



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS**

Darius Banevičius

**DUJOTIEKIO VAMZDYNŲ PRIVIRINAMŲ AKLIŲ STIPRUMO
TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

Vadovas
Doc. Dainius Vaičiulis

PANEVĖŽYS, 2016

KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS
PANEVĖŽIO TECHNOLOGIJŲ IR VERSLO FAKULTETAS

DUJOTIEKIO VAMZDYNO PRIVIRINAMŲ AKLIŲ STIPRUMO
TYRIMAS

Baigiamasis magistro projektas
Mechanikos inžinerija (621H30001)

Vadovas

Doc. Dainius Vaičiulis

2016 m. _____

Recenzentas

2016 m. _____

Projektą atliko

Darius Banevičius

2016.05.27

PANEVĖŽYS, 2016



KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS

Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas

(Fakultetas)

Darius Banevičius

(Studento vardas, pavardė)

Mechanikos inžinerija, 621H30001

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Dujotiekio vamzdyno privirinamų aklių stiprumo tyrimas“

AKADEMINIO SAŽININGUMO DEKLARACIJA

2016 m. gegužės 27 d.

Panevėžys

Patvirtinu, kad mano, **Darius Banevičiaus**, baigiamasis projektas tema „Dujotiekio vamzdyno privirinamų aklių stiprumo tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai, o visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

2016 m. _____

BAIGIAMOJO PROJEKTO UŽDUOTIS

Išduota studentui: Dariui Banevičiui Grupė PMM – 4

1. Darbo tema:

Lietuvių kalba: Dujotiekio vamzdyno privirinamų aklių stiprumo tyrimas

Anglų kalba: Research of Gas Pipeline Welded End-Cap Strength

Patvirtinta 20 16 m. kovo mėn. 17 d. dekanu potvarkiu Nr. V25-13-8

2. Darbo tikslas:

Ištirti kaip dujotiekio vamzdyno aklės, veikiamos vidinio slėgio, stiprumas priklauso nuo jos ir vamzdžio geometrinių parametrų bei medžiagų (aklės ir vamzdžio) tamprumo modulių.

3. Reikalavimai ir sąlygos:

Nustatyti kokią įtaką aklės stiprumui turi:

- *vamzdžio skersmuo ir sienelės storis (laikyti, kad aklės ir vamzdžio sienelių storiai yra tokie pat);*
- *aklės ir vamzdžio medžiagų tamprumo modulių santykis;*
- *aklės forma (sferinė ir elipsinė aklė) ir geometrija (aklės kreivumo spindulys/-iai).*

4. Projekto struktūra. Turinys konkretizuojamas kartu su vadovu, atsižvelgiant į BBP pobūdį.

Literatūros apžvalga, Tiriamoji dalis, Išvados ir Literatūros sąrašas.

5. Ši užduotis yra neatskiriama magistro baigiamojo projekto dalis.

6. Projekto pateikimo gynimui kvalifikacinėje komisijoje terminas 2016-06-06
(data)

Užduotį gavau: Darius Banevičius 2015 m. spalį
(studento vardas, pavardė, parašas) (data)

Vadovas: doc. Dainius Vaičiulis 2015 m. spalį
(pareigos, vardas, pavardė, parašas) (data)

TURINYS

TURINYS.....	5
SANTRAUKA	6
SUMMARY	7
IŽANGA.....	8
1. LITERATŪROS APŽVALGA	9
1.1. Bendros žinios apie dujotiekį ir akles	9
1.2. Aklių naudojimo taisyklės ir norminiai dokumentai.....	10
1.3. Dujotiekio vamzdyno aklių klasifikacija.....	10
1.4. Sferinės ir elipsinės aklės	11
1.5. Aklių sienučių storio skaičiavimas.....	12
1.6. Dujotiekio vamzdyno aklių panaudojimas praktikoje.....	13
1.7. Dujotiekio vamzdyno aklių stiprumo tyrimai užsienio šalyse	16
2. TYRIMAMS NAUDOTAS MODELIS.....	18
3. AKLIŲ STIPRUMO TYRIMAS	19
3.1. Sferinė aklė.....	19
3.1.1. Skaičiuojamojo vamzdžio ilgio nustatymas	20
3.1.2. Vamzdžio išorinio skersmens ir vamzdžio bei aklės sienelės storio įtaka.....	20
3.1.3. Mechaninio nevienalytiškumo įtaka.....	24
3.1.4. Aklės spindulio įtaka.....	28
3.2. Elipsinė aklė	32
3.2.1. Skaičiuojamojo vamzdžio ilgio nustatymas	32
3.2.2. Vamzdžio išorinio skersmens ir vamzdžio bei aklės sienelės storio įtaka.....	33
3.2.3. Mechaninio nevienalytiškumo įtaka.....	37
3.2.4. Aklės spindulių įtaka.....	41
IŠVADOS.....	42
LITERATŪRA.....	43

Banevičius, Darius. Dujotiekio vamzdyno privirinamų aklių stiprumo tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas doc. Dainius Vaičiulis; Kauno technologijos universitetas, Panevėžio technologijų ir verslo fakultetas.

Mokslo kryptis ir sritis: *Mechanikos inžinerija, technologijos mokslai.*

Reikšminiai žodžiai: *vamzdyno aklė, stiprumas, sferinė aklė, elipsinė aklė.*

Panevėžys, 2016. 43 p.

SANTRAUKA

Šio baigiamojo magistrinio projekto užduotis – dujotiekio vamzdyno privirinamų aklių stiprumo tyrimas. Projekte atlikta literatūros apžvalga dujotiekio vamzdyno aklių tematika. Pateikta kaip vamzdyno skersmuo, aklės forma (sferinės ir elipsinės) bei aklės sienelės storis priklauso nuo suvirinto sujungimo (jungiančio vamzdį su akle) mechaninio nevienalytiškumo, aklės ir vamzdžio geometrijos. Nustatyta:

- *didėjant aklės sienelės storiui jos stiprumas didėja;*
- *didėjant vamzdžio išoriniam skersmeniui (tiek sferinės, tiek elipsinės), aklės įtempimų intensyvumas didėja;*
- *tiek sferinės, tiek elipsinės aklės sujungimo su vamzdžiu stiprumui mechaninis nevienalytiškumas praktiškai įtakos neturi;*
- *daugumoje atveju elipsinė aklė yra stipresnė už sferinę aklę.*

Banevicius, Darius. *Research of Gas Pipeline Welded End-Cap Strength*: Master's thesis / Supervisor assoc. prof. Dainius Vaiciulis. The faculty of technology and business, department of technology, Kaunas University of Technology, Panevėžys.

Research area and field: *Mechanical engineering, Technological Sciences.*

Key words: *pipeline end-caps, strength, spherical end-cap, elliptical end-cap.*

Panevėžys, 2016. 43 p.

SUMMARY

The main purpose of this master thesis is Research of Gas Pipeline Welded End-Cap Strength. There has been conducted a literature review including pipeline failure analysis, strength and strain analysis of pipelines as well as various methods used to analyze pipeline failures. The paper presents the analysis which examines how pipeline's diameter, end-cap's form (spherical and elliptical) and wall thickness is correlated to the welded joint, which connects the pipe with the end-cap, mechanical heterogeneity as well as pipe's and end-cap's geometry. The analysis results show that:

- *the strength of the end cap is correlated to it's wall thickness;*
- *the increase of external pipe diameter is correlated to the increase of end cap's stress intensity increases (applied for both spherical and elliptical end-caps);*
- *the mechanical heterogeneity practically does not affect the joint strength between the end-cap (applied for both spherical and elliptical end-caps) and the pipeline;*
- *in most cases, an elliptical end-cap is stronger compared to spherical end-cap.*

IŽANGA

Aklės reikalingos sudaryti laikinai arba nuolatinei užsklandai (hermetizacijai) vamzdžio angose [1]. Tokio tipo detalės naudojamos, norint laikinai sustabdyti transportuojamos medžiagos srautą vamzdynuose, vykdant remonto, suvirinimo darbus, hidraulinius bandymus ir t. t.

Išanalizavus aklių tipus, šiame darbe pasirinktos tirti dažniausiai naudojamos – privirinamos sferinės ir elipsinės aklės.

Darbo tikslas. Ištirti, kokią įtaką aklės stiprumui turi:

- aklės ir vamzdžio sienelės storis;
- vamzdžio išorinis skersmuo;
- aklės ir vamzdžio medžiagų mechaninės savybės;
- aklės kreivumo spindulys (spinduliai).

Tyrimų metodai: literatūros analizė, baigtinių elementų metodas („SolidWorks Simulation 2015“).

Darbo aprobavimas ir publikacijos. Dalyvauta studentų mokslinėje konferencijoje „Technologijų ir verslo aktualijos – 2016“, vykusioje Panevėžyje 2016 m. balandžio 25 d. Skaitytas pranešimas tema „Dujotiekio vamzdynų privirinamų sferinių (elipsinių) aklių stiprumo tyrimas“.

Darbo apimtis ir struktūra. Baigiamąjį magistro projektą sudaro akademinio sąžiningumo deklaracija, baigiamojo projekto užduotis, santrauka lietuvių ir anglų kalbomis, įvadas, trys skyriai, bendrosios išvados ir literatūros sąrašas. Darbo apimtis 43 p.

1. LITERATŪROS APŽVALGA

1.1. Bendros žinios apie dujotiekį ir akles

Lietuvos dujifikacijos ištakos siekia XIX šimtmečio vidurį, kada 1861 m. Klaipėdoje ir 1864 m. Vilniuje, o vėliau – 1907 m. – Šilutėje, Verdainės gyvenvietėje, pastatyti pirmieji dabartinės Lietuvos Respublikos teritorijoje dujų gamybos fabrikai ir miestuose nutiesti dujotiekiai, kuriais dujos buvo tiekiamos į miestelėnų butus, apšviečiamos pagrindinės gatvės. Nepalyginamai didesnius dujifikavimo mastus po Antrojo pasaulinio karo Lietuva įgavo, kai 1961 m. Vilniuje, Vingio parke, pirmą kartą buvo uždegtas gamtinių dujų fakelas, pažymėjęs gamtinių dujų atkeliavimą į mūsų šalį [2].

Šiuo metu gamtinės dujos į miestų, gyvenviečių dujų sistemas ar atskiriems vartotojams tiekiamos magistraliniais dujotiekiais. Šiuos dujų vamzdynus prižiūrintys asmenys privalo užtikrinti saugų dujų sistemų naudojimą, reikiamą techninę būklę ir nuolatinę priežiūrą.

Didinant dujotiekio vamzdyno pajėgumus, atliekant remonto, rekonstrukcijos darbus dujos vartotojams privalo būti tiekiamos nenutrūkstamai, taigi neišvengiamai susiduriama su viena aktualiausių problemų – tai dujotiekio vamzdyno aklinimas (žr. 1.1 pav.), kaip tinkamai parinkti aklę, kad ji visiškai atliktų savo funkciją.



1.1 pav. Dujotiekio vamzdyno aklės

1.2. Aklių naudojimo taisyklės ir norminiai dokumentai

Magistralinio dujotiekio įrengimo taisyklėse [3] teigiama, kad produktai (vamzdžiai, jungiamosios detalės), kurie naudojami magistralinio dujotiekio vamzdyno įrengimo metu, į Lietuvos rinką turi būti pateikti Reglamento (ES) Nr. 305/2011 nustatyta tvarka. Produktai tokie kaip aklės, perėjimai ir pan., neturintys techninių specifikacijų ar pagaminti Lietuvoje turi atitikti Lietuvos standartų reikalavimus:

- Lietuvos standartas LST EN 14870; LST EN ISO 3183:2013 [3].

Gamtinių dujų, suskystintų naftos dujų ir biodujų aplinkoje atliekamų darbų saugos taisyklėse [4] minima, kad aklės, įmontuotos dujotiekiuose, turi išlaikyti tame dujotiekyje galimą didžiausią dujų slėgį. Išmontuojant dujotiekį jie prapučiami oru, azotu arba inertinėmis dujomis, o veikiančiuose dujotiekiuose įrengiamos aklės. Taip pat teigiama, kad atliekant suvirinimo, pjovimo darbus, dujotiekiai ir (ar) rezervuarai bei cisternos turi būti atjungti aklėmis nuo veikiančio dujotiekio ir prapūsti oru, azotu arba inertinėmis dujomis.

Gamybos standartai įvairiose pasaulio šalyse:

- Rusijoje. GOST 17379-2001 – pagrindinis norminis dokumentas gaminant elipsines (sferines) akles, kuris skirtas vamzdynų detalėms be siūlės ir suvirintoms gaminamoms iš anglinių ir neanglinių plienų. OST 36-25-77 norminis dokumentas, skirtas vamzdžių detalėms, kurių diametras nuo 500 mm iki 1400 mm ir slėgis iki 25 MPa (250 bar). TU26-18-38-90 standartas yra taikomas šampuotoms aklėms gaminti.
- Jungtinėse Amerikos Valstijose (USA) yra ASME tipo standartai: ANSI B16.9; B16.28.
- Vokietijoje taikomi DIN tipo standartai aklėms gaminti: DIN2605; DIN2615; DIN2617.
- Europos Sąjungoje EN tipo standartai: EN10253-1; EN10253-2.
- Į Europos Sąjungą pateiktos aklės iš trečiųjų šalių privalo atitikti kokybės standartą – EN10204/3.1B.

1.3. Dujotiekio vamzdyno aklų klasifikacija

Pagal tvirtinimo būdą dujotiekio vamzdyno aklės yra skirstomos į sekančius tipus [5]:

- sferinės;
- elipsinės;
- elipsinės plokščios;
- elipsiniai dugnai;
- flanšinės;
- pasukamos;

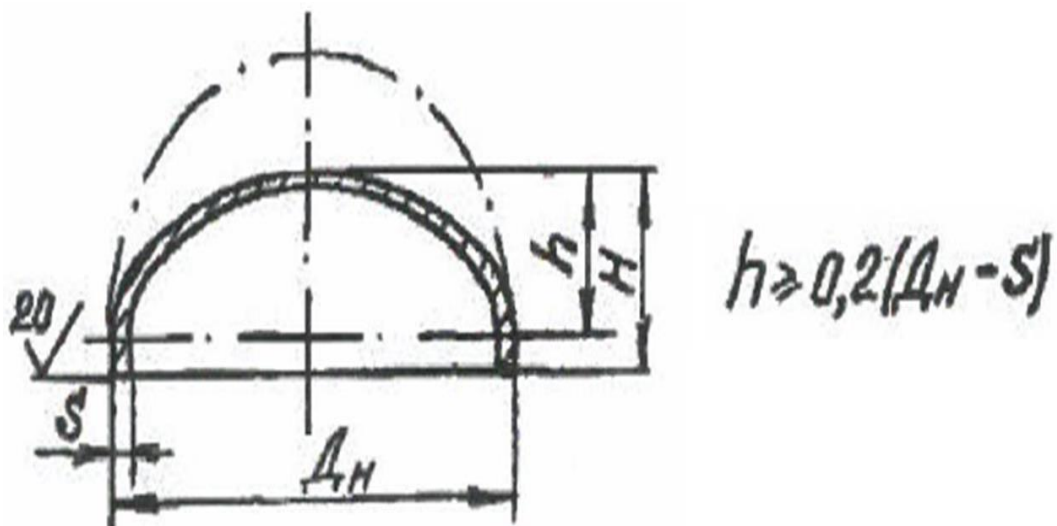
- plokščios privirinamos;
- kito specifinio tipo (gaminamos pagal specifinius užsakovo brėžinius ir reikalavimus).

Išanalizavus dujotieko vamzdyno aklių tipus šiame darbe buvo pasirinktos tirti dažniausiai ir plačiausiai naudojamos aklės – privirinamos sferinės ir elipsinės aklės.

1.4. Sferinės ir elipsinės aklės

Šios aklės gaminamos iš įvairių plieno markių atsižvelgiant į eksploatacijos sąlygas bei vamzdyno paskirtį, kuriame jos bus naudojamos. Aklės prie vamzdyno privirinamos. Dažniausiai aklės gaminamos iš lakštinio plieno presavimo būdu. Taip pat gaminamos antikorozinės aklės iš specialaus antikorozinio plieno 08X18H10T, 12X18H10T, 10X17H13M2T ir atsparios aukštai temperatūrai iš plieno 15X5M. Dėl tokio gamybos būdo aklės pajėgia išlaikyti aukštą iki 16 MPa slėgį (160 bar) ir didelį temperatūrų skirtumą nuo -70 C iki $+600\text{ C}$. Sferinės ir elipsinės aklės gaminamos nuo 15 mm iki 1 400 mm skersmens [6]. Dėl visų šių išvardytų priežasčių jų panaudojimas labai platus ir įvairus: dujų, naftos, chemijos srityse bei maisto pramonėje.

Darbe [7] teigiama, kad privirinamos aklės dažniausiai gaminamos iš šių plieno markių: 15X5M, 12X1MF, 12X18H10T, 08X22H6T. Be šių paminėtų plieno markių, aklės plačiai gaminamos iš tokių plieno markių kaip: mažaanglis plienas – EN ISO S245, S265, ASTM A234WPB; nerūdijantis plienas – ASTM A403 WP.GR304; mažai legiruotas plienas – ASTM/ASME A/SA 234 GR.WP1.



1.2 pav. Aklės pagrindiniai matmenys [7]

Standartinė aklių lentelė iš nurodytų plieno markių [7]

D_U , mm	D_N , mm	S , mm	H , mm	P_U , MPa (bar), ne daugiau, plieninėms detalėms				Svoris, kg
				12X18H10T	15X5M	12X1MF	08X22H6T	
50	57	5	30	10,0 (100)	10,0 (100)	10,0 (100)	10,0 (100)	0,3
65	76	6	40	10,0 (100)	10,0 (100)	10,0 (100)	10,0 (100)	0,5
80	89	6	45	10,0 (100)	10,0 (100)	10,0 (100)	10,0 (100)	0,8
100	108	6	50	10,0 (100)	6,3 (63)	10,0 (100)	10,0 (100)	1,3
125	133	6	55	10,0 (100)	6,3 (63)	6,3 (63)	10,0 (100)	1,5
150	159	6	65	10,0 (100)	4,0 (40)	6,3 (63)	10,0 (100)	2,2
200	219	10	75	10,0 (100)	6,3 (63)	10,0 (100)	10,0 (100)	5,1
250	273	12	85	10,0 (100)	6,3 (63)	10,0 (100)	10,0 (100)	9,2
300	325	12	100	10,0 (100)	6,3 (63)	10,0 (100)	10,0 (100)	12,7

Pateikiant užsakymą gamyklai gaminančiai minėtas aklės reikia pateikti sekančius parametrus: aklės išorinį skersmenį, sienelės storį, plieno markę, slėgį, norminį dokumentą, metalo stiprumo klasę, darbo sąlygų koeficientus ir detalių kiekį. Šio tipo akles gamina ir tiekia tokios pasaulio gamyklos kaip: „Turbodetal“ Neva, Rusija; „Interresurs“ Kievai, Ukraina; „KKF BEND“ Qingdao, Kinija; „Sanjayforge“ Maharashtra, Indija; „Sunnysteel“ Bahru, Malaizija; „Allied International“ Piacenza, Italija; „Victaulic“ Pensilvanija, USA.

1.5. Aklių sienučių storio skaičiavimas

Aklių sienučių storio apskaičiavimo metodika pateikta knygoje [8] „Dujų sistema. Magistraliniai dujotiekiai. Projektavimas, medžiagos ir statyba“. Jei aklės saugos koeficientas sudaro bent 1,5 reikšminio bendrojo įtempio, galima taikyti ir tokius metodus:

- eksperimentinį, kai projektinis slėgis nustatomas pagal mechaninio atsparumo hidraulinio bandymo rezultatus;
- galutinio elemento kompiuterinio modelio naudojimo įtempimams ir apkrovoms apskaičiuoti.

Elipsės pavidalo aklės su $T \leq 0,2D$ ir $r_{v1} \geq 0,05r_{v2}$ aklės galo sienutės storiui T nustatyti elipsinės aklės forma prilyginama pusžiedžio aklės formai. Dėl šios priežasties aklės įlinkio ir sferos sienutės storių formulėje skaičiavimams naudojamas šis vidinis įlinkio skersmuo (žr. 1.3 pav.):

$$r_{v1} = \frac{1}{4}(D - 2T_{\min}) \times \left[1 + h_e^2 - (1 - h_e) \times \sqrt{1 + h_e^2} \right]; \quad (1.1)$$

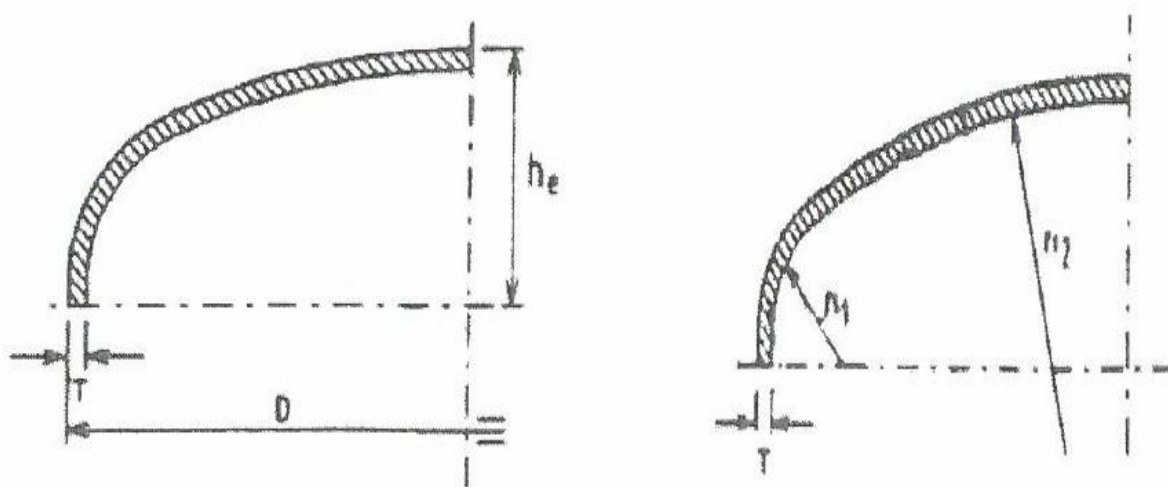
čia: T_{\min} – mažiausias apskaičiuotasis storis po sferos suformavimo milimetrais; D – aklės galo išorinis skersmuo milimetrais.

Vidinis sferos centrinės dalies skersmuo (žr. 1.3 pav.):

$$r_{v2} = \frac{1}{4h_e} (D - 2T_{\min}) \times \left[1 + h_e^2 - (1 - h_e) \times \sqrt{1 + h_e^2} \right]; \quad (1.2)$$

Išorinis aklės viršūnės aukštis (žr. 1.3 pav.).

$$h_e = \frac{2(h_e - T_{\min})}{D - 2T_{\min}}; \quad (1.3)$$



1.3 pav. Aklės įlinkis ir sferinis dangtis [8]

1.6. Dujotiekio vamzdyno aklų panaudojimas praktikoje

2015 metais teko dalyvauti prižiūrint Kiemėnų dujų apskaitos stoties (žr. 1.4 pav.) ir Panevėžio dujų skirstymo stoties (žr. 1.5 pav.) rekonstrukcijos darbus, kurių metu rekonstruoti nauji dujotiekiai. Panevėžio dujų skirstymo stoties įvadinio dujotiekio skersmuo 323 mm ir Kiemėnų dujų apskaitos stoties išsišakojantys įvadiniai dujotiekiai, kurių skersmenys 711 mm. Dujotiekiai buvo pakloti ir išbandyti hidrauliškai (vandeniu) mechaniniam atsparumui. Vamzdžių galus užvirinus aklėmis 12 val. eigoje hidraulinių bandymų metu dujotiekių aklėms teko atlaikyti 82,5 bar slėgį.



1.4 pav. Kiemėnų dujų apskaitos stoties dujotiekis su užvirintomis aklėmis



1.5 pav. Panevėžio dujų skirstymo stoties dujotiekis su užvirintomis aklėmis

2012 metais vasarą buvo vykdomi dujotiekio Panevėžys–Vilnius remonto darbai. Darbų metu nepavykus atlikti dujotiekio hidraulinio bandymo, nustatyta, kad dujotiekio galams sandarinti naudotų sferinių aklų metalas atsiskuoksniavęs, pažeistas korozijos. Dėl to, nuspręsta atlikti tos



1.6 pav. Eksperimentiniai dujotiekio ir aklų bandymai

serijos (rusišku) gamyklinių aklių du eksperimentinius, hidraulinius mechaninio atsparumo bandymus (žr. 1.6 pav.), kuriuose dalyvavo šio baigiamojo projekto autorius. Bandymų metu buvo naudojami $\varnothing 720 \times 7,4$ mm (bendras ilgis 5 m) ir $\varnothing 720 \times 9$ mm (bendras ilgis 6 m) vamzdynai su galuose užvirintomis sferinėmis aklėmis. Minėtų bandymų tikslas buvo išsiaiškinti kokio slėgio neatlaikys: pačios aklės, suvirintos aklių siūlės, ar pats vamzdynas. Pirmojo bandymo metu (žr. 1.7 pav.) slėgį sukėlus iki 112,31 bar trūko vamzdynas.



1.7 pav. Hidraulinio bandymo metu trūkęs dujotiekio vamzdynas

Antrojo bandymo metu (žr. 1.8 pav.) slėgį sukėlus iki 108,04 bar sferinė aklė neatlaikė. Naudojant pagrindinio metalo vidaus ir išorės defektų nustatymų neardančiųjų bandymų metodų kontrolę – kapiliarinę (spalvinę) buvo nustatytas gamyklinės aklės metalo atisluoksniavimas.



1.8 pav. Hidraulinio bandymo metu sferinės aklės metalo atisluoksniavimas

Galima teigti, kad privirinamos aklės yra neatsiejama dujotiekio remonto, rekonstrukcijos dalis. Aklės gana dažnai naudojamos praktikoje, tačiau nežiūrint į tai, jog nuolatos atliekama jų techninė priežiūra – gedimų išvengti nepavyksta.

1.7. Dujotiekio vamzdyno aklių stiprumo tyrimai užsienio šalyse

Dujotiekio vamzdynų gedimai, eksploatacija ir techninė priežiūra yra plačiai nagrinėjama įvairiuose literatūros šaltiniuose tiek Lietuvoje tiek užsienyje. Iš daugybės perskaitytų straipsnių, buvo pasirinkti tie, kurių apžvelgiamos ir analizuojamos temos yra labiausiai susiję su šiuo tiriamuoju darbu.

Brazilai J. L. C. Diniz, R. D. Vieira, J. L. F. Freire savo straipsnyje [9] „Vamzdynų įtempimų ir deformacijų analizė, juos veikiant metalų korozijai“ tyrė vamzdžių įtempimus ir deformacijas korozijos pažeistose vietose. Tyrimui buvo naudojami nauji ir susidevėję 12 colių, 18 colių ir 20 colių skersmens vamzdžiai su vidiniais ir išoriniais korozijos pažeidimais. Vykdamas tyrimą buvo atlikti ne tik eksperimentiniai, bet ir analitiniai bandymai. Rezultatams palyginti buvo pasirinktas baigtinių elementų metodas ir pasinaudota programa ANSYS versija 5.5. Tyrimais darbo autoriai įrodė ir išvadose teigia, kad vidinės ar išorinės korozijos pažeisti vamzdynai plyšta išilgai vamzdyno paviršiaus kryptimi. Jie taip pat, pasiremami matematiniu modeliu, įrodė kad laboratoriniai modeliai ir tyrimai gali būti tiesiogiai pritaikyti praktiškose situacijose.

Autoriai C. R. F. Azevedo ir A. Sinatora savo straipsnyje [10] „Dujotiekių vamzdynų gedimų analizė“ atliko dujų vamzdžių įrimo analizę. Jų tikslas buvo nustatyti dujų nuotėkio priežastį, kuris atsirado bandant 15 kilometrų ilgio dujų vamzdyną hidrauliniu būdu. Jie nustatė įtarimą keliančias vamzdyno vietas, jas išpjovė ir sudarė kelias hipotezes. Įtarimą keliančias vietas ištyrė eksperimentiškai dviem būdais: mikrostruktūrine analize ir topografinė (kokybine) analize. Savo išvadose teigė, kad dujų vamzdžio plyšiai atsirado dėl vamzdyno pažeidimo įvykusio smėliavimo metu. Smėliavimo procesas turėjo įtakos vamzdyno suplonėjimui, rūdijimui ir t. t. dėl ko ir įvyko minėtas dujų nuotėkis.

M. Zamanzadeh, E. Larkin ir D. Gibbon savo straipsnyje [11] „Gedimų tyrimų pakartotinė analizė ir pagrindinės priežasties nustatymas“ pristato galimus ir rekomenduojamus analizavimo būdus bei procesus. Jų atliktas darbas, tai pakartotinė gedimo analizė ir pagrindinių gedimo priežasčių nustatymas. Minėti straipsnio autoriai tyrė cilindro uždaro galo nuplyšimą, kas panašu į šį tiriamąjį darbą (baigiamąjį magistro projektą) – dujotiekio vamzdyno privirinamų aklių stiprumo tyrimą. Darbo autoriai straipsnio išvadose teigė, kad buvo nepakankamas suvirinimo siūlės stiprumas ir to pasekoje susidaręs slėgis cilindre nuplėšė uždara galą. Taip pat buvo pabrėžta, kad neteisingai pasirinktas analizės metodas ir blogas cilindro surinkimas pradinėje stadijoje, galimai turėjo įtakos įvykusiam gedimui.

E. Phillip Dahlberg ir T. V. Bruno savo straipsnyje [12] „Dujotiekių vamzdynų gedimų analizė“ apžvelgia metodus, kurie yra naudojami atliekant dujų vamzdynų gedimų analizes:

- bendra vizualinė apžiūra;

- pažeistos vietos konkretus nustatymas ir nuodugni analizė;
- konkrečios vietos spektrinė analizė;
- metalografinė analizė;
- cheminės sudėties ir mechaninių savybių nustatymas.

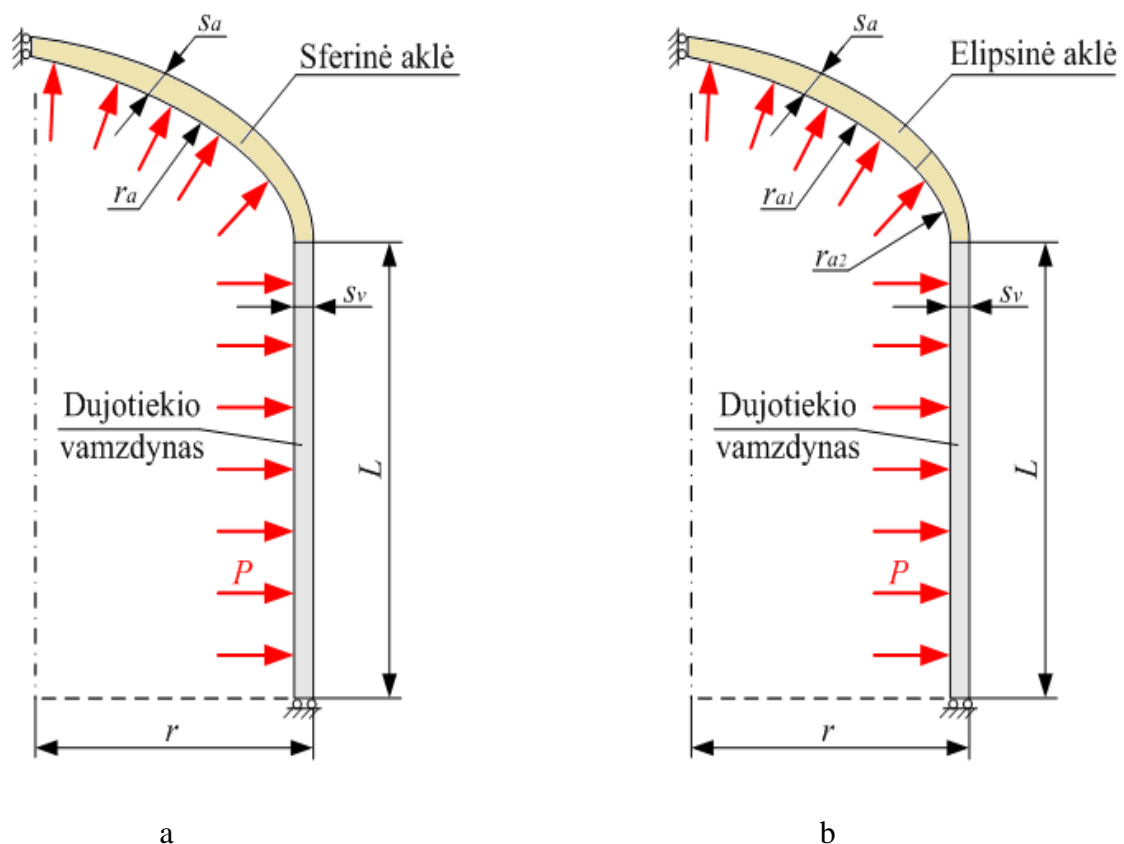
Straipsnio autoriai tyrimą atliko bedradarbiaudami su Amerikos Dujų Asociacija, Amerikos Geležies ir Plieno Institutu bei Britų Dujų Korporacija. Išvadose straipsnio autoriai teigė, kad nežiūrint į tai, jog nuolatos atliekama vamzdynų techninė priežiūra ir analizė, tačiau gedimų išvengti nepavyksta.

2. TYRIMAMS NAUDOTAS MODELIS

Kadangi nebuvo galimybės ištirti aklių stiprumą eksperimentiškai, tyrimams pasirinktas baigtinių elementų metodas (BEM). Šis metodas taikomas mechaninių, hidraulinių ir kitokių sistemų uždaviniams spręsti bei kompiuteriniams procesams modeliuoti.

Dujotiekio vamzdyno privirinamų aklių stiprumo tyrimai atlikti naudojant „SolidWorks Simulation 2015“.

Tyrime naudoti plokšti ašiai simetriniai baigtiniai elementai. Baigtinių elementų dydį automatiškai parenka „SolidWorks Simulation 2015“ (per sienelės storį parinkti 4 – 5 elementai). Baigtinių elementų modelio su sferine ir elipsine akle skaičiuojamosios schemas pateiktos 2.1 pav.



2.1 pav. Dujotiekio vamzdyno privirinamos sferinės ir elipsinės aklės skaičiuojamoji schema: a – sferinė aklė; b – elipsinė aklė

Tiriant padarytos šios prielaidos:

- apkrova – pastovus vidinis slėgis P ;
- aklės ir vamzdžio suvirinimo siūlės mechaninės charakteristikos yra tokios pat kaip vamzdžio medžiagos;
- sferinės ir elipsinės aklės bei dujotiekio vamzdžio sienelės storis yra vienodas ($s_a = s_v$).

3. AKLIŲ STIPRUMO TYRIMAS

Stiprumo rodikliu laikysime santykinį įtempimų intensyvumą (pagal von Mises kriterijų): įtempimų intensyvumo σ_i santykis su vidiniu vamzdžio slėgiu P , tai yra gauti rezultatai pateikti santikiniais dydžiais σ_i / P .

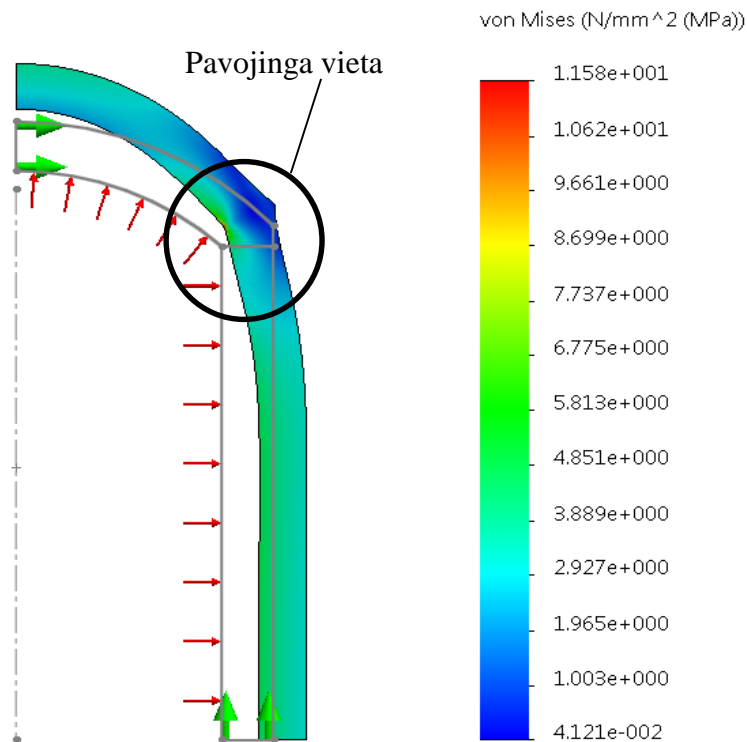
Šiame projekte aklės ir vamzdžio sujungimo mechaninio nevienalytiškumo koeficientu γ laikysime aklės ir vamzdžio medžiagų tamprumo modulių santykį:

$$\gamma = \frac{E_a}{E_v};$$

čia: E_a – aklės medžiagos tamprumo modulis; E_v – vamzdžio medžiagos tamprumo modulis.

3.1. Sferinė aklė

Tipinis deformavimosi pobūdis ir įtempimų intensyvumo pasiskirstymas dujotiekio vamzdyje ir sferinėje aklėje, veikiant 1 MPa vidiniam slėgiui pateiktas 3.1 pav. Pavojinga vieta (labiausiai apkrauta) yra vidiniame spindulyje ties vamzdžio ir aklės sujungimu.



3.1 pav. Vamzdžio, sferinės aklės deformavimosi pobūdis ir įtempimų intensyvumo pasiskirstymas, kai: $L = d$; $d = 100$ mm; $s_a = 10$ mm; $r_a = 70$ mm; $\gamma = 1,0$

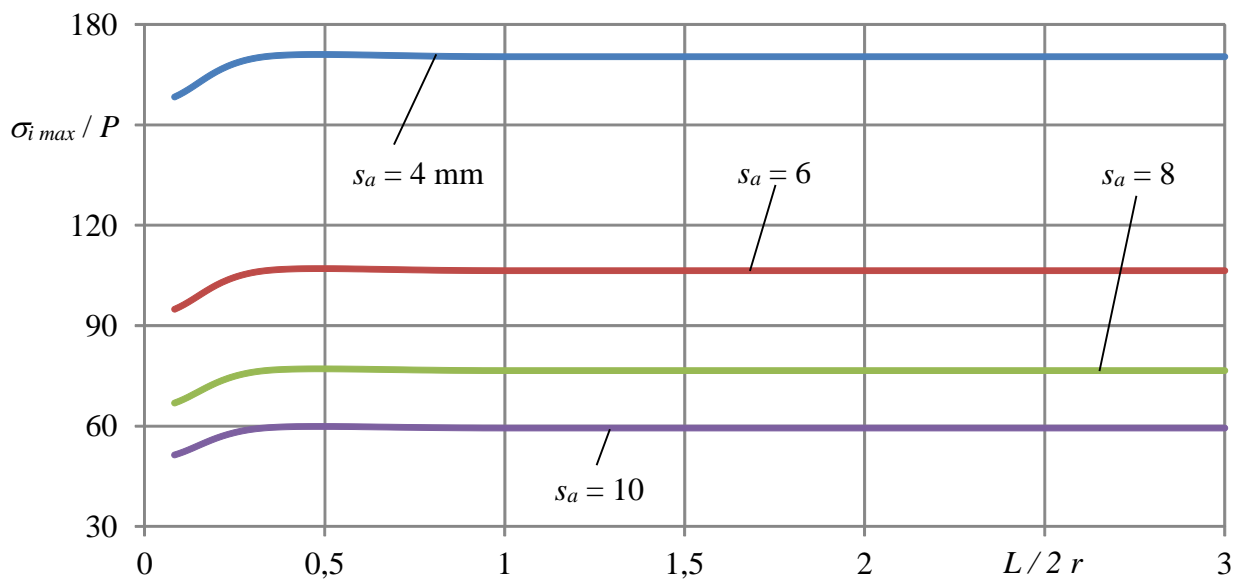
Šiame poskyryje tirsime kaip sferinės aklės stiprumas priklauso nuo:

- dujotiekio vamzdžio išorinio skersmens d (kitimo ribos: nuo 100 iki 400 mm), dujotiekio vamzdžio ir aklės sienelės storio $s_a = s_v$ (kitimo ribos: nuo 4 iki 10 mm);
- mechaninio nevienalytiškumo γ (kitimo ribos: nuo 0,75 iki 1,2);
- aklės spindulio r_a (kitimo ribos: nuo 70 iki 220 mm).

3.1.1. Skaičiuojamojo vamzdžio ilgio nustatymas

Šiame poskyryje nustatysime, koks turi būti skaičiuojamasis vamzdžio ilgis L (žr. 2.1 pav.). Buvo priimta, kad L kitimo ribos bus nuo 25 iki 900 mm. Skaičiuotinu dujotiekio vamzdžio ilgiu laikomas toks vamzdžio ilgis, kuris neturi įtakos įtempimų vertėms aklėse.

3.2 pav. pateikta kaip didžiausi įtempimai $\sigma_{i\max}$ aklėje (analogiškai ir vamzdyje) kinta didinant skaičiuotino vamzdžio ilgį L . Nustatyta, kad skaičiuotinam vamzdžio ilgiui viršijus $\sim 0,38 d$ didžiausi įtempimai aklėje ir vamzdyje praktiškai nebesikeičia. Todėl 3.1. poskyryje skaičiuojamąjį vamzdžio ilgį L imsime lygų d .

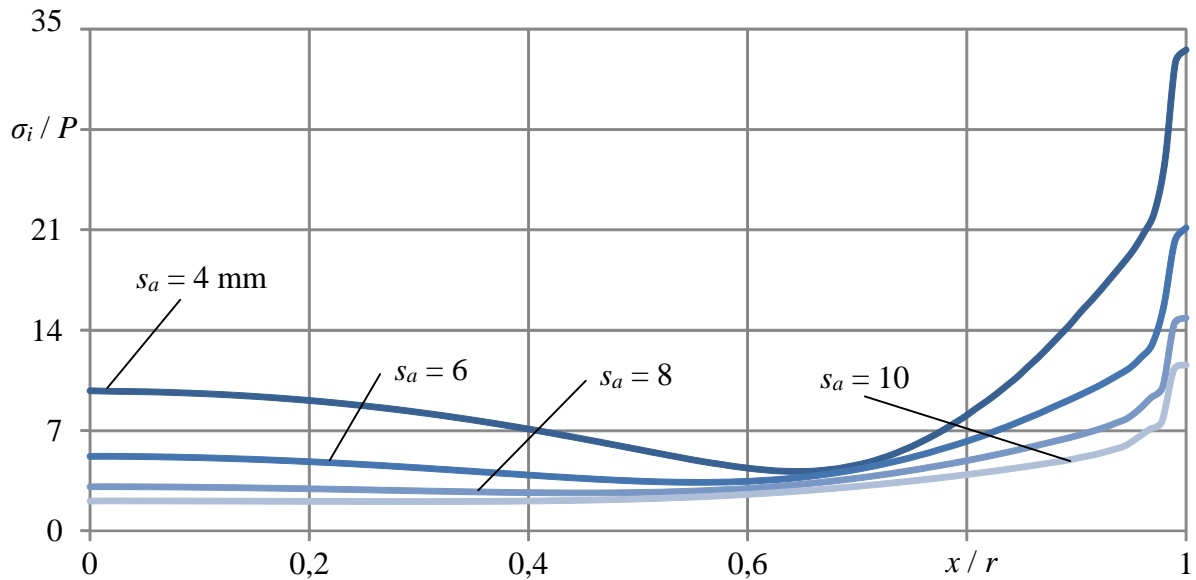


3.2 pav. Didžiausių įtempimų $\sigma_{i\max}$ aklėje kitimas priklausomai nuo santykinio skaičiuojamojo vamzdžio ilgio, esant skirtingoms sienelės storio s_a vertėms, kai: $d = 300$ mm; $\gamma = 1,2$; $r_a = 170$ mm; $L = 25, 100, 300, 900$ mm

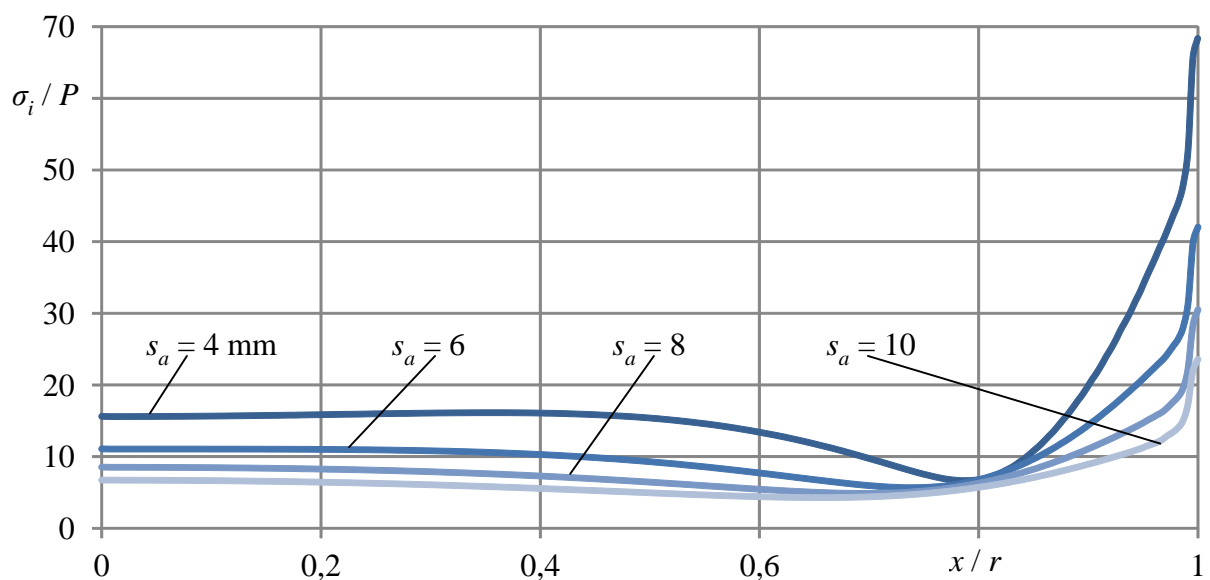
3.1.2. Vamzdžio išorinio skersmens ir vamzdžio bei aklės sienelės storio įtaka

Šiame poskyryje nustatysime, kaip įtempimų intensyvumas σ_i priklauso nuo dujotiekio vamzdžio išorinio skersmens d , vamzdžio sienelės storio s_v ir aklės sienelės storio s_a . Buvo priimta, kad d kitimo ribos bus nuo 100 iki 400 mm, o s_v ir s_a kitimo ribos bus nuo 4 iki 10 mm.

Kaip išilgai (spindulio kryptimi) aklės vidinio paviršiaus pasiskirsto įtempimų intensyvumas σ_i , kai skaičiuojamojo vamzdžio išorinis skersmuo $d = 100$ mm pateikta 3.3 pav. Nustatyta, kad nepriklausomai nuo s_a reikšmės labiausiai apkrauta (pavojinga) vieta yra vidiniame aklės paviršiuje ties sujungimu su vamzdžiu. Šioje vietoje kylantis įtempimų intensyvumas σ_i yra nuo 5,62 iki 8,07 karto didesnis nei kitose aklės vidinio paviršiaus vietose.



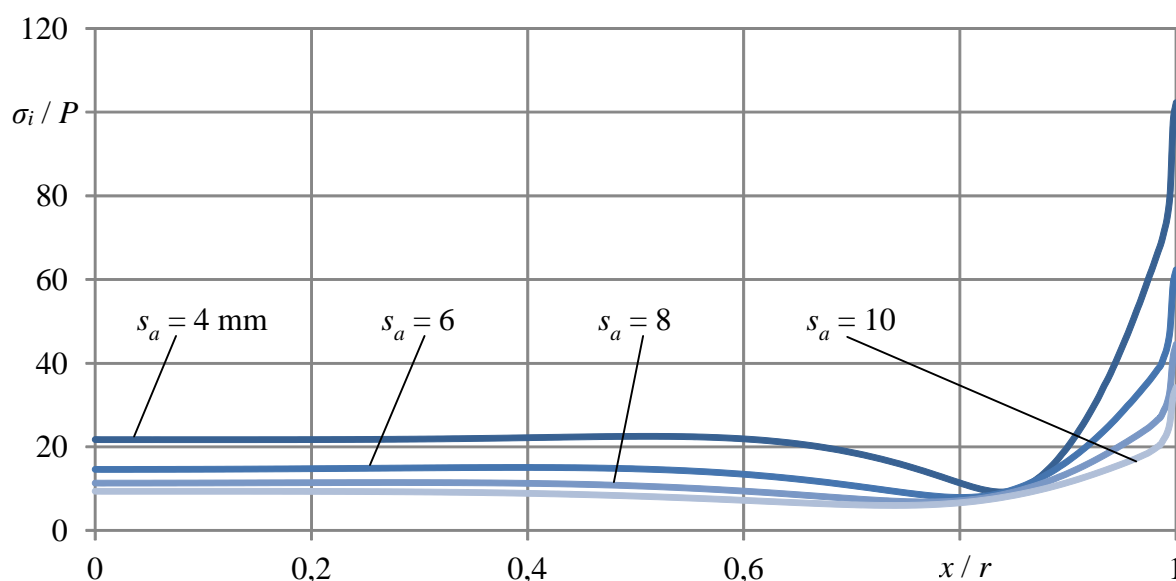
3.3 pav. Įtempimų intensyvumo σ_i pasiskirstymas išilgai vidinio aklės paviršiaus, esant skirtingoms sienelės storio s_a vertėms, kai: $L = d$; $d = 100$ mm; $\gamma = 1,0$; $r_a = 70, 120, 170, 220$ mm



3.4 pav. Įtempimų intensyvumo σ_i pasiskirstymas išilgai vidinio aklės paviršiaus, esant skirtingoms sienelės storio s_a vertėms, kai: $L = d$; $d = 200$ mm; $\gamma = 1,0$; $r_a = 70, 120, 170, 220$ mm

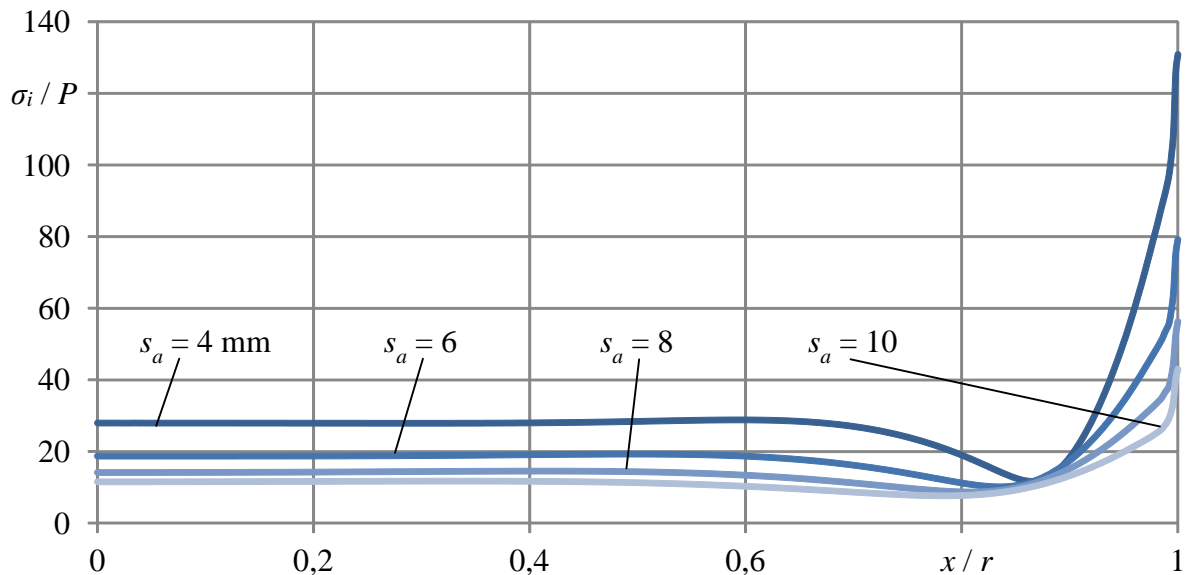
Kaip išilgai (spindulio kryptimi) aklės vidinio paviršiaus pasiskirsto įtempimai σ_i , kai, skaičiuojamojo vamzdžio išorinis skersmuo $d = 200$ mm pateikta 3.4 pav. Nustatyta, kad nepriklausomai nuo s_a reikšmės labiausiai apkrauta (pavojinga) vieta yra vidiniame aklės paviršiuje ties sujungimu su vamzdžiu. Šioje vietoje kylantis įtempimų intensyvumas σ_i yra nuo 5,50 iki 10,28 karto didesnis nei kitose aklės vidinio paviršiaus vietose.

Kaip išilgai (spindulio kryptimi) aklės vidinio paviršiaus pasiskirsto įtempimų intensyvumas σ_i , kai skaičiuojamojo vamzdžio išorinis skersmuo $d = 300$ mm pateikta 3.5 pav. Nustatyta, kad nepriklausomai nuo s_a reikšmės labiausiai apkrauta (pavojinga) vieta yra vidiniame aklės paviršiuje ties sujungimu su vamzdžiu. Šioje vietoje kylantis įtempimų intensyvumas σ_i yra nuo 5,71 iki 11,14 karto didesnis nei kitose aklės vidinio paviršiaus vietose.



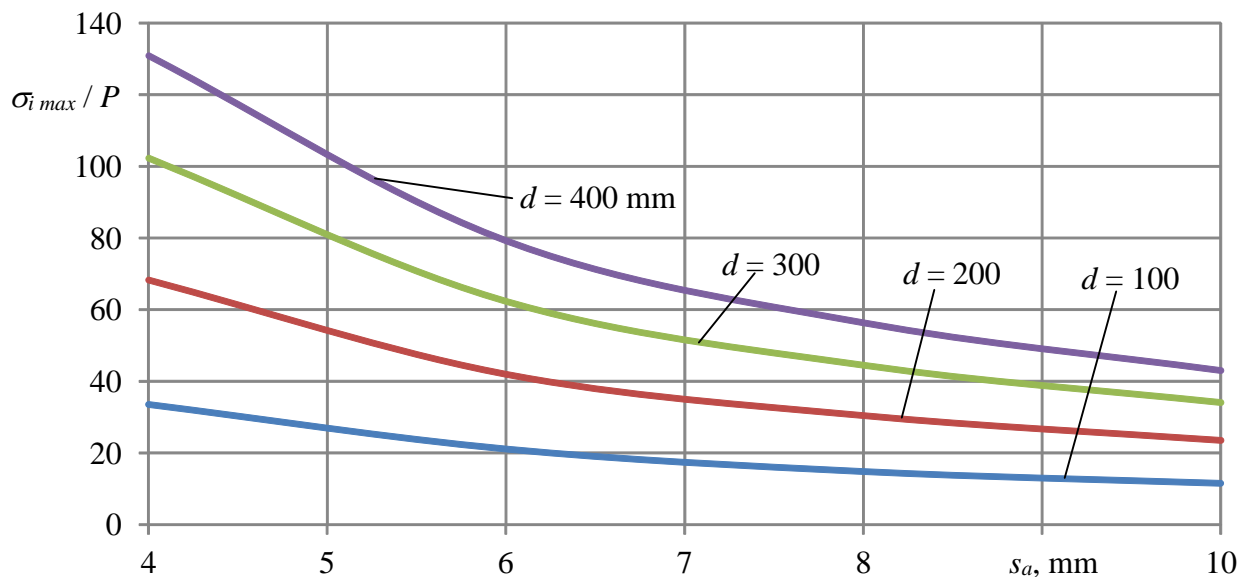
3.5 pav. Įtempimų intensyvumo σ_i pasiskirstymas išilgai vidinio aklės paviršiaus, esant skirtingoms sienelės storio s_a vertėms, kai: $L = d$; $d = 300$ mm; $\gamma = 1,0$; $r_a = 70, 120, 170, 220$ mm

Kaip išilgai aklės vidinio paviršiaus pasiskirsto įtempimų intensyvumas σ_i , kai $d = 400$ mm pateikta 3.6 pav. Nustatyta, kad nepriklausomai nuo s_a reikšmės labiausiai apkrauta (pavojinga) vieta yra vidiniame aklės paviršiuje ties sujungimu su vamzdžiu. Šioje vietoje kylantis įtempimų intensyvumas σ_i yra nuo 5,60 iki 11,16 karto didesnis nei kitose aklės vidinio paviršiaus vietose.



3.6 pav. Įtempimų intensyvumo σ_i pasiskirstymas išilgai vidinio aklės paviršiaus, esant skirtingoms sienelės storio s_a vertėms, kai: $L = d$; $d = 400$ mm; $\gamma = 1,0$; $r_a = 70, 120, 170, 220$ mm

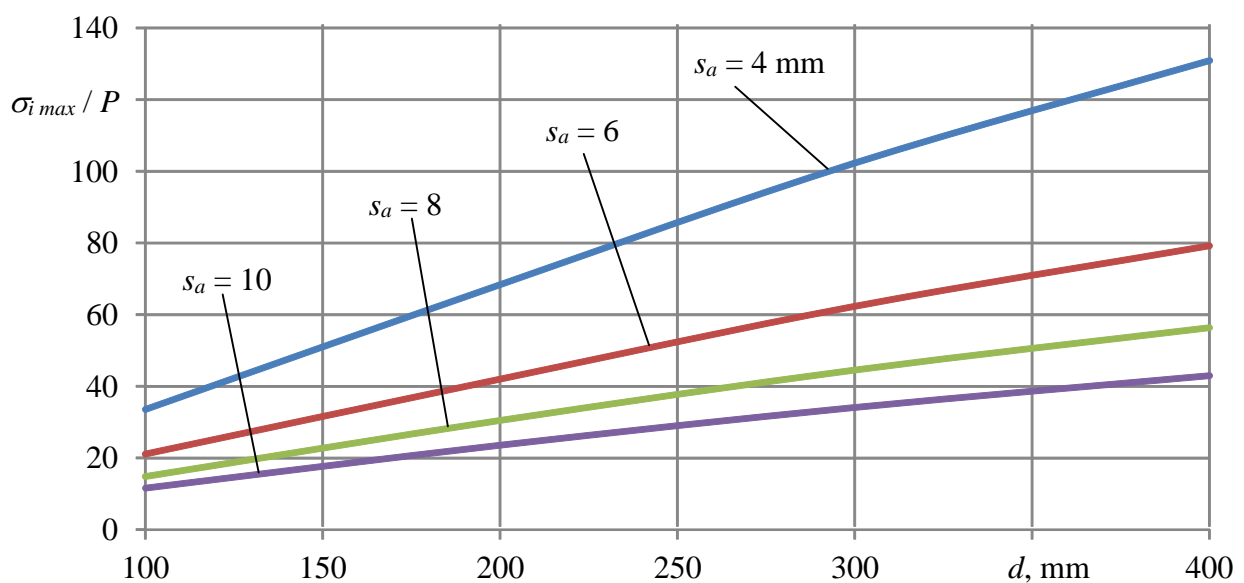
Kaip įtempimų intensyvumas $\sigma_{i \max}$ labiausiai apkrautoje aklės vietoje (ties sujungimu su vamzdžiu) priklauso nuo sienelės storio s_a , esant skirtingiems vamzdžio skersmenims, pateikta 3.7 pav. Neatsižvelgiant į išorinio vamzdžio skersmenį d , didėjant sienelės storiui įtempimai $\sigma_{i \max}$ mažėja. Kuo didesnis d , tuo didesnę įtaką įtempimų intensyvumui turi sienelės storis s_a . Sienelės storiui padidėjus 2,5 karto, įtempimai $\sigma_{i \max}$ sumažėja apie 3 kartus. Gauta, kad įtempimų



3.7 pav. Aklės pavojingoje vietoje įtempimų intensyvumo $\sigma_{i \max}$ priklausomybė nuo sienelės storio s_a , esant skirtingoms vamzdžio skersmens d vertėms, kai: $L = d$; $r_a = 70, 120, 170, 220$ mm; $\gamma = 1,0$

intensyvumo $\sigma_{i\ max}$ pavojingoje vietoje priklausomybė nuo sienelės storio yra artima tiesinei (tiesinės regresijos lygties vidutinis koreliacijos koeficientas [13] yra 0,96 – tai stiprus tiesinis ryšys).

Aklės labiausiai apkrautoje vietoje įtempimų intensyvumo $\sigma_{i\ max}$ priklausomybė nuo vamzdžio išorinio skersmens d pateikta 3.8 pav. Didėjant d , įtempimų intensyvumas $\sigma_{i\ max}$ taip pat didėja. Iš 3.8 pav. matyti, kad įtempimų intensyvumo $\sigma_{i\ max}$ padidėjimas proporcingas vamzdžio išorinio skersmens padidėjimui (tarp d ir $\sigma_{i\ max}$ gautas beveik tiesinis ryšys). Gauta, kad įtempimų intensyvumo pavojingoje vietoje priklausomybė nuo vamzdžio išorinio skersmens yra tiesinė (tiesinės regresijos lygties vidutinis koreliacijos koeficientas yra 1,0).

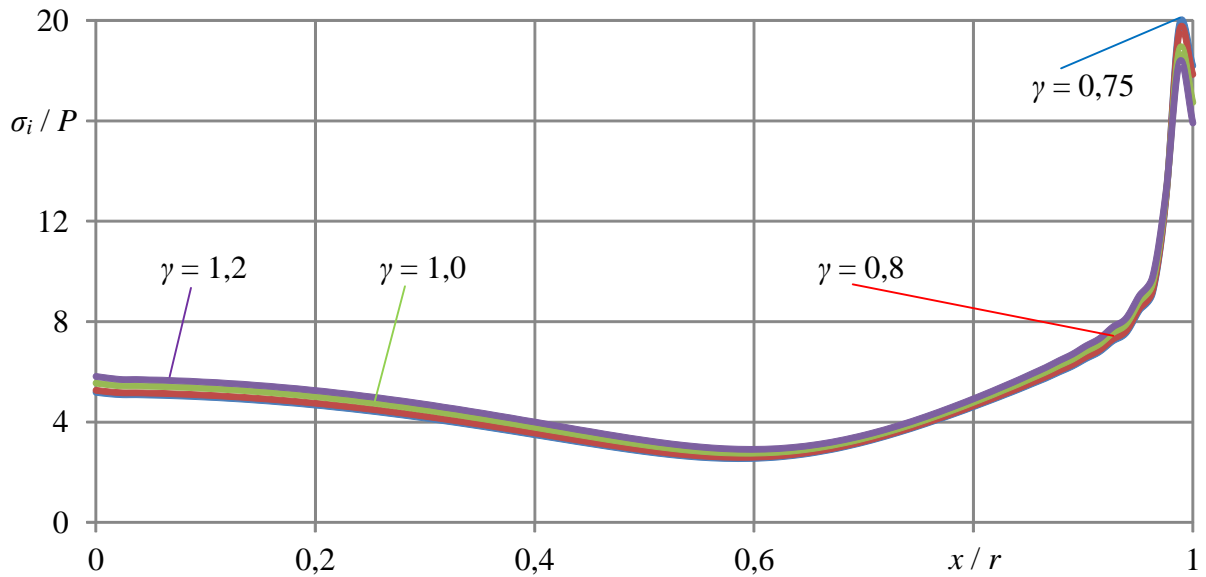


3.8 pav. Aklės pavojingoje vietoje įtempimų intensyvumo $\sigma_{i\ max}$ priklausomybė nuo vamzdžio išorinio skersmens d , esant skirtingoms sienelės storio s_a vertėms, kai: $L = d$; $\gamma = 1,0$; $r_a = 70, 120, 170, 220$ mm

3.1.3. Mechaninio nevienalytiškumo įtaka

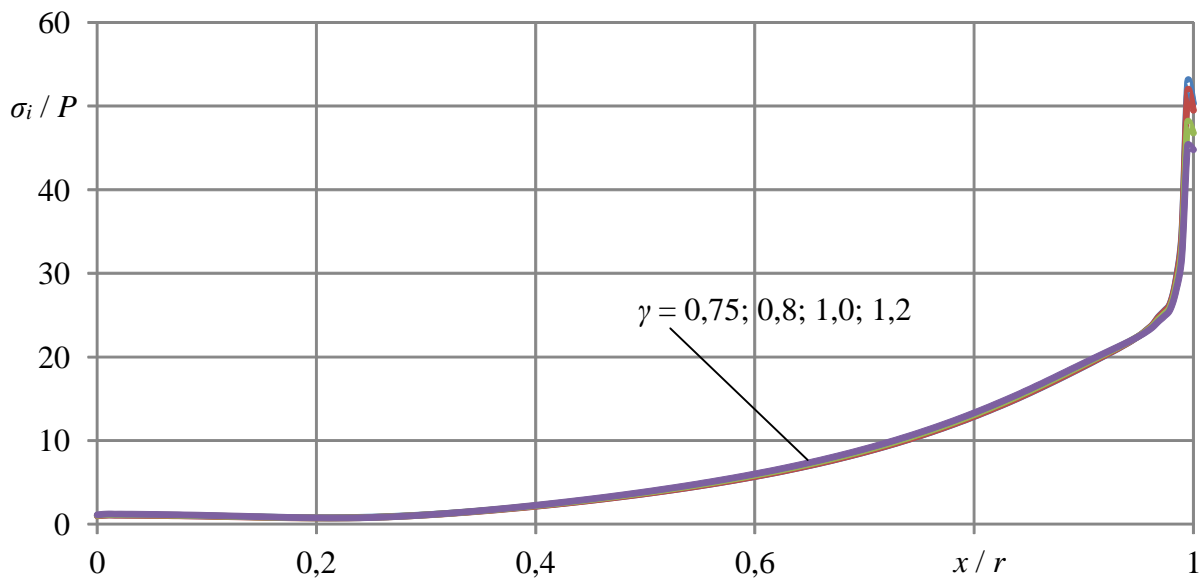
Šiame poskyryje nustatysime, kaip įtempimų intensyvumas σ_i priklauso nuo mechaninio nevienalytiškumo γ . Buvo priimta, kad γ kitimo ribos bus nuo 0,75 iki 1,2.

Kaip įtempimų intensyvumas σ_i išilgai aklės vidinio paviršiaus priklauso nuo mechaninio nevienalytiškumo γ , kai $d = 100$ mm pateikta 3.9 pav. Nustatyta, kad nepriklausomai nuo γ reikšmės labiausiai apkrauta vieta yra vidiniame aklės paviršiuje ties sujungimu su vamzdžiu. Šioje vietoje kylantis įtempimų intensyvumas $\sigma_{i\ max}$ yra nuo 6,31 iki 7,78 karto didesnis nei kitose aklės vidinio paviršiaus vietose.



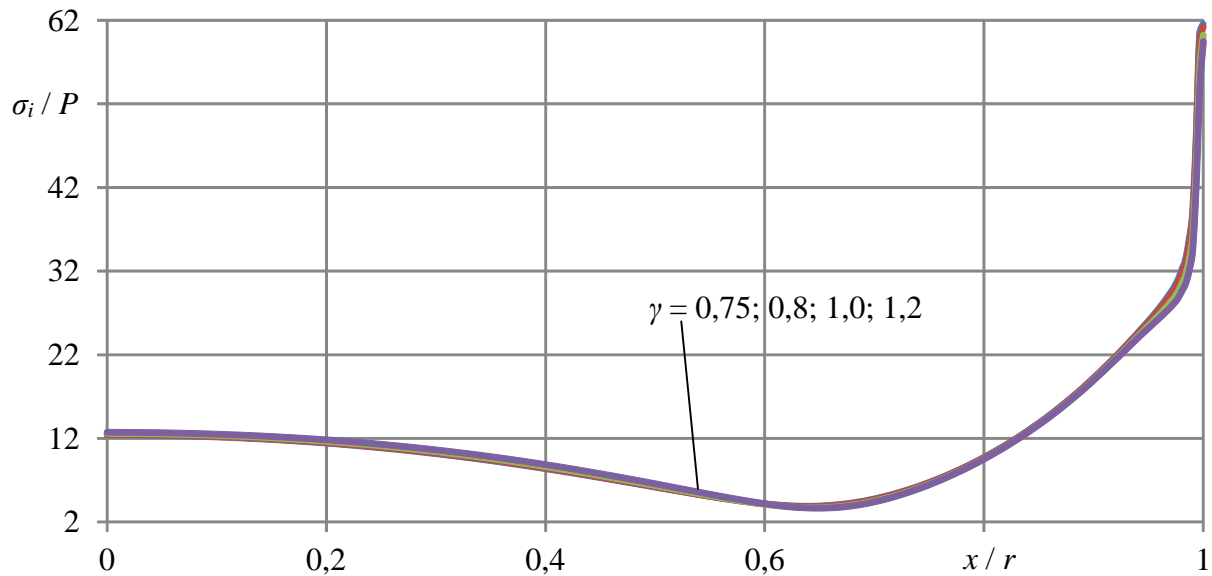
3.9 pav. Įtempimų σ_i pasiskirstymas išilgai vidinio aklės paviršiaus, esant skirtingoms mechaninio nevienalytiškumo γ vertėms, kai: $L = d$; $d = 100$ mm; $r_a = 220$ mm; $s_a = 10$ mm

Kaip įtempimų intensyvumas σ_i išilgai aklės vidinio paviršiaus priklauso nuo mechaninio nevienalytiškumo γ , kai skaičiuojamojo vamzdžio išorinis skersmuo $d = 200$ mm pateikta 3.10 pav. Nustatyta, kad nepriklausomai nuo γ reikšmės labiausiai apkrauta vieta yra vidiniame aklės paviršiuje ties sujungimu su vamzdžiu. Šioje vietoje kylantis įtempimų intensyvumas $\sigma_{i \max}$ yra nuo 61,68 iki 68,76 karto didesnis nei kitose aklės vidinio paviršiaus vietose.

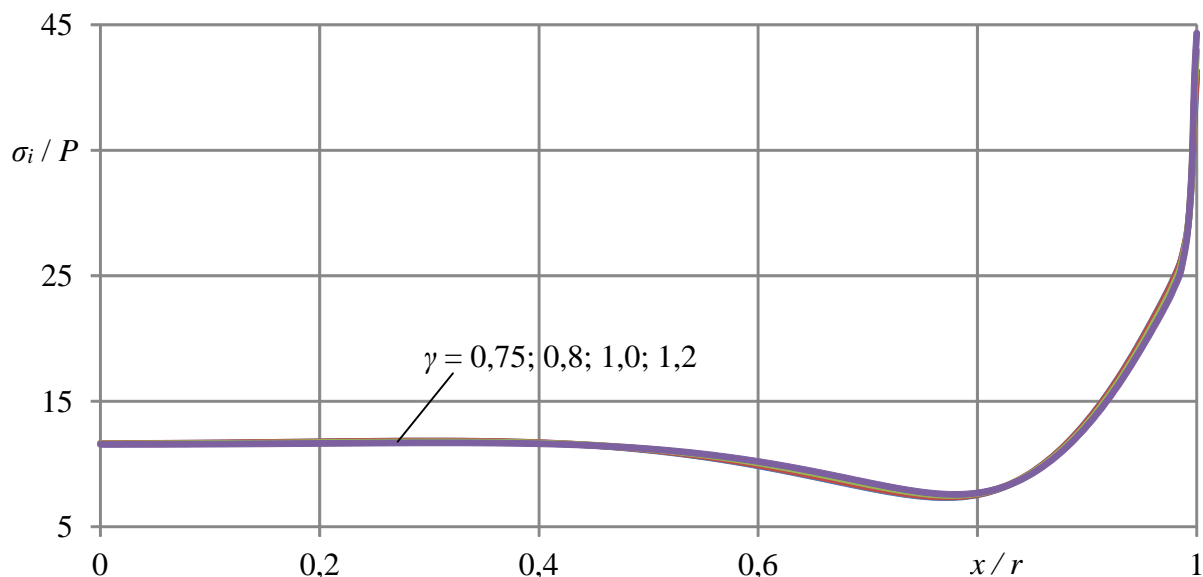


3.10 pav. Įtempimų σ_i pasiskirstymas išilgai vidinio aklės paviršiaus, esant skirtingoms mechaninio nevienalytiškumo γ vertėms, kai: $L = d$; $d = 200$ mm; $r_a = 220$ mm; $s_a = 10$ mm

Kaip įtempimų intensyvumas σ_i išilgai aklės vidinio paviršiaus priklauso nuo mechaninio nevienalytiškumo γ , kai skaičiuojamojo vamzdžio išorinis skersmuo $d = 300$ mm pateikta 3.11 pav. Nustatyta, kad nepriklausomai nuo γ reikšmės labiausiai apkrauta vieta yra vidiniame aklės paviršiuje ties sujungimu su vamzdžiu. Šioje vietoje kylantis įtempimų intensyvumas $\sigma_{i \max}$ yra nuo 15,90 iki 16,35 karto didesnis nei kitose aklės vidinio paviršiaus vietose.



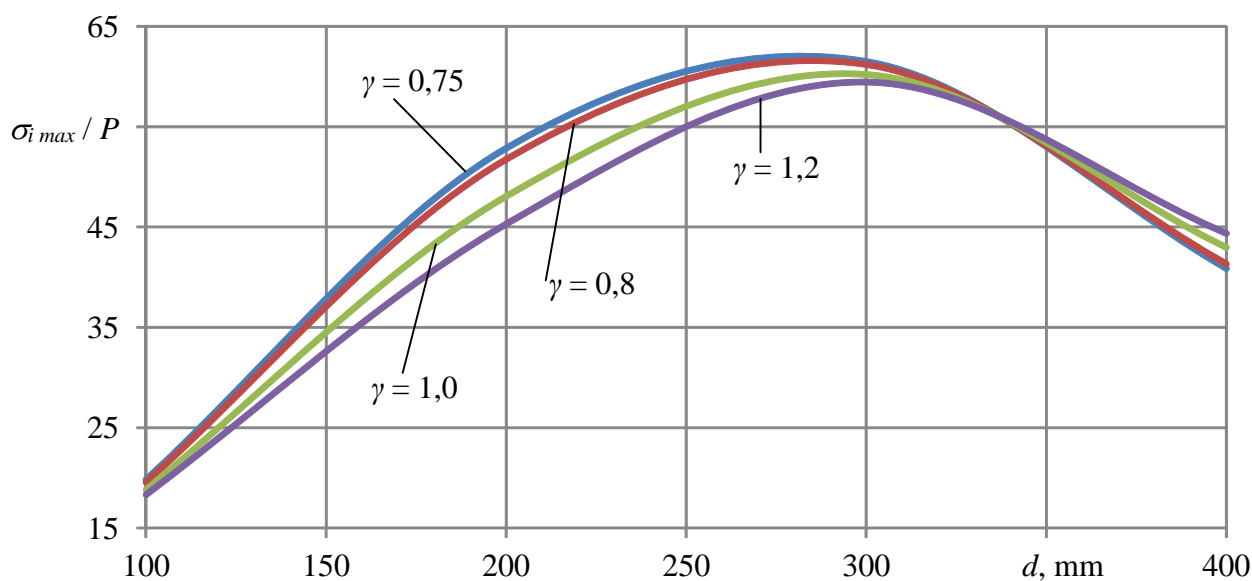
3.11 pav. Įtempimų σ_i pasiskirstymas išilgai vidinio aklės paviršiaus, esant skirtingoms mechaninio nevienalytiškumo γ vertėms, kai: $L = d$; $d = 300$ mm; $r_a = 220$ mm; $s_a = 10$ mm



3.12 pav. Įtempimų σ_i pasiskirstymas išilgai vidinio aklės paviršiaus, esant skirtingoms mechaninio nevienalytiškumo γ vertėms, kai: $L = d$; $d = 400$ mm; $r_a = 220$ mm; $s_a = 10$ mm

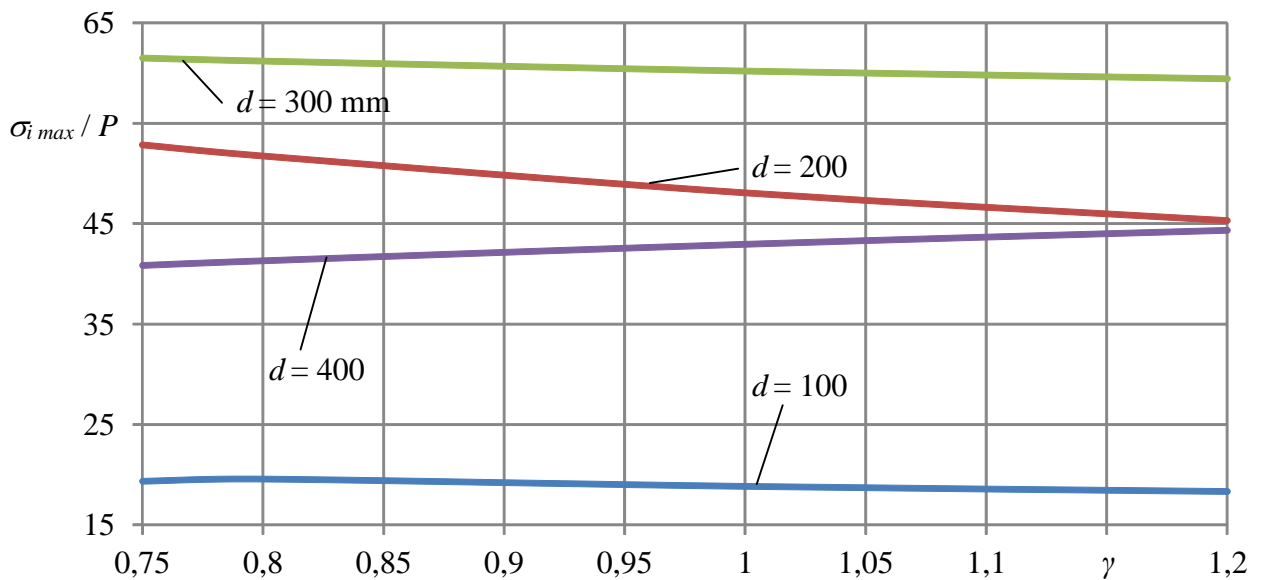
Kaip įtempimų intensyvumas σ_i išilgai aklės vidinio paviršiaus priklauso nuo mechaninio nevienalytiškumo γ , kai skaičiuojamojo vamzdžio išorinis skersmuo $d = 400$ mm pateikta 3.12 pav. Nustatyta, kad nepriklausomai nuo γ reikšmės labiausiai apkrauta vieta yra vidiniame aklės paviršiuje ties sujungimu su vamzdžiu. Šioje vietoje kylantis įtempimų intensyvumas $\sigma_{i \max}$ yra nuo 5,57 iki 5,84 karto didesnis nei kitose aklės vidinio paviršiaus vietose.

3.13 pav. pateikta kaip labiausiai apkrautoje aklės vietoje įtempimų intensyvumo $\sigma_{i \max}$ priklausomybė kinta nuo vamzdžio išorinio skersmens d , esant skirtingiems γ . Nustatyta, kad vamzdžio išoriniam skersmeniui padidėjus 4 kartus, įtempimai $\sigma_{i \max}$ kinta nuo 0,41 iki 0,48 karto.



3.13 pav. Aklės pavojingoje vietoje įtempimų intensyvumo $\sigma_{i \max}$ priklausomybė nuo vamzdžio išorinio skersmens d , esant skirtingoms mechaninio nevienalytiškumo γ vertėms, kai: $L = d$; $r_a = 220$ mm; $s_a = 10$ mm

3.14 pav. pateikta kaip labiausiai apkrautoje aklės vietoje įtempimų intensyvumo $\sigma_{i \max}$ priklausomybė kinta nuo mechaninio nevienalytiškumo γ . Iš 3.14 pav. matome, kad kintant γ įtempimai $\sigma_{i \max}$ kinta nežymiai. Nustatyta, kad mechaniniam nevienalytiškumui γ pasikeitus nuo 0,75 iki 1,2 įtempimai $\sigma_{i \max}$ kinta nuo 0,92 iki 1,17 karto. Gauta, kad įtempimų intensyvumo pavojingoje vietoje priklausomybė nuo mechaninio nevienalytiškumo yra artima tiesinei (tiesinės regresijos lygties vidutinis koreliacijos koeficientas yra 0,99 – tai stiprus tiesinis ryšys).

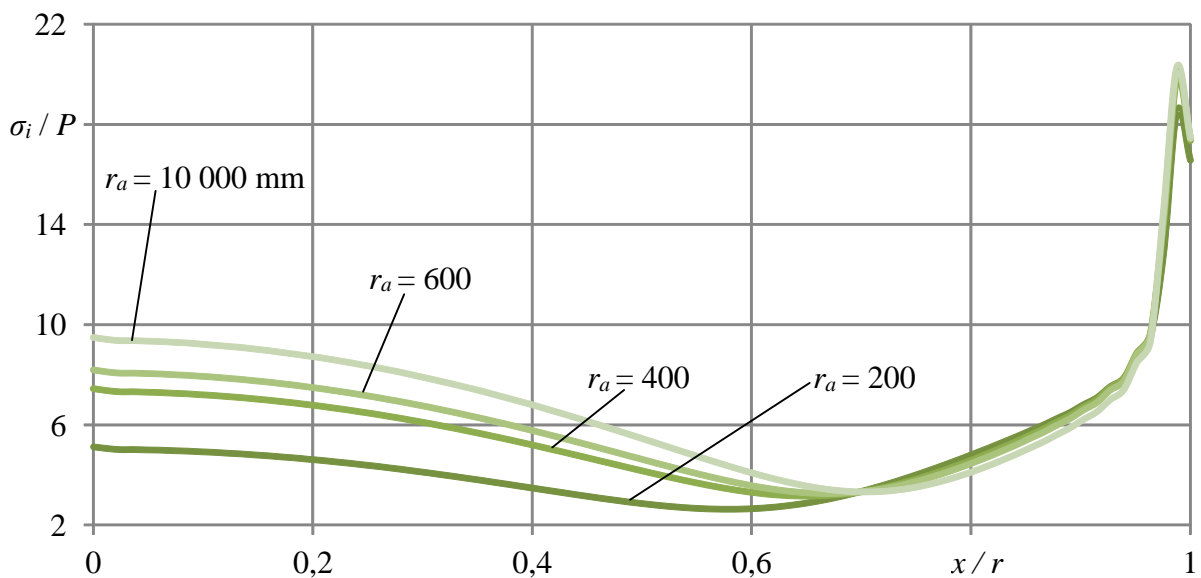


3.14 pav. Aklės pavojingoje vietoje įtempimų intensyvumo $\sigma_{i\max}$ priklausomybė nuo mechaninio nevienalytiškumo γ , esant skirtingoms vamzdžio išorinio skersmens d vertėms, kai: $L = d$; $r_a = 220$ mm; $s_a = 10$ mm

3.1.4. Aklės spindulio įtaka

Šiame poskyryje nustatysime, kaip įtempimų intensyvumas σ_i priklauso nuo aklės spindulio r_a (žr. 2.1 pav.). Buvo priimta, kad r_a kitimo ribos bus nuo 200 iki 10 000 mm (plokščia aklė).

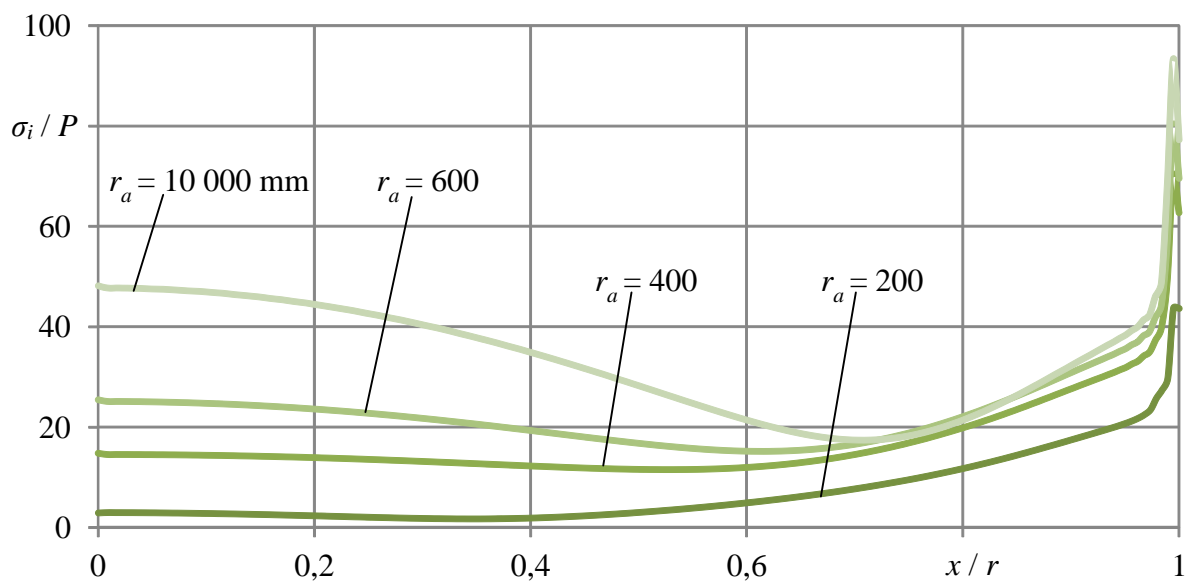
Kaip įtempimų intensyvumas σ_i išilgai aklės vidinio paviršiaus priklauso nuo aklės spindulio r_a , kai skaičiuojamojo vamzdžio išorinis skersmuo $d = 100$ mm pateikta 3.15 pav.



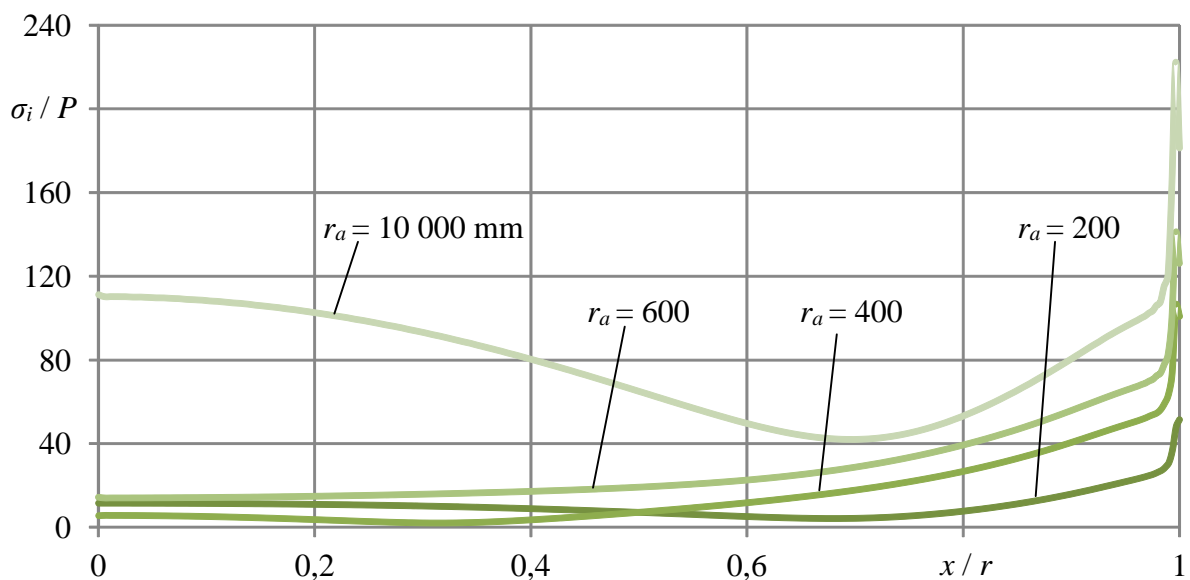
3.15 pav. Įtempimų intensyvumo σ_i pasiskirstymas išilgai vidinio aklės paviršiaus, esant skirtingoms aklės spindulio r_a vertėms, kai: $L = d$; $d = 100$ mm; $s_a = 10$ mm; $\gamma = 1,0$

Nustatyta, kad nepriklausomai nuo r_a reikšmės labiausiai apkrauta (pavojinga) vieta yra vidiniame aklės paviršiuje ties sujungimu su vamzdžiu. Šioje vietoje kylantis įtempimų intensyvumas $\sigma_{i\ max}$ yra nuo 6,10 iki 7,04 karto didesnis nei kitose aklės vidinio paviršiaus vietose.

Kaip įtempimų intensyvumas σ_i išilgai aklės vidinio paviršiaus priklauso nuo aklės spindulio r_a , kai skaičiuojamojo vamzdžio išorinis skersmuo $d = 200$ mm pateikta 3.16 pav. Nustatyta, kad nepriklausomai nuo r_a reikšmės labiausiai apkrauta (pavojinga) vieta yra vidiniame aklės paviršiuje ties sujungimu su vamzdžiu. Šioje vietoje kylantis įtempimų intensyvumas $\sigma_{i\ max}$ yra nuo 5,36 iki 25,26 karto didesnis nei kitose aklės vidinio paviršiaus vietose.



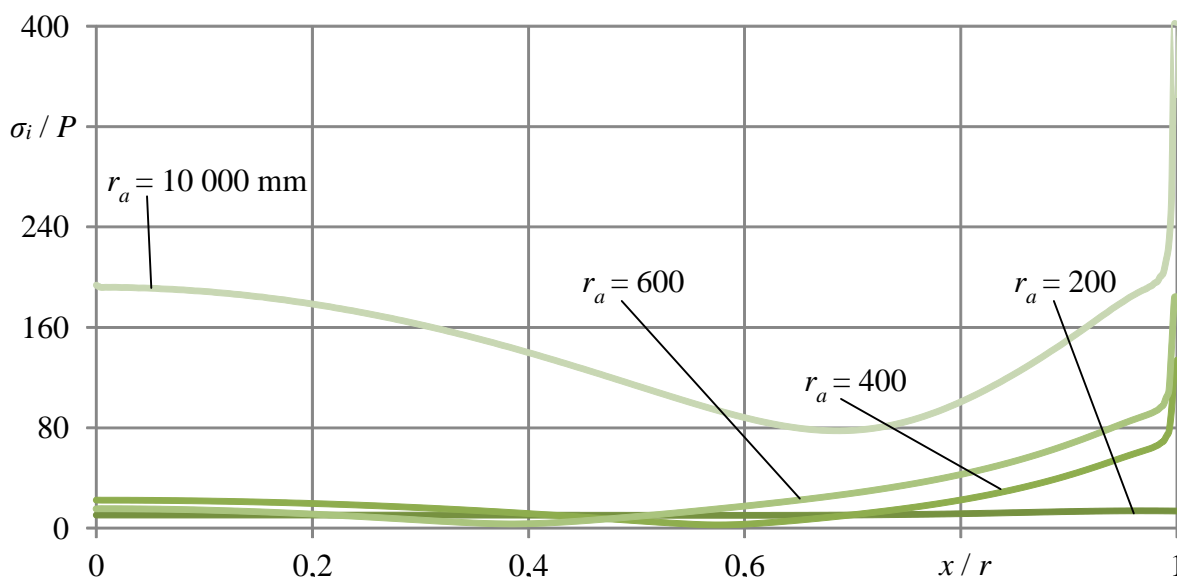
3.16 pav. Įtempimų intensyvumo σ_i pasiskirstymas išilgai vidinio aklės paviršiaus, esant skirtingoms aklės spindulio r_a vertėms, kai: $L = d$; $d = 200$ mm; $s_a = 10$ mm; $\gamma = 1,0$



3.17 pav. Įtempimų intensyvumo σ_i pasiskirstymas išilgai vidinio aklės paviršiaus, esant skirtingoms aklės spindulio r_a vertėms, kai: $L = d$; $d = 300$ mm; $s_a = 10$ mm; $\gamma = 1,0$

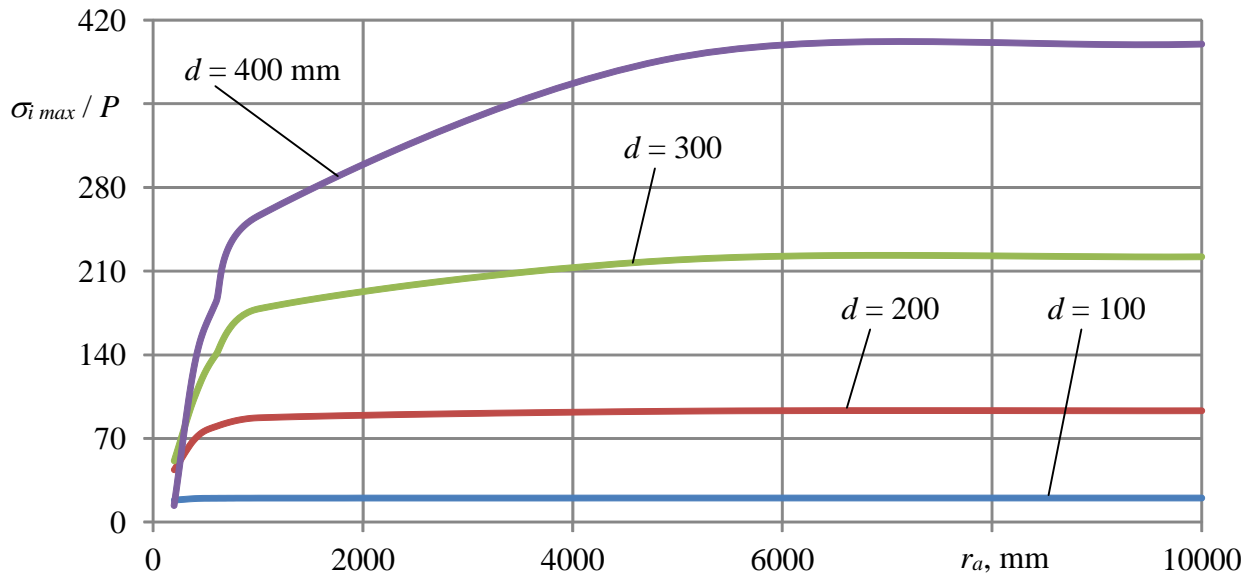
Kaip įtempimų intensyvumas σ_i išilgai aklės vidinio paviršiaus priklauso nuo aklės spindulio r_a , kai skaičiuojamojo vamzdžio išorinis skersmuo $d = 300$ mm pateikta 3.17 pav. Nustatyta, kad nepriklausomai nuo r_a reikšmės labiausiai apkrauta (pavojinga) vieta yra vidiniame aklės paviršiuje ties sujungimu su vamzdžiu. Šioje vietoje kylantis įtempimų intensyvumas $\sigma_{i\max}$ yra nuo 5,29 iki 12,13 karto didesnis nei kitose aklės vidinio paviršiaus vietose.

Kaip įtempimų intensyvumas σ_i išilgai aklės vidinio paviršiaus priklauso nuo aklės spindulio r_a , kai skaičiuojamojo vamzdžio išorinis skersmuo $d = 400$ mm pateikta 3.18 pav. Nustatyta, kad nepriklausomai nuo r_a reikšmės labiausiai apkrauta (pavojinga) vieta yra vidiniame aklės paviršiuje ties sujungimu su vamzdžiu. Šioje vietoje kylantis įtempimų intensyvumas $\sigma_{i\max}$ yra nuo 1,35 iki 5,16 karto didesnis nei kitose aklės vidinio paviršiaus vietose.



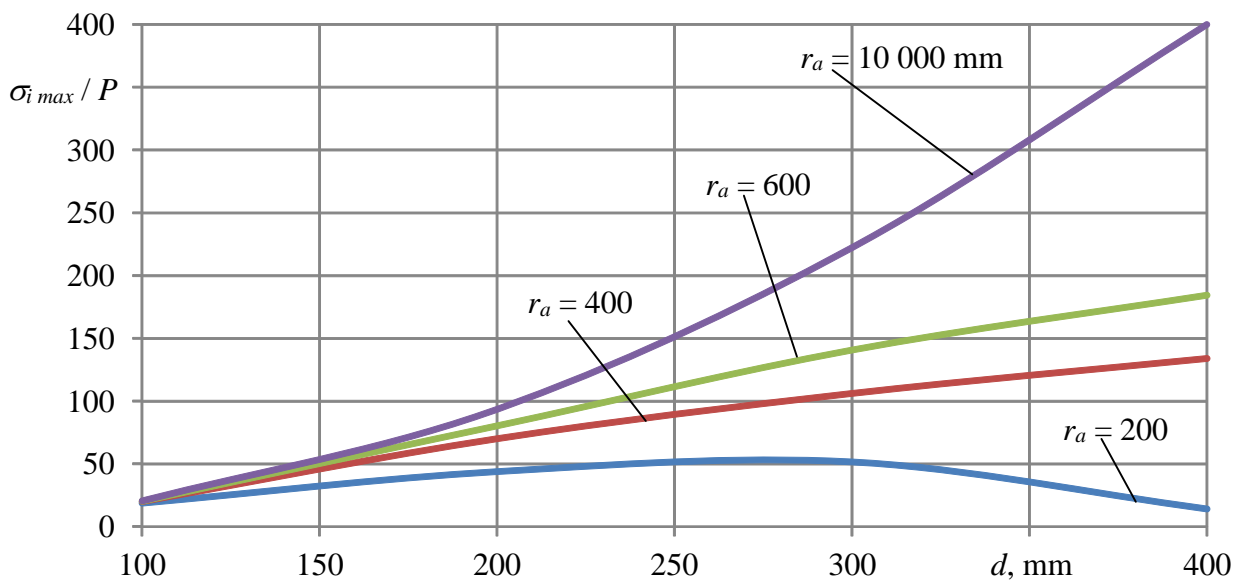
3.18 pav. Įtempimų intensyvumo σ_i pasiskirstymas išilgai vidinio aklės paviršiaus, esant skirtingoms aklės spindulio r_a vertėms, kai: $L = d$; $d = 400$ mm; $s_a = 10$ mm; $\gamma = 1,0$

Kaip įtempimų intensyvumas $\sigma_{i\max}$ labiausiai apkrautoje aklės vietoje (ties sujungimu su vamzdžiu) priklauso nuo aklės spindulio r_a pateikta 3.19 pav. Kai $r_a / d \leq \approx 15$, tai didėjant aklės spinduliui r_a (t. y. sferinei aklei artėjant prie plokščios aklės) įtempimai $\sigma_{i\max}$ didėja, o kai $r_a / d > \approx 15$ – įtempimų $\sigma_{i\max}$ vertėms r_a įtakos nebeturi. Taigi galime laikyti, kad plokščios aklės ir sferinės aklės, kurios $r_a / d > \approx 15$, stiprumai bus vienodi. Nustatyta, kad esant tokiam pat aklės skersmeniui ir sienelės storiui, sferinės aklės stiprumas visada bus didesnis už plokščios aklės stiprumą. Todėl nerekomenduojama naudoti plokščias akles.



3.19 pav. Aklės pavojingoje vietoje įtempimų $\sigma_{i \max}$ priklausomybė nuo aklės spindulio r_a , esant skirtingoms vamzdžio skersmens d vertėms, kai: $L = d$; $s_a = 10$ mm; $\gamma = 1,0$

Kaip labiausiai apkrautoje aklės vietoje įtempimų intensyvumas $\sigma_{i \max}$ priklauso nuo vamzdžio išorinio skersmens d , didinant aklės spindulį r_a , (aklei tampant plokščiai) pateikta 3.20 pav. Didinant vamzdžio išorinį skersmenį d , įtempimai $\sigma_{i \max}$ taip pat didėja. Iš 3.20 pav. matyti, kad padidinus vamzdžio išorinį skersmenį 4 kartus, įtempimai $\sigma_{i \max}$ padidėja nuo 3,70 iki 19,70 karto. Gauta, kad įtempimų intensyvumo pavojingoje vietoje priklausomybė nuo vamzdžio išorinio skersmens yra artima tiesinei (tiesinės regresijos lygties vidutinis koreliacijos koeficientas yra 0,75 – tai stiprus tiesinis ryšys).



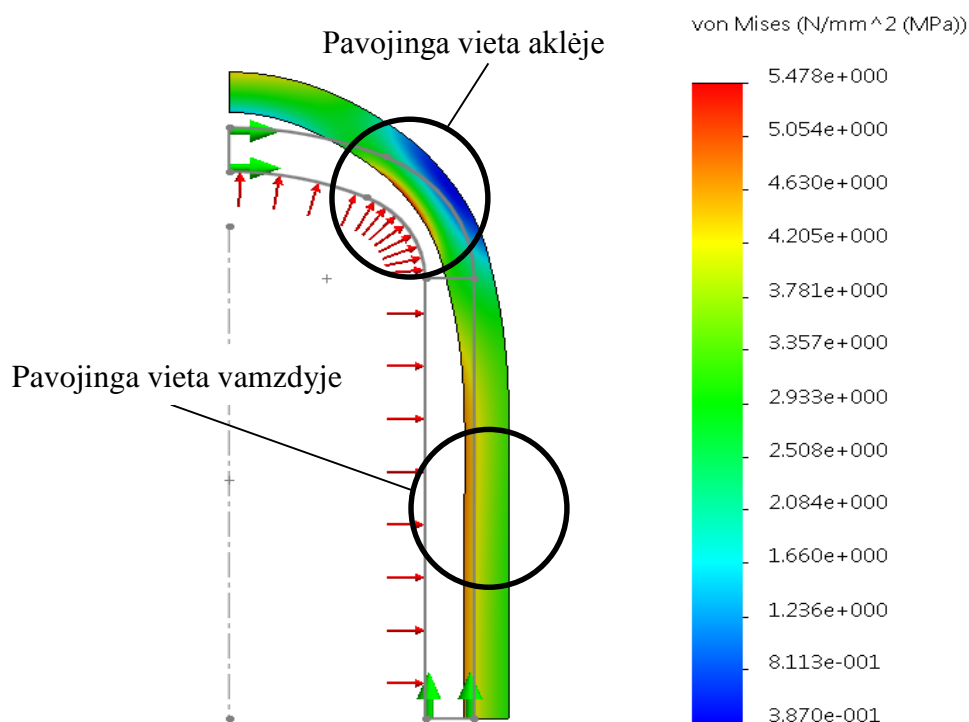
3.20 pav. Aklės pavojingoje vietoje įtempimų $\sigma_{i \max}$ priklausomybė nuo vamzdžio išorinio skersmens d , esant skirtingoms aklės spindulio r_a vertėms, kai: $L = d$; $s_a = 10$ mm; $\gamma = 1,0$

3.2. Elipsinė aklė

Tipinis deformavimosi pobūdis ir įtempimų intensyvumo pasiskirstymas dujotiekio vamzdyje ir elipsinėje aklėje, veikiant 1 MPa vidiniam slėgiui pateiktas 3.21 pav.

Šiame poskyryje tirsime kaip elipsinės aklės stiprumas priklauso nuo:

- dujotiekio vamzdžio išorinio skersmens d (kitimo ribos: nuo 100 iki 400 mm), dujotiekio vamzdžio ir aklės sienelės storio $s_a = s_v$ (kitimo ribos: nuo 4 iki 10 mm);
- mechaninio nevienalytiškumo γ (kitimo ribos: nuo 0,75 iki 1,2);
- aklės spindulių r_{a1} (kitimo ribos: nuo 70 iki 220 mm); $r_{a2} = 20$ mm.

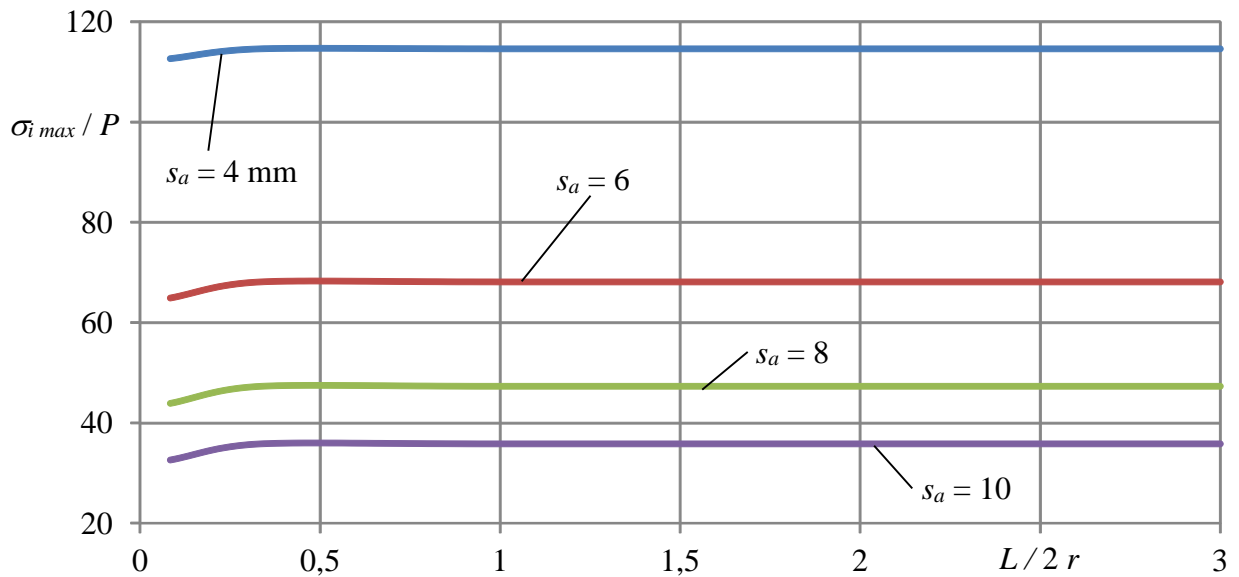


3.21 pav. Vamzdžio ir elipsinės aklės deformavimosi pobūdis, įtempimų intensyvumo pasiskirstymas, kai: $L = d$; $d = 100$ mm; $s_a = 10$ mm; $r_{a1} = 70$ mm; $r_{a2} = 20$ mm; $\gamma = 1,0$

3.2.1. Skaičiuojamojo vamzdžio ilgio nustatymas

Šiame poskyryje nustatysime, koks turi būti skaičiuojamasis vamzdžio ilgis L (žr. 2.1 pav.). Buvo priimta, kad L kitimo ribos bus nuo 25 iki 900 mm. Skaičiuotinu dujotiekio vamzdžio ilgiu laikomas toks vamzdžio ilgis, kuris neturi įtakos įtempimų vertėms aklėse.

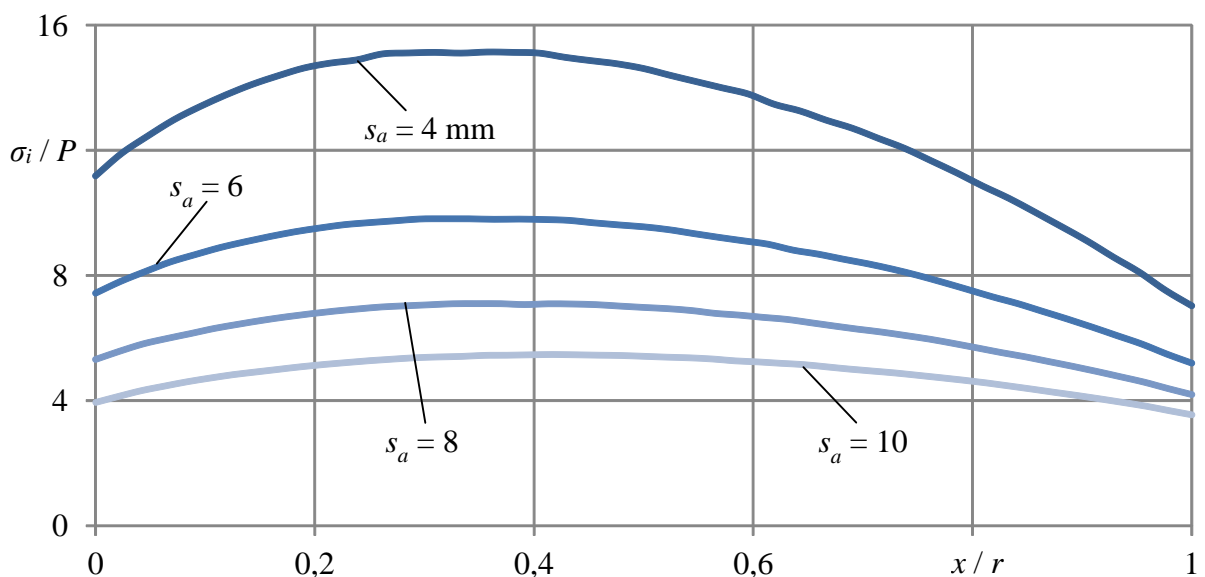
3.22 pav. pateikta kaip didžiausi įtempimai aklėje (analogiškai ir vamzdyje) kinta didinant skaičiuotino vamzdžio ilgį L . Nustatyta, kad skaičiuotinam vamzdžio ilgiui viršijus $\sim 0,43 d$ didžiausi įtempimai aklėje ir vamzdyje praktiškai nebesikeičia. Todėl 3.2. poskyryje skaičiuojamąjį vamzdžio ilgį L imsime lygų d .



3.22 pav. Didžiausių įtempimų aklėje ir vamzdyje kitimas priklausomai nuo santykinio skaičiuojamojo vamzdžio ilgio, esant skirtingoms sienelės storio s_a vertėms, kai: $d = 300$ mm; $L = 25, 100, 300, 900$ mm; $r_{a1} = 170$ mm; $r_{a2} = 20$ mm; $\gamma = 1,0$

3.2.2. Vamzdžio išorinio skersmens ir vamzdžio bei aklės sienelės storio įtaka

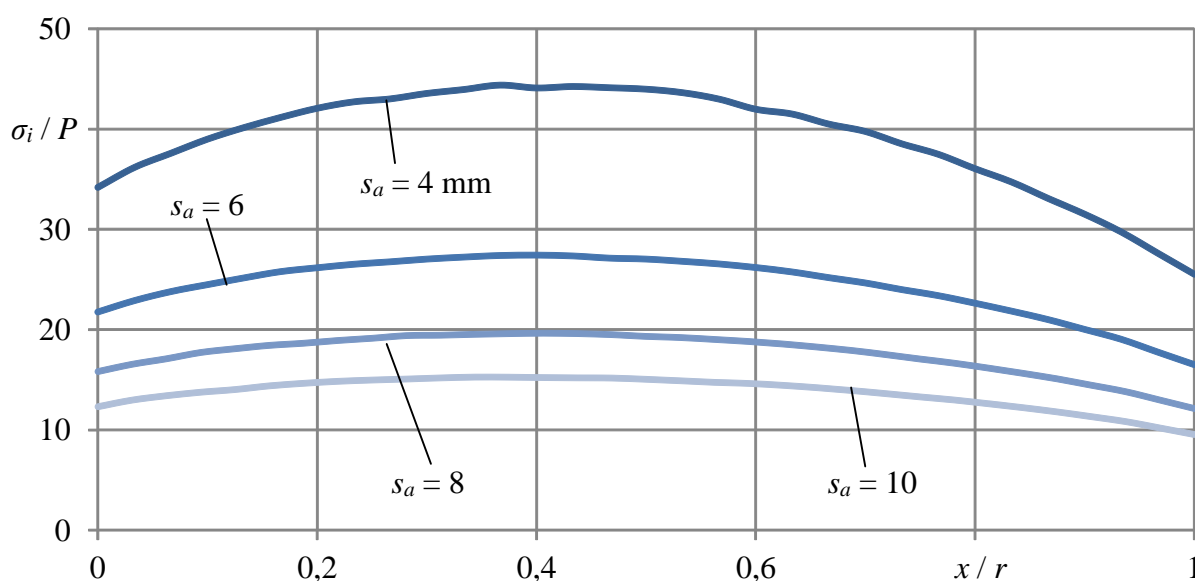
Šiame poskyryje nustatysime, kaip įtempimų intensyvumas σ_i priklauso nuo dujotiekio vamzdžio išorinio skersmens d , vamzdžio sienelės storio s_v ir aklės sienelės storio s_a . Buvo priimta, kad d kitimo ribos bus nuo 100 iki 400 mm, o s_v ir s_a kitimo ribos bus nuo 4 iki 10 mm.



3.23 pav. Įtempimų intensyvumo pasiskirstymas išilgai vidinio aklės paviršiaus, esant skirtingoms sienelės storio s_a vertėms, kai: $L = d$; $d = 100$ mm; $r_{a1} = 70, 120, 170, 220$ mm; $r_{a2} = 20$ mm; $\gamma = 1,0$

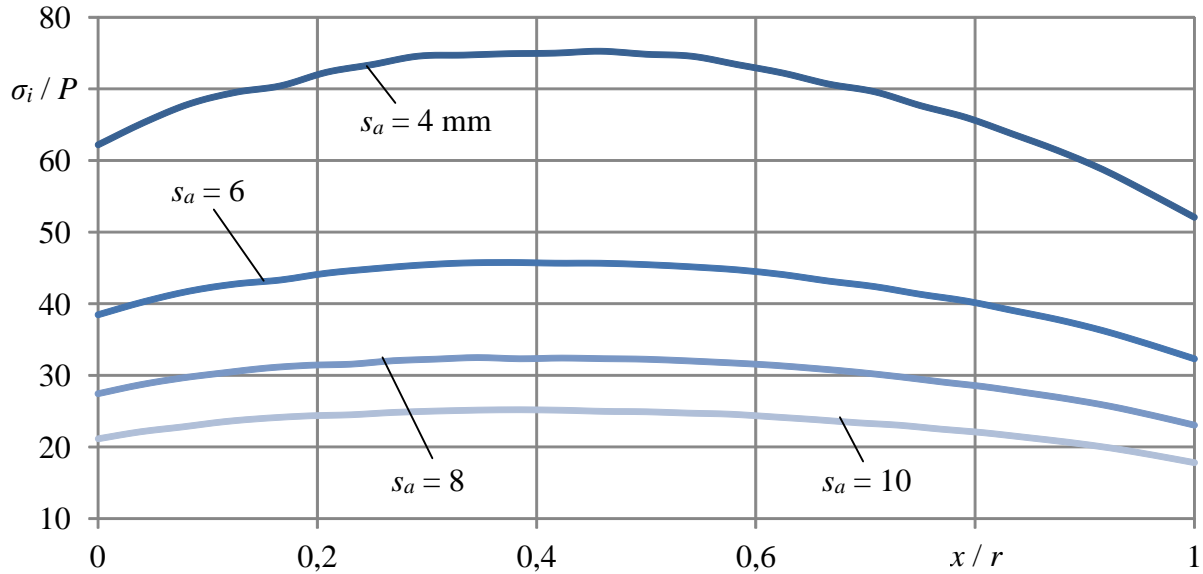
Kaip išilgai (spindulio kryptimi) aklės vidinio paviršiaus pasiskirsto įtempimų intensyvumas σ_i , kai skaičiuojamojo vamzdžio išorinis skersmuo $d = 100$ mm pateikta 3.23 pav. Nustatyta, kad nepriklausomai nuo s_a reikšmės labiausiai apkrauta (pavojinga) vieta yra vidiniame aklės paviršiuje, spindulyje r_{a2} . Šioje vietoje kylantis įtempimų intensyvumas σ_i yra nuo 1,54 iki 2,15 karto didesnis nei kitose aklės vidinio paviršiaus vietose.

Kaip išilgai (spindulio kryptimi) aklės vidinio paviršiaus pasiskirsto įtempimų intensyvumas σ_i , kai skaičiuojamojo vamzdžio išorinis skersmuo $d = 200$ mm pateikta 3.24 pav. Nustatyta, kad nepriklausomai nuo s_a reikšmės labiausiai apkrauta (pavojinga) vieta yra vidiniame aklės paviršiuje, spindulyje r_{a2} . Šioje vietoje kylantis įtempimų intensyvumas σ_i yra nuo 1,60 iki 1,74 karto didesnis nei kitose aklės vidinio paviršiaus vietose.



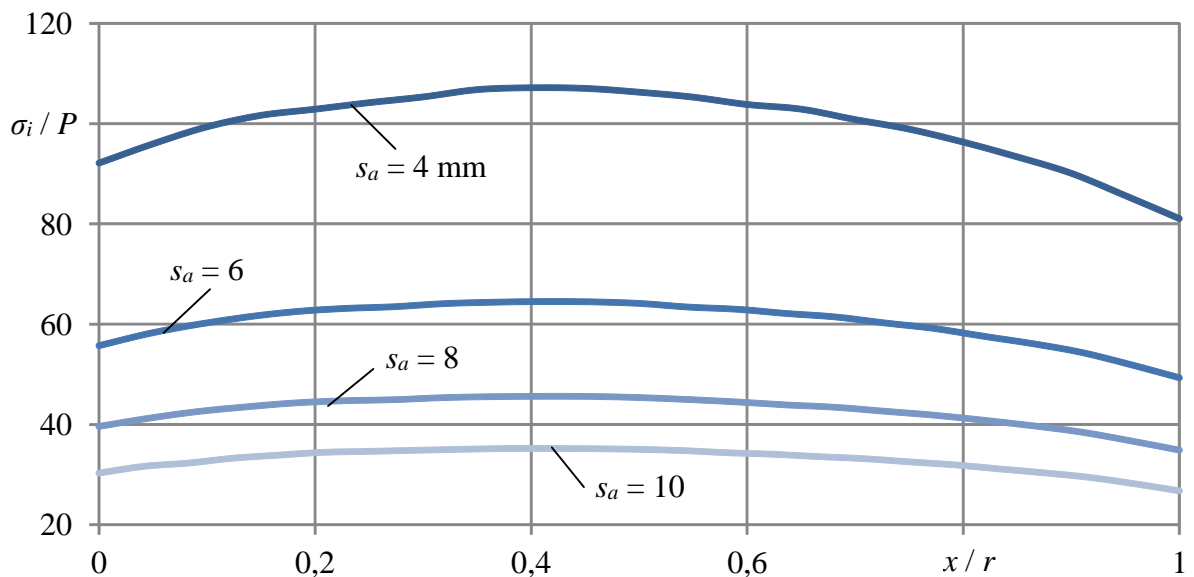
3.24 pav. Įtempimų intensyvumo pasiskirstymas išilgai vidinio aklės paviršiaus, esant skirtingoms sienelės storio s_a vertėms, kai: $L = d$; $d = 200$ mm; $r_{a1} = 70, 120, 170, 220$ mm; $r_{a2} = 20$ mm; $\gamma = 1,0$

Kaip išilgai (spindulio kryptimi) aklės vidinio paviršiaus pasiskirsto įtempimų intensyvumas σ_i , kai skaičiuojamojo vamzdžio išorinis skersmuo $d = 300$ mm pateikta 3.25 pav. Nustatyta, kad nepriklausomai nuo s_a reikšmės labiausiai apkrauta (pavojinga) vieta yra vidiniame aklės paviršiuje, spindulyje r_{a2} . Šioje vietoje kylantis įtempimų intensyvumas σ_i yra nuo 1,41 iki 1,44 karto didesnis nei kitose aklės vidinio paviršiaus vietose.



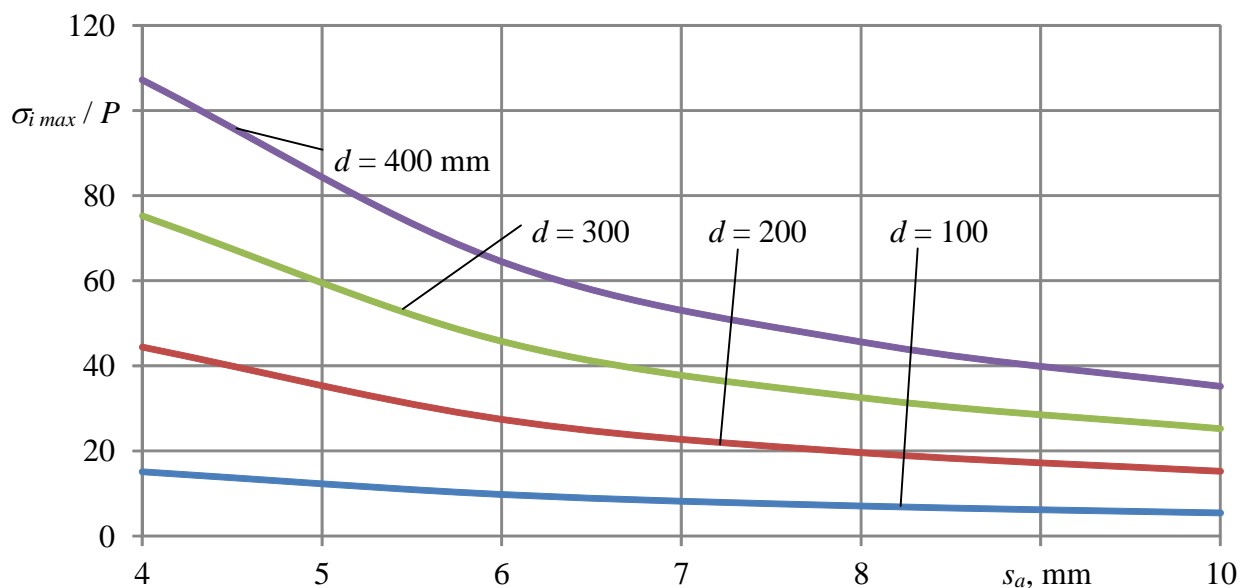
3.25 pav. Įtempimų intensyvumo pasiskirstymas išilgai vidinio aklės paviršiaus, esant skirtingoms sienelės storio s_a vertėms, kai: $L = d$; $d = 300$ mm; $r_{a1} = 70, 120, 170, 220$ mm; $r_{a2} = 20$ mm; $\gamma = 1,0$

Kaip išilgai (spindulio kryptimi) aklės vidinio paviršiaus pasiskirsto įtempimų intensyvumas σ_i , kai skaičiuojamojo vamzdžio išorinis skersmuo $d = 400$ mm pateikta 3.26 pav. Nustatyta, kad nepriklausomai nuo s_a reikšmės labiausiai apkrauta (pavojinga) vieta yra vidiniame aklės paviršiuje, spindulyje r_{a2} . Šioje vietoje kylantis įtempimų intensyvumas σ_i yra nuo 1,31 iki 1,32 karto didesnis nei kitose aklės vidinio paviršiaus vietose.



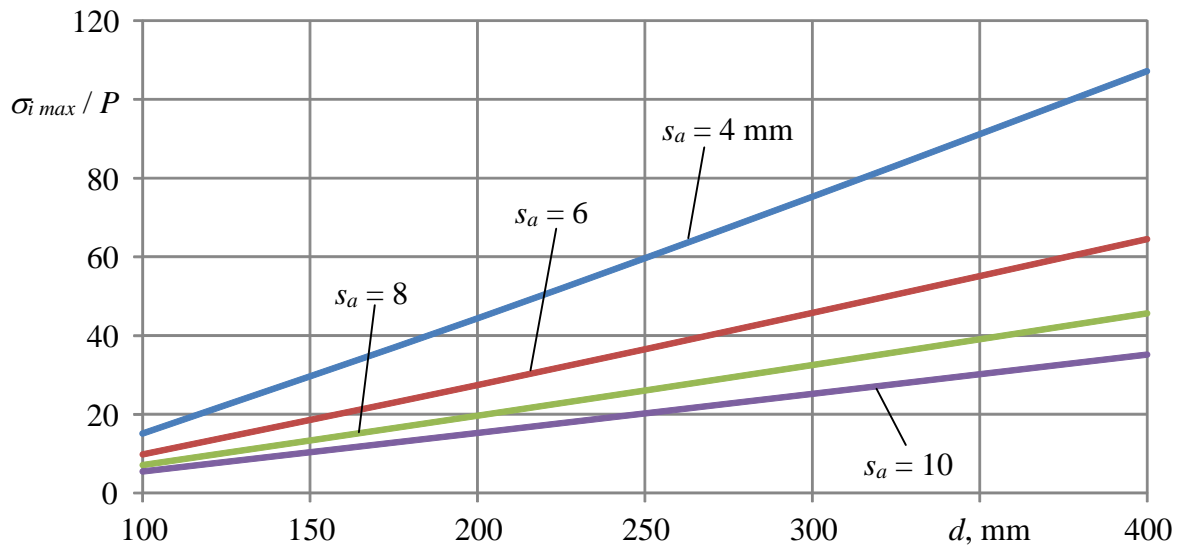
3.26 pav. Įtempimų intensyvumo pasiskirstymas išilgai vidinio aklės paviršiaus, esant skirtingoms sienelės storio s_a vertėms, kai: $L = d$; $d = 400$ mm; $r_{a1} = 70, 120, 170, 220$ mm; $r_{a2} = 20$ mm; $\gamma = 1,0$

Kaip įtempimų intensyvumas $\sigma_{i\ max}$ labiausiai apkrautoje aklės vietoje (ties sujungimu su vamzdžiu) priklauso nuo sienelės storio s_a , esant skirtingiems vamzdžio skersmenims, pateikta 3.27 pav. Neatsižvelgiant į išorinio vamzdžio skersmenį d didėjant sienelės storiui įtempimai $\sigma_{i\ max}$ mažėja. Kuo didesnis d , tuo didesnę įtaką įtempimų intensyvumui turi sienelės storis s_a . Sienelės storiui padidėjus 2,5 karto, įtempimai $\sigma_{i\ max}$ sumažėja apie 3 kartus. Gauta, kad įtempimų intensyvumo pavojingoje vietoje priklausomybė nuo sienelės storio yra artima tiesinei (tiesinės regresijos lygties vidutinis koreliacijos koeficientas yra 0,96 – tai stiprus tiesinis ryšys).



3.27 pav. Aklės pavojingoje vietoje įtempimų intensyvumo $\sigma_{i\ max}$ priklausomybė nuo sienelės storio s_a , esant skirtingoms vamzdžio išorinio skersmens d vertėms, kai: $L = d$; $\gamma = 1,0$; $r_{a1} = 70, 120, 170, 220$ mm; $r_{a2} = 20$ mm

3.28 pav. pateikta kaip labiausiai apkrautoje aklės vietoje įtempimų intensyvumo $\sigma_{i\ max}$ priklausomybė kinta nuo vamzdžio išorinio skersmens d . Iš 3.28 pav. matyti, kad įtempimų intensyvumo padidėjimas proporcingas vamzdžio išorinio skersmens padidėjimui (tarp d ir $\sigma_{i\ max}$ gautas beveik tiesinis ryšys). Nustatyta, kad vamzdžio išoriniam skersmeniui padidėjus 4 kartus, įtempimai $\sigma_{i\ max}$ padidėja nuo 6,43 iki 7,08 karto. Gauta, kad įtempimų intensyvumo pavojingoje vietoje priklausomybė nuo vamzdžio išorinio skersmens yra tiesinė (tiesinės regresijos lygties vidutinis koreliacijos koeficientas yra 1,0).

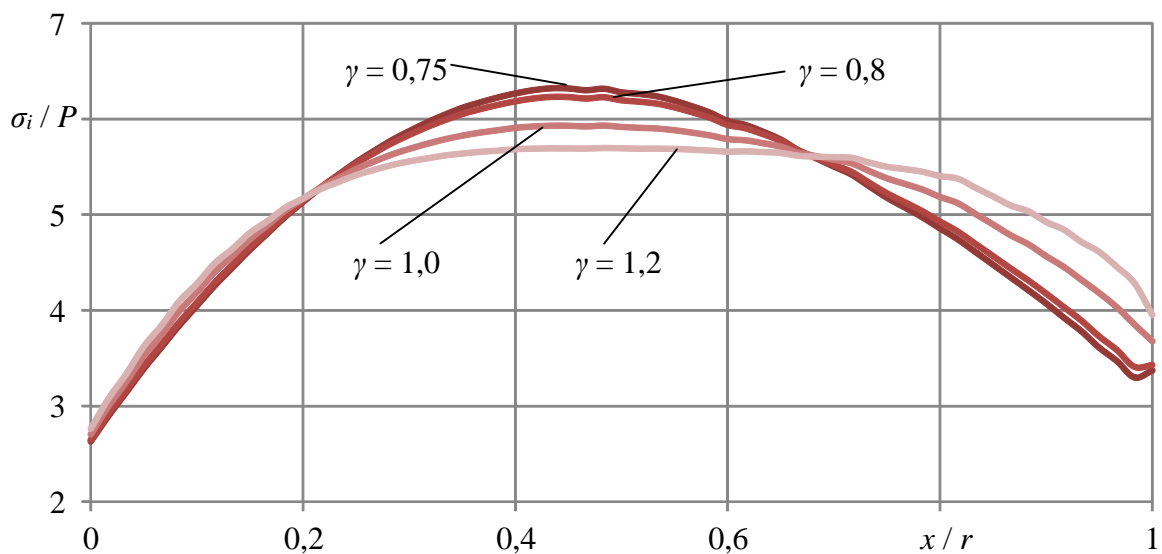


3.28 pav. Aklės pavojuojamoje vietoje įtempimų intensyvumo $\sigma_{i\max}$ priklausomybė nuo vamzdžio išorinio skersmens d , esant skirtingoms sienelės storio s_a vertėms, kai: $L = d$; $\gamma = 1,0$; $r_{a1} = 70, 120, 170, 220$ mm; $r_{a2} = 20$ mm

3.2.3. Mechaninio nevienalytiškumo įtaka

Šiame poskyryje nustatysime, kaip įtempimų intensyvumas σ_i priklauso nuo mechaninio nevienalytiškumo γ . Buvo priimta, kad γ kitimo ribos bus nuo 0,75 iki 1,2.

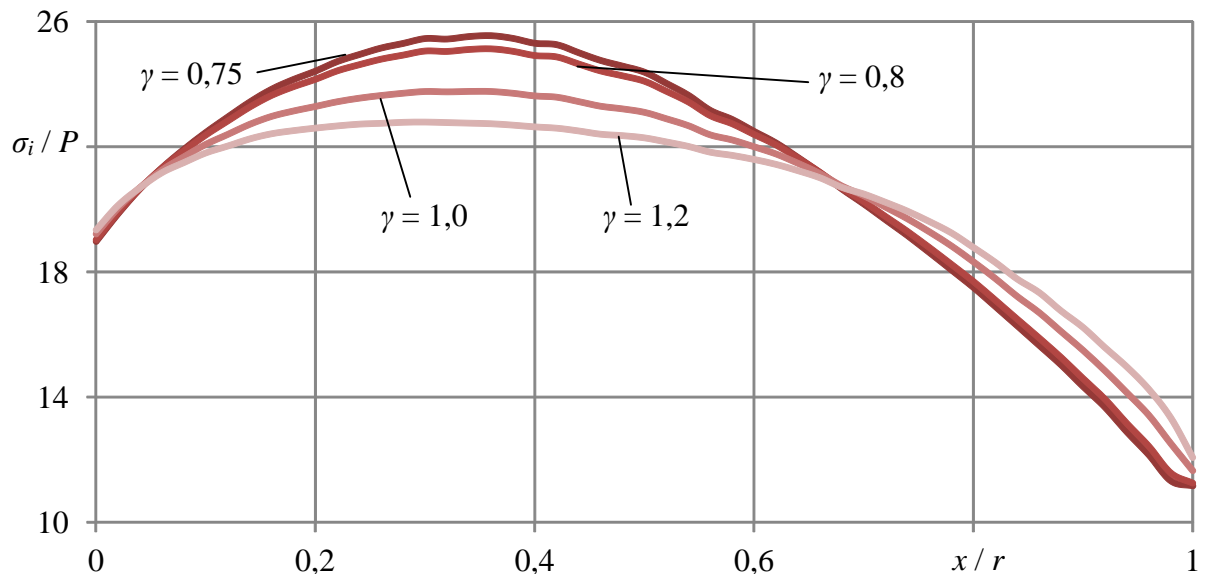
Kaip įtempimų intensyvumas σ_i išilgai aklės vidinio paviršiaus priklauso nuo mechaninio nevienalytiškumo γ , kai $d = 100$ mm pateikta 3.29 pav. Nustatyta, kad nepriklausomai nuo γ



3.29 pav. Įtempimų intensyvumo pasiskirstymas išilgai vidinio aklės paviršiaus, esant skirtingoms mechaninio nevienalytiškumo γ vertėms, kai: $L = d$; $d = 100$ mm; $s_a = 10$ mm; $r_{a1} = 220$ mm; $r_{a2} = 20$ mm

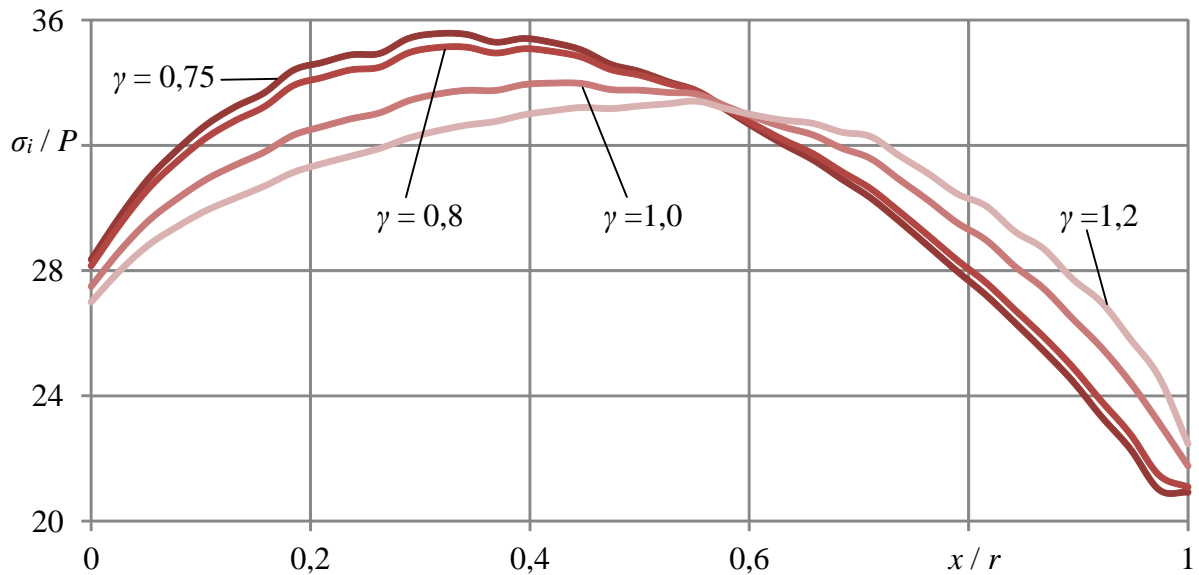
reikšmės labiausiai apkrauta vieta yra išoriniame aklės paviršiuje, kai $x / r \approx 0,43$. Šioje vietoje kylantis įtempimų intensyvumas yra nuo 2,06 iki 2,40 karto didesnis nei kitose aklės vidinio paviršiaus vietose.

Kaip įtempimų intensyvumas σ_i išilgai aklės vidinio paviršiaus priklauso nuo mechaninio nevienalytiškumo γ , kai skaičiuojamojo vamzdžio išorinis skersmuo $d = 200$ mm pateikta 3.30 pav. Nustatyta, kad nepriklausomai nuo γ reikšmės labiausiai apkrauta (pavojinga) vieta yra vidiniame aklės paviršiuje, kai $x / r \approx 0,37$. Šioje vietoje įtempimų intensyvumas yra nuo 1,89 iki 2,29 karto didesnis nei kitose aklės vidinio paviršiaus vietose.



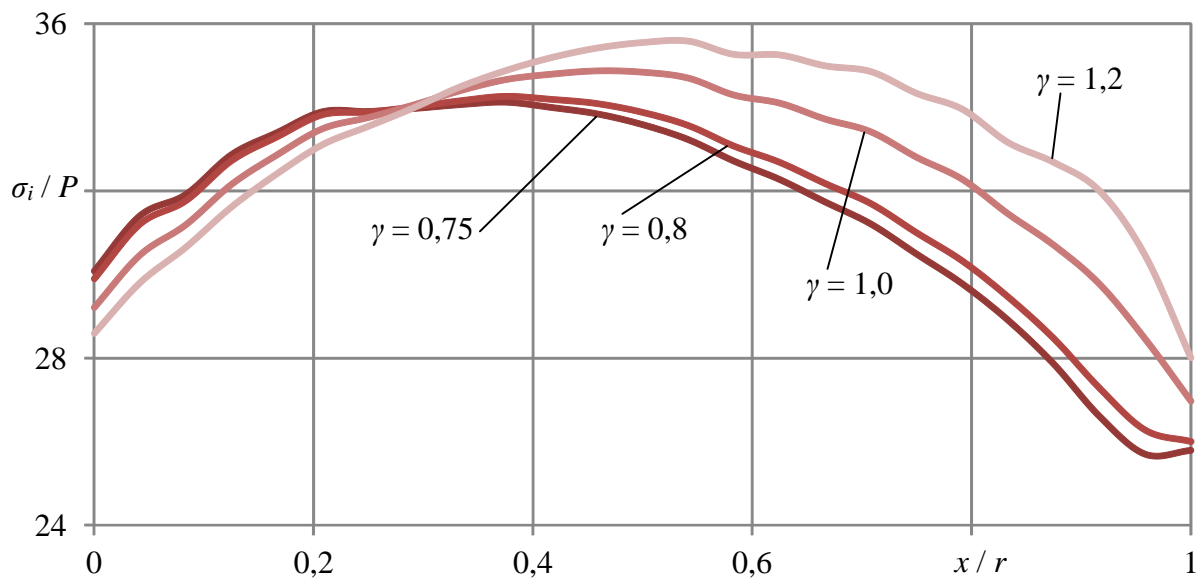
3.30 pav. Įtempimų intensyvumo pasiskirstymas išilgai vidinio aklės paviršiaus, esant skirtingoms mechaninio nevienalytiškumo γ vertėms, kai: $L = d$; $d = 200$ mm; $s_a = 10$ mm; $r_{a1} = 220$ mm; $r_{a2} = 20$ mm

Kaip įtempimų intensyvumas σ_i išilgai aklės vidinio paviršiaus priklauso nuo mechaninio nevienalytiškumo γ , kai skaičiuojamojo vamzdžio išorinis skersmuo $d = 300$ mm pateikta 3.31 pav. Nustatyta, kad nepriklausomai nuo γ reikšmės labiausiai apkrauta (pavojinga) vieta yra vidiniame aklės paviršiuje, kai: $\gamma < 1$, $\sigma_{i \max}$ gaunami ties $x / r \approx 0,37$, o kai $\gamma \geq 1$ – ties $x / r \approx 0,58$. Pavojingoje vietoje įtempimų intensyvumas yra nuo 1,49 iki 1,70 karto didesnis nei kitose aklės vidinio paviršiaus vietose.



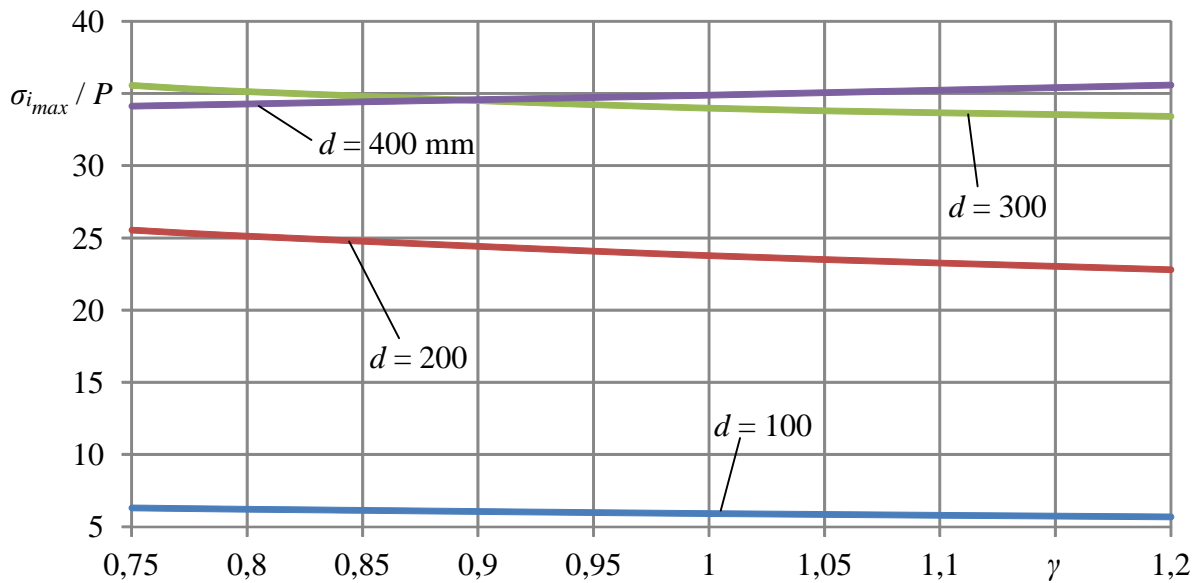
3.31 pav. Įtempimų intensyvumo pasiskirstymas išilgai vidinio aklės paviršiaus, esant skirtingoms mechaninio nevienalytiškumo γ vertėms, kai: $L = d$; $d = 300$ mm; $s_a = 10$ mm; $r_{a1} = 220$ mm; $r_{a2} = 20$ mm

Kaip įtempimų intensyvumas σ_i išilgai aklės vidinio paviršiaus priklauso nuo mechaninio nevienalytiškumo γ , kai skaičiuojamojo vamzdžio išorinis skersmuo $d = 400$ mm pateikta 3.32 pav. Nustatyta, kad nepriklausomai nuo γ reikšmės labiausiai apkrauta vieta yra išoriniame aklės paviršiuje, kai: $\gamma < 1$, $\sigma_{i\max}$ gaunami ties $x / r \approx 0,31$, o kai $\gamma \geq 1$ – ties $x / r \approx 0,52$. Šioje vietoje kylantis įtempimų intensyvumas yra nuo 1,27 iki 1,33 karto didesnis nei kitose aklės vidinio paviršiaus vietose.

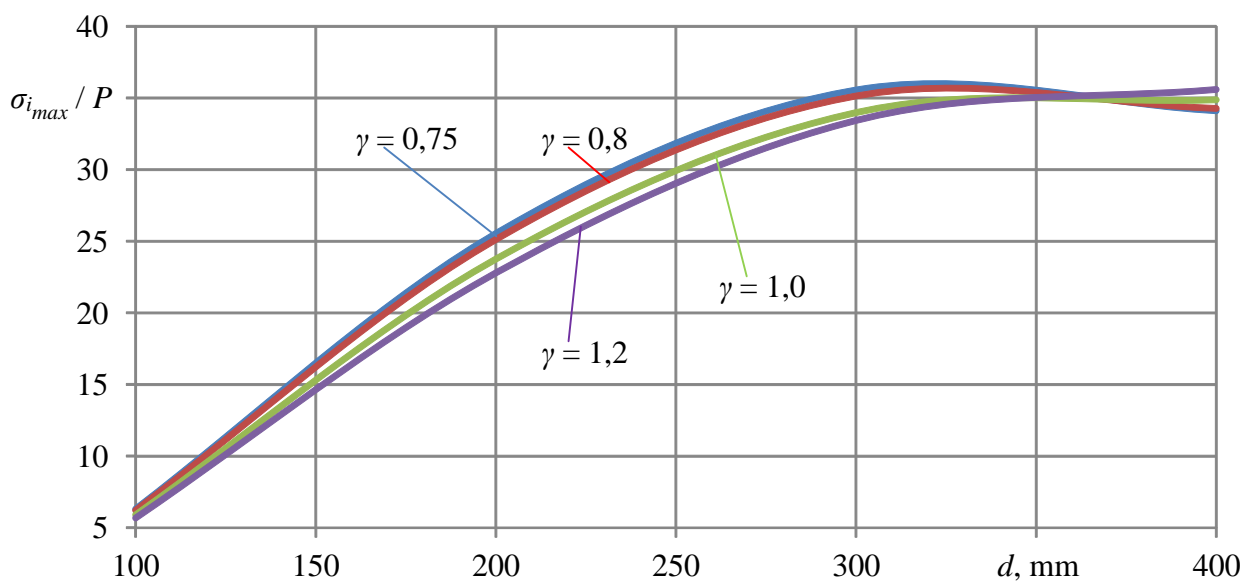


3.32 pav. Įtempimų intensyvumo pasiskirstymas išilgai vidinio aklės paviršiaus, esant skirtingoms mechaninio nevienalytiškumo γ vertėms, kai: $L = d$; $d = 400$ mm; $s_a = 10$ mm; $r_{a1} = 220$ mm; $r_{a2} = 20$ mm

3.33 pav. pateikta kaip labiausiai apkrautoje aklės vietoje įtempimų intensyvumo $\sigma_{i\max}$ priklausomybė kinta nuo mechaninio nevienalytiškumo γ , esant skirtingiems vamzdžio išoriniams skersmenims d . Iš 3.33 pav. matome, kad kintant γ , įtempimai $\sigma_{i\max}$ kinta nežymiai. Nustatyta, kad mechaniniam nevienalytiškumui γ pasikeitus nuo 0,75 iki 1,2 įtempimai $\sigma_{i\max}$ kinta nuo 0,96 iki 1,11 karto. Gauta, kad įtempimų intensyvumo pavojingose vietose priklausomybė nuo mechaninio nevienalytiškumo yra artima tiesinei (tiesinės regresijos lygties vidutinis koreliacijos koeficientas yra 0,99 – tai stiprus tiesinis ryšys).



3.33 pav. Aklės pavojingose vietose įtempimų intensyvumo σ_i priklausomybė nuo mechaninio nevienalytiškumo γ , esant skirtingoms vamzdžio išorinio skersmens d vertėms, kai: $L = d$; $r_{a1} = 220$ mm; $r_{a2} = 20$ mm



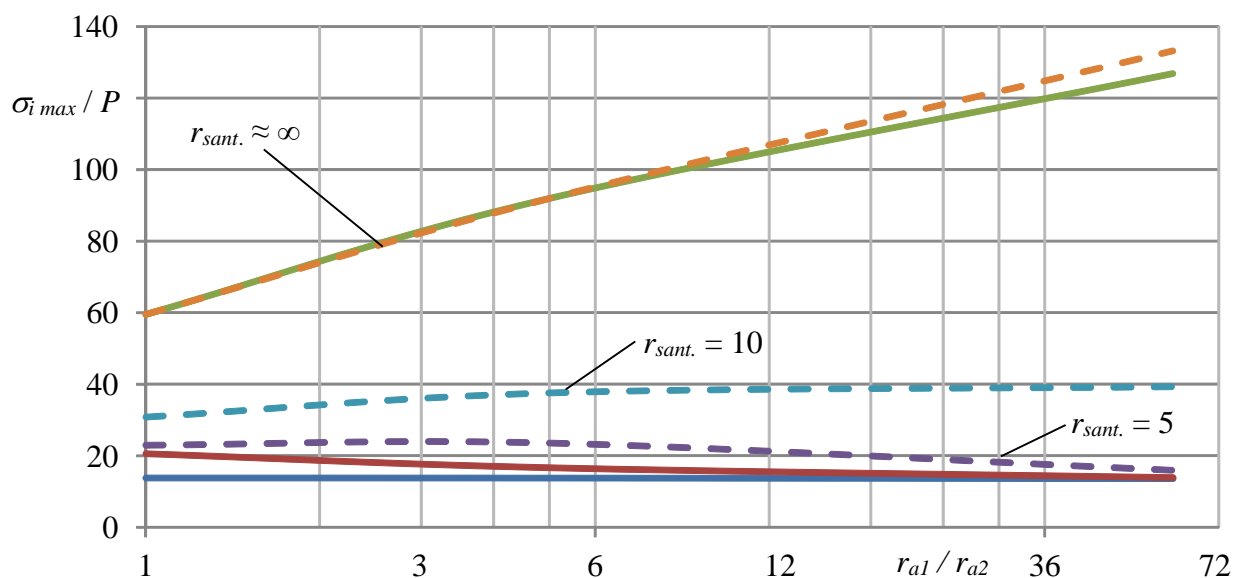
3.34 pav. Aklės pavojingose vietose įtempimų intensyvumo $\sigma_{i\max}$ priklausomybė nuo vamzdžio išorinio skersmens d , kai: $L = d$; $r_{a1} = 220$ mm; $r_{a2} = 20$ mm

3.34 pav. pateikta kaip labiausiai apkrautoje aklės vietoje įtempimų intensyvumo $\sigma_{i\ max}$ priklausomybė kinta nuo vamzdžio išorinio skersmens d , esant skirtingiems γ . Nustatyta, kad d padidėjus 4 kartus, įtempimai $\sigma_{i\ max}$ kinta nuo 0,92 iki 1,17 karto.

3.2.4. Aklės spindulių įtaka

Šiame poskyryje nustatysime, kaip įtempimų intensyvumas σ_i priklauso nuo aklės spindulių r_{a1} ir r_{a2} (žr. 2.1 pav.). Buvo priimta, kad r_{a1} kitimo ribos bus nuo 200 iki 10 000 mm (plokščia aklė); r_{a2} , kai $r_{a2} = r_{a1}/r_{sant.}$, priimta, kad $r_{sant.} = 2, 5, 10, 10\ 000$.

Kaip įtempimų intensyvumas $\sigma_{i\ max}$ labiausiai apkrautose aklės ir vamzdžio vietose priklauso nuo aklės spindulių r_{a1} / r_{a2} santykio pateikta 3.35 pav. Punktyrine linija pavaizduoti maksimalūs įtempimai σ_i kilantys aklėje, o tiesia linija maksimalūs įtempimai $\sigma_{i\ max}$ vamzdyje. Kai elipsinės aklės forma artima plokščiai aklei, įtempimai $\sigma_{i\ max}$ didėja, didėjant r_{a1} / r_{a2} . Kai santykis r_{a1} / r_{a2} tampa < 5 , tada maksimalūs įtempimai $\sigma_{i\ max}$ pradeda mažėti. Santykį r_{a1} / r_{a2} padidinus nuo 1 iki ∞ (plokščia aklė) kartų, įtempimai $\sigma_{i\ max}$ kinta nuo 2,59 iki 8,33 karto (plokščioje aklėje gauti didžiausi įtempimai). Įtempimų intensyvumo pavojingoje vietoje priklausomybė nuo aklės spindulių santykio yra artima tiesinei (tiesinės regresijos lygties vidutinis koreliacijos koeficientas yra 0,87 – tai stiprus tiesinis ryšys) (žr. 3.35 pav.).



3.35 pav. Aklės ir vamzdžio pavojingose vietose įtempimų intensyvumo $\sigma_{i\ max}$ priklausomybė nuo aklės spindulių r_{a1} / r_{a2} santykio, kai: $L = d$; $d = 300$ mm; $r_{a1} = 200, 300, 500, 10\ 000$ mm; $r_{a2} = 100, 60, 5, 1$ mm; $s_a = 10$ mm; $\gamma = 1,0$

IŠVADOS

1. Didėjant dujotiekio vamzdžio ir aklės (tiek sferinės, tiek elipsinės) sienelės storiui, įtempimų intensyvumas pavojingoje vietoje mažėja. Įtempimų intensyvumo pavojingoje vietoje priklausomybė nuo sienelės storio yra artima tiesinei (tiesinės regresijos lygties vidutinis koreliacijos koeficientas yra 0,96 – tai stiprus tiesinis ryšys). Sienelės storį padidinus 2,5 karto, įtempimų intensyvumas sumažėja nuo 2,76 iki 3,04 karto. Didesnis aklės įtempimų intensyvumo mažėjimas gaunamas prie didesnių vamzdžio skersmenų.
2. Didėjant dujotiekio vamzdžio išoriniam skersmeniui (tiek sferinės, tiek elipsinės), aklės įtempimų intensyvumas pavojingoje vietoje didėja. Įtempimų intensyvumo pavojingoje vietoje priklausomybė nuo vamzdžio išorinio skersmens yra tiesinė (tiesinės regresijos lygties vidutinis koreliacijos koeficientas yra 1,0). Sferinės aklės vamzdžio išorinį skersmenį padidinus 4 kartus, įtempimų intensyvumas sumažėja nuo 3,90 iki 3,71 karto. Elipsinės aklės vamzdžio išorinį skersmenį padidinus 4 kartus, įtempimų intensyvumas sumažėja nuo 7,08 iki 6,43 karto.
3. Tiek sferinės, tiek elipsinės aklės su vamzdžiu sujungimo stiprumui mechaninis nevienalytiškumas praktiškai įtakos neturi. Mechaninį nevienalytiškumą pakeitus nuo 0,75 iki 1,2 (arba padidinus 1,6 karto) didžiausias įtempimų intensyvumas aklėje sumažėja tik apie 1,15 karto. Įtempimų intensyvumo pavojingoje vietoje priklausomybė nuo mechaninio nevienalytiškumo yra artima tiesinei (tiesinės regresijos lygties vidutinis koreliacijos koeficientas yra 0,99 – tai stiprus tiesinis ryšys).
4. Didėjant sferinės aklės kreivumo spinduliui (sferinei aklei artėjant prie plokščios aklės) įtempimų intensyvumas pavojingoje vietoje didėja. Didėjant vamzdžio skersmeniui aklės kreivumo spindulys turi didesnę įtaką aklės stiprumui. Aklės santikinį spindulį (tai aklės kreivumo spindulio ir vamzdžio skersmens santykis) padidinus nuo 1 iki ∞ (plokščia aklė) įtempimų intensyvumas padidėja nuo 1,09 iki 28,76 karto. Didesnis įtempimų intensyvumo didėjimas gaunamas didinant vamzdžio skersmenį.
5. Didėjant elipsinės aklės kreivumo spindulių santykiui ir aklei artėjant prie plokščios aklės, įtempimų intensyvumas pavojingoje vietoje didėja. Aklės spindulių santykį padidinus nuo 1 iki ∞ (plokščia aklė) įtempimų intensyvumas padidėja nuo 2,59 iki 8,33 karto.
6. Nustatyta, kad esant tokiems pat parametrams elipsinėje aklėje veikiantis didžiausias įtempimų intensyvumas 1,95 karto mažesnis už įtempimų intensyvumą sferinėje aklėje, t. y. elipsinė aklė yra stipresnė. Kuo mažesnis vamzdžio išorinis skersmuo tuo elipsinė aklė racionalesnė lyginant su sferine akle.

LITERATŪRA

1. Nevsky zavod „Trubodetal“. Prieiga per internetą: < http://trubadetal.ru/products/zaglushkii_obshchie_svedeniya/ > [žiūrėta 2015-09-15].
2. **Fleck R., Kastanauskas J.** Degių dujų sistema. Klaipėda, 2006, p. 7.
3. **Neverovič. J.** Magistralinių dujotiekių įrengimo taisyklės. Vilnius, 2014, p. 15, 29, 30.
4. **Sekmokas. A.** Gamtinių dujų, suskystintų naftos dujų ir biudujų aplinkoje atliekamų darbų saugos taisyklės. Vilnius, 2012, p. 15, 16.
5. Engineering Interresurs Company. Prieiga per internetą: < http://interresurs.com.ua/index/zaglushki_stalnye/0-88 > [žiūrėta 2015-10-19].
6. Nevsky zavod „Trubodetal“. Prieiga per internetą: < http://truba-detal.ru/products/zaglushki_ellipticheskie/ > [žiūrėta 2015-09-17].
7. OpenGost. Prieiga per internetą: < http://www.opengost.ru/download/7862/TU_26-18-38-90_Detali_truboprovodov_besshovnye_privarnye_iz_stali_marok_15H5M_12H1MF_12H18N10_T_08H22N6T.html > [žiūrėta 2015-10-24].
8. **Navickas.V., Kundrotas. A.** Dujų sistema. Magistraliniai dujotiekiai. Projektavimas, medžiagos ir statyba. Vilnius, 2001, p. 57.
9. Society for Experimental Mechanics. Prieiga per internetą: < <http://sem-proceedings.com/04s/sem.org-SEM-X-Int-Cong-s003p03-Stress-Strain-Analysis-Pipelines-with-Localized-Metal-Loss.pdf> > [žiūrėta 2015-09-18].
10. Oktatas, Elettartammenedzseles. Prieiga per internetą: < <http://edu.student-cloud.org/elettartam/azevedo.pdf> > [žiūrėta 2015-09-21].
11. Plant Maintenance Resource Center. Prieiga per internetą: < <http://www.plant-maintenance.com/articles/ReExaminationofFailureAnalysisPart12.pdf> > [žiūrėta 2015-09-23].
12. Product Documentation for Red Hat Enterprise Linux. Prieiga per internetą: < <http://home.eng.iastate.edu/~jdm/katrina/Data/Natural%20Gas/NG%20Transportation/Analysis%20of%20Gas%20Pipeline%20Failure.pdf> > [žiūrėta 2015-09-24].
13. Vikipedija, Koreliacija. Prieiga per internetą: < <https://lt.wikipedia.org/wiki/Koreliacija> > [žiūrėta 2016-01-12].