p_2$, σ_{apsk} prie $\sigma_{\text{sk}}(p_1)$, įtempimų koncentracija bus tose pat vamzdžio vietose, kaip ir esant slėgiui p_2 . Išilginės ir skersinės suvirinimo siūlės padidina $(1,5 \div 2)$ $\sigma_{\text{sk}}(p_2)$. Galimi defektai su dar didesniais įtempimais. Prie jų priskiriamos įpjovos, įdrėskimai, gilūs įdrėskimai. Būtent šie defektai koncentriškai pasireiškia padidinus slėgį, vamzdžiai irsta net esant daug mažesniui slėgiui nei skaičiuojamasis. Tai matoma tik vienoje vietoje $\sigma_{K \max}(p_1) > \sigma_{\text{sk}}(p_2)$. Todėl čia galimas vamzdžio irimas, kai slėgis $p_1 < p_2$, nors sienelės storis apskaičiuotas slėgiui p_2 .

Esant slėgiui p_b vamzdyne atsiranda tam tikri defektai. Pakėlę slėgį iki $p_b = p_1$, aptiksime defektus, turinčius didžiausias įtempimų koncentracijas. Padidinus slėgį atsiras kitų tipų defektų, tad atliekant

projektinį stipruminį skaičiavimą turime įvesti leistinų įtempimų koncentracijos koeficientą ir kartu mažinti apskritiminių įtempimų lygį, o tai padidina vamzdžio sienelės storį. Mažinant įtempimų koncentracijos koeficientą, mažėja vamzdžio sienelės storis, didėja defektų skaičius, kurie viršys $\sigma_{sk}(p_2)$, o tai reiškia, kad didinant slėgį nuo 0 iki p_2 bus daugiau vamzdžio irimo atvejų.

Bandomasis slėgis

Statybų normose ir taisyklėse СНиП 11–45–75 bandomasis slėgis nustatomas priklausomai nuo vamzdžių kategorijos pagal darbo sąlygas (5.9 lentelė).

5.9 lentelė. Vamzdinių ruožo charakteristika

Kategorija	Darbo sąlygų koeficientas	Suvirintų sudūrimų kontrolė, %	Bandomasis slėgis $p_b(p_d)$
I b	0,6	100	1,25
I	0,75	100	1,25
II	0,75	100	1,25
III	0,9	100	1,1
IV	0,9	20	1,1

Iš 5.9 lentelės negalime nustatyti įtempimų, kokie bus bandymo metu, o jie turi būti tokie, kad aptiktume defektus, kai įtempimų koncentracija didesnė nei leistini įtempimai esant nurodytam patikimumo lygiui.

$$\frac{p_b}{p_d} = \frac{\sigma'_{aprk}}{\sigma''_{aprk}},$$

čia σ'_{aprk} – apskritiminiai įtempimai esant darbiniam slėgiui;

σ''_{aprk} – apskritiminiai įtempimai esant bandomajam slėgiui;

5.10 lentelė. Leistinosios koncentracijos koeficientų reikšmės

Ruožo patikimumas	Ruožo ilgis, km	Įtempimų koncentracijos koeficientai	Koncentracijos koeficientų reikšmės esant skirtingoms m reikšmėms						
			1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
0,99	40	K_p	1,128	1,241	1,354	1,466	1,579	1,692	1,805
		K_e	2,297	3,444	4,588	5,732	6,877	8,022	9,166
	80	K_p	1,116	1,228	1,339	1,452	1,563	1,675	1,786
		K_e	2,053	3,061	4,069	5,077	6,085	7,093	8,1
	120	K_p	1,111	1,222	1,333	1,444	1,555	1,666	1,777
		K_e	1,931	2,866	3,8	4,735	5,669	6,603	7,538
0,999	40	K_p	1,094	1,203	1,313	1,422	1,531	1,641	1,75
		K_e	1,695	2,503	3,312	4,12	4,928	5,737	6,542
	80	K_p	1,087	1,196	1,305	1,413	1,522	1,631	1,739
		K_e	1,598	2,343	3,089	3,835	4,581	5,327	6,07
	120	K_p	1,083	1,191	1,299	1,408	1,516	1,625	1,733
		K_e	1,532	2,225	2,918	3,61	4,304	4,99	5,689

K_p patikimumo koeficientas.

5.11 lentelė

Kategorija	Atsargos koeficientas pagal takumo ribą, m	Skaičiuojamasis patikimumo lygis, P(T)	Bandomasis slėgis
I	1,55	0,999	1,55 p_d – tik povandeniniais vamzdynais, 1,3 p_d – I kategorijos ruožai. Bandymas viso vamzdyno
II	1,3	0,99	1,3 p_d

Teñzorius [tensus], mat. ypatingos rūšies dydis (pvz., metrinis Δ , deformacijos Δ , inercijos momentų Δ), kuris koordinačių sistemoje reiškiamas skaičių rinkiniu ir kinta pagal tam tikrą dėsnį, keičiant vieną koordinačių sistemą kita; vektorių apibendrinimas.

Šaltinis: Tarptautinių žodžių žodynas, © Vyriausioji enciklopedijų redakcija, 1985

<http://www.zodziai.lt/reiksme%26word%3Dtenzorius%26wid%3D19531>

Įtempių užrašymas matrica dar vadinama ***tenzoriumi***. Matricos įstrižainė rodo plokštumos normalinius įtempius, tuo tarpu kiti matricos elementai – tangentinius įtempius.

Literatūra

- Agapkin, B. 1984. *The Totals of Science and Engineering. A Pipeline Transport* [Итоги науки и техники. Трубопроводный транспорт]. Moscow. 105 p. (in Russian).
- Aladjev, V.; Bogdevičius, M. 1999. *Solution of Physical, Technical and Mathematical Problems with Maple V* [Решение физико-технических и математических задач с пакетом Maple V]. Vilnius. 686 p. (in Russian).
- Aladjev, V., Bogdevičius M. 2001. *Maple 6: Solution of the Mathematical, Statistical and Engineering-physical Problems* [Maple 6: Решение математических, статистических и инженерно-физических задач]. Moscow. 824 p. (in Russian).
- Aladjev, V.; Bogdevičius, M.; Prentkovskis, O. 2002. *New Software for Mathematical Package Maple of Releases 6, 7 and 8*: Monograph. Vilnius: Technika. 404 p.
- Alijev, R. 1988. *Pipeline Transport of Oil and Gas* [Трубопроводный транспорт нефти и газа]. Moscow. 368 p. (in Russian).
- Augustaitis, V. 2000. *Mechaninių virpesių pagrindai*. Vilnius: Žiburio leidykla.
- Bakšys, B.; Federavičius, A. 2005. *Vibracinės automatinio manipuliavimo sistemos ir mechanizmai*: monografija. Kaunas: Technologija. 373 p.
- Barauskas, R. 1998. *Baigtinių elementų metodo pagrindai*. Kaunas: Technologija. 375 p.
- Barzdaitis, V.; Činikas, G. 1998. *Rotorinių mašinų monitoringas ir diagnostika*: monografija. Kaunas: Technologija. 365 p.
- Below, N. 1990. *The Analysis of an Accident Rate on Gas and Oil Pipelines* [Анализ аварийности на газо-нефтепроводах]. Moscow. 319 p. (in Russian).
- Bernotas, M.; Mžukna, G.; Ulozas, R. 2007. *Mechatronikos pagrindai*. Šiauliai: VšĮ Šiaulių universiteto leidykla. 248 p.
- Bogdevičius, M. 1994. Non-stationary Movement of Fluid in the Elastic, Visco-elastic and Plastic Pipe [Nestacionaraus skysčio tekėjimas tampriais, klampiais ir plastiškais vamzdžiais], *Applied Mechanic* [Taikomoji mechanika] 2: 117–124. (in Lithuanian).
- Bogdevičius, M. 1997. Simulation Hydraulic Systems of Pump by the Characteristic Method [Моделирование гидравлической системы насоса методом характеристик], *Transport Engineering* [Transportas] 2: 30–37. (in Russian).

- Bogdevičius, M. 1999. Simulation Interaction of Mechanical and Hydraulic System in *Tenth World Congress on the Theory of Machines and Mechanisms*. Finland: Oulu, 2110–2115.
- Bogdevičius, M. 2000. *Hidraulinių, pneumatinių ir mechaninių pavarų bei jų elementų dinaminį procesų modeliavimas*: habilitacinis darbas. Technologijos mokslai, mechanikos inžinerija (09T). Vilnius. 126 p.
- Bogdevičius, M. 2000. Identification of Pipeline and Fluid Parameters by Characteristics Method [Vamzdyno ir fluído parametrų identifikavimas panaudojant charakteristikų metodą], *Transport Engineering* [Transportas] 3: 150–152. (in Russian).
- Bogdevičius, M.; Prentkovskis, O. 2003. *Hidraulinių ir pneumatinių sistemų dinamika*. Vilnius: Technika. 264 p.
- Borisov, V. 1979. *Control of Main Pipelines* [Управление магистральными трубопроводами]. Moscow. 215 p. (in Russian).
- Borodavkin, P. 1982. *Underground Main Pipelines* [Подземные магистральные трубопроводы]. Moscow. 384 p. (in Russian).
- Bubulis, A. 1999. *Preciziniai vibraciniai įrenginiai skysčiams ir birioms medžiagoms dozuoti*. Kaunas: Technologija. 160 p.
- Būda, V.; Sapagovas, M. 1998. *Skaitiniai metodai: algoritmai, uždaviniai, projektai*. Vilnius: Technika. 140 p.
- Čiegis, R. 2003. *Diferencialinių lygčių skaitiniai metodai*. Vilnius: Technika. 448 p.
- Čiegis, R.; Būda, V. 1997. *Skaičiuojamoji matematika*. Vilnius: TEV. 238 p.
- Dosinas, G.; Matiukienė, I.; Rimas, J. 2000. *Skaitiniai metodai*. Kaunas: Technologija. 137 p.
- Drobavičius, A.; Garbavičius, J., et al. 1974. *Bendroji šiluminė technika*. Vilnius: Mintis. 570 p.
- Kirka, A. 1998. *Hidraulinės ir pneumatinės pavaros*. Vilnius: AB OVO. 284 p.
- Kvedaras, B. 2000. *Matricų teorija*. Vilnius. 390 p.
- Kvedaras, B.; Sapagovas, M. 1994. *Skaičiavimo metodai*. Vilnius: Mintis. 516 p.
- Matiukienė, I.; Pekarskienė, A.; Sabatauskienė, V. 2006. *Tiesinė algebra ir diferencialinis skaičiavimas*. Kaunas: Technologija. 247 p.
- Michael, J. 2002. Here are Factors that Govern Evaluation of Mechanical Damage to Pipelines, *Oil & Gas Journal* Sept. 9: 64–69.

- Non-destructive Inspection and Diagnostic of Pipe Lines. The Accumulator Cell of Scientific Works* [Неразрушающий контроль и диагностика трубопроводов]. Moscow, 1988. 159 p. (in Russian).
- Ostaševičius, V. 1998. *Mechaninių konstrukcijų dinamika ir modeliavimas*. Kaunas: Technologija. 368 p.
- Perfecting of Acoustic and Emission Search of Outflow (leakages) in Pipe Lines. Oil and Gas Industry* [Совершенствование акустоэмиссионного поиска утечек в трубопроводах]. 1986. 2: 51–52. (in Russian).
- Pipeline Transport. The Totals of Science and Engineering, Volume 3* [Трубопроводный транспорт. Итоги науки и техники, том 3]. Moscow, 1990. 120 p. (in Russian).
- Plukas, K. 2001. *Skaitiniai metodai ir algoritmai*. Kaunas: Naujasis lankas. 548 p.
- Spruogis, B. 1991. *Hidraulinės mašinos ir pavaros*. Vilnius: Mokslas. 328 p.
- Staponkus, V. 1992. *Dujų mechanika*. Kaunas: Technologija. 78 p.
- Staponkus, V.; Valiūnas, K. 1994. *Pneumatinių pavarų elementai*. Kaunas: Technologija. 116 p.
- Staponkus, V.; Valiūnas, K. 1998. *Hidraulika ir pneumatika*. Kaunas: Technologija. 100 p.
- Vaidakavičius, A.; Macevičius, J. 1984. *Hidraulika ir hidraulinės mašinos*. Vilnius: Mokslas. 321 p.
- Valiūnas, K. 2000. *Hidraulikos ir pneumatikos uždaviniai bei sprendimo pavyzdžiai*. Kaunas: Technologija. 195 p.
- Vekteris, V. J. 1996. *Adaptive Tribological Systems*. Vilnius: Technika. 204 p.
- Žiedelis, S. 1996. *Hidraulinių pavarų namų darbų uždavinynas*. Kaunas: Technologija. 62 p.
- Žiedelis, S., Vaidakavičius, A. 1990. *Tūrinių hidraulinių pavarų skaičiavimas*. Kaunas: KTU. 86 p.
- Žiedelis, S.; Valiūnas, K. 1990. *Hidraulinių pavarų elementai*. Kaunas: Technologija. 88 p.
- Žiliukas, P.; Barauskas, R. 2001. *Mechaniniai virpesiai*. Kaunas: Technologija. 304 p.
- Абрамов, Е. И.; Колесниченко, К. А.; Маслов, В. Т. 1977. *Элементы гидропривода*: Справочник. Киев: Техника. 320 с.
- Абрамович, Г. Н. 1991. *Прикладная газовая динамика*. В 2 ч. Москва: Наука. 600 с.

- Аладьев, В. З.; Богдявичюс, М. А. 1999. *Решение физико-технических и математических задач с пакетом Maple V*. Вильнюс: Техника. 686 с.
- Аладьев, В. З.; Богдявичюс, М. А. 2001. *Maple 6: Решение математических, статистических и физико-технических задач*. Москва: Лаборатория базовых знаний. 824 с.
- Аладьев, В. З.; Богдявичюс, М. А. 2001. *Специальные вопросы работы в среде математического пакета Maple*. Таллинн–Вильнюс: Международная академия Ноосферы и Вильнюсский технический университет им. Гедиминаса, 215 с.
- Бабаев, О. М.; Игнатов, Л. Н.; Кисточкин, Е. С., et al. 1987. *Объемные гидромеханические передачи: расчет и конструирование*. Ленинград: Машиностроение. 256 с.
- Бажин, И. И.; Беренгард, Ю. Г.; Гайцгори, М. М., et al. 1988. *Автоматизированное проектирование машиностроительного гидропривода*. Москва: Машиностроение, 312 с.
- Бартеньев, О. В. 1999. *Fortran для студентов*. Москва: Диалог – МИФИ. 400 с.
- Бахвалов, Н.; Жидков, Н.; Кобельков, Г. 2000. *Численные методы*. Москва: Лаборатория базовых знаний. 624 с.
- Башкиров, В. С. 1994. Расчет содержания воздуха в рабочих жидкостях объемных гидроприводов строительно-дорожных машин, *Строительные и дорожные машины* 7: 20–22.
- Богдявичюс, М. 1990. Исследование автоколебаний гидровибратора, *Литовский механический сборник* 32: 78–84.
- Богдявичюс, М. А. 1997. Моделирование гидравлической системы насоса методом характеристик, *Транспорт* 2(15): 30–37.
- Вержбицкий, В. М. 2000. *Численные методы: линейная алгебра и нелинейные уравнения*. Москва: Высшая школа. 266 с.
- Герц, Е. В. 1969. *Пневматические приводы: теория и расчет*. Москва: Машиностроение. 358 с.
- Герц, Е. В. 1985. *Динамика пневматических систем машин*. Москва: Машиностроение. 256 с.
- Гликман, Б. Ф. 1986. *Математические модели пневмогидравлических систем*. Москва: Наука. 368 с.
- Диткин, В. А. 1975. *Операционное исчисление*. Москва: Высшая школа. 407 с.

- Зенкевич, О.; Морган, К. 1980. *Конечные элементы и аппроксимация*. Москва: Мир. 230 с.
- Иринг, Ю. 1983. *Проектирование гидравлических и пневматических систем*. Ленинград: Машиностроение. 363 с.
- Кабза, З. 1981. *Математическое моделирование расходомеров с сужающими устройствами*. Ленинград: Машиностроение. 115 с.
- Корн, Г.; Корн, Т. 1984. *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. Москва: Наука. 831 с.
- Лойцянский, Л. Г. 1973. *Механика жидкости и газа*. Москва: Наука. 847 с.
- Михайлов, А. К.; Ворошилов, В. П. 1989. *Компрессорные машины*. Москва: Энергоатомиздат. 288 с.
- Самарский, А. А.; Гулин, А. В. 1989. *Численные методы*. Москва: Наука. 432 с.
- Самарский, А. А.; Попов, Ю. П. 1975. *Разностные схемы газовой динамики*. Москва: Наука. 254 с.
- Свешников, В. К.; Усов, А. А. 1988. *Станочные гидроприводы: Справочник*. Москва: Машиностроение. 512 с.
- Седов, Л. И. 1972. *Методы подобия и размерности в механике*. Москва: Наука. 440 с.
- Степанов, И. Р.; Чудинов, В. И. 1977. *Некоторые задачи движения газа и жидкости в каналах и трубопроводах энергоустановок*. Ленинград: Наука. 199 с.
- Финкельштейн, З. Л. 1986. *Применение и очистка рабочих жидкостей для горных машин*. Москва: Недра. 232 с.
- Флетчер, К. 1991. *Вычислительные методы в динамике жидкостей*. В 2-х томах. Москва: Мир.