VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Konstantin RASIULIS

PLIENINIŲ ANTŽEMINIŲ CILINDRINIŲ VERTIKALIŲJŲ TALPYKLŲ SIENELĖS GEOMETRINIŲ NUOKRYPIŲ ANALIZĖ IR VERTINIMAS

Daktaro disertacija
Technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T

Vilnius, 2007

Disertacijos rengta 2003–2007 m. Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Darbo mokslinis vadovas

doc. dr. Antanas ŠAPALAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, technologijos mokslai, statybos inžinerija – 02T).

TURINYS

Svarbiausi sutartiniai žymenys 6
ĮVADAS 9
1. PLIENINIŲ CILINDRINIŲ VERTIKALIŲJŲ TALPYKLŲ PROJEKTAVIMO, NAUDOJIMO IR TYRIMŲ ANALIZĖ 15
1.1. Talpyklų avarijos ir jų priežastys 15
1.2. Nuokrypių klasifikacija, jų pavidalai 22
1.3. Cilindrinių plonasienių talpyklų skaičiavimo principai 25
1.3.1. Cilindrinių kevalų skaičiavimo principai ir prielaidos 25
1.3.2. Lakštinių konstrukcijų vietinės leistinos nuokrypos nuo idealaus konstrukcijos pavidalo 27
1.3.3. Plonasienių konstrukcijų skaičiavimo metodikos įvertinančios geometrinio nuokrypio poveikį mechaniniam būviui 28
1.4. Pirmojo skyriaus išvados 38
2. CILINDRINĖS TALPYKLOS SU „MINKŠTU“ NUOKRYPIU SKAIČIAVIMAI BAIGTINIŲ ELEMENTŲ METODU 39
2.1. Bendra talpyklos su „minkštu“ nuokrypiu skaitinio modelio charakteristika 39
2.2. Skaitinis modelis 40
2.3. Baigtinių elementų tinklas 41
2.4. Skaičiavimo baigtinių elementų metodu rezultatai 43
2.4.1. Sprendimų apibūdinimas 43
2.4.2. Nuokrypio ekstreminio taško padėties nustatymas 45
2.4.3. Tampriai deformuojamo konstrukcijos mechaninio būvio analizė 49
2.4.4. Tiesinių skaičiavimų rezultatų palyginimas 55
2.5. Tampriai deformuojamos talpyklos sienelės su nuokrypiu įtempių samplaikos koeficientų skaičiavimo rezultatų regresinė analizė 57
2.6. Antrojo skyriaus išvados 65
3. NETIESINIS TALPYKLOS SIENELĖS SU GEOMETRINIU NUOKRYPIU UŽDAVINYS 62
3.1. Tampriai plastiškai deformuojamos konstrukcijos būvio analizė 62

3.2. Talpyklos skaitinis modelis, įvertinantis konstrukcijos sienelės geometrinį netiesiškumą 63
3.3. Talpyklos sienelės netiesinė analizė įvertinant medžiagos tampriai plastines deformacijas ir konstrukcijos deformacijų geometrinį netiesiškumą 65
3.4. Nuokrypių apribojimų, numatytų Eurokode 3, pagrįstumo tyrimai netiesinio modelio skaitinio eksperimento rezultatų pagrindu 71
3.5. Trečiojo skyriaus išvados 75
4. PLONOS PLIENINĖS PLOKŠTELĖS „MINKŠTOJO“ PAVIRŠINIO NUOKRYPIO ĮTEMPIŲ IR DEFORMACIJŲ BŪVIO ANALIZĖ EKSPERIMENTINIU IR SKAITINIU METODAIS 77
4.1. Bendros žinios apie tyrimo metodą 77
4.2. Laboratorinis eksperimentas 81
4.3. Skaitinis eksperimentas baigtinių elementų metodu 87
4.4. Laboratorinio ir skaitinio metodo rezultatų palyginimas 92
4.5. Ketvirtojo skyriaus išvados 98
5. TALPYKLOS SIENELĖS SU GEOMETRINIU NUOKRYPIU BAIGTINIŲ ELEMENTŲ METODO SKAIČIAVIMAI ĮVERTINANT SKIRTINGŲ STATYBINIŲ PLIENŲ ĮTEMPIŲ IR DEFORMACIJŲ DVITIESINES DIAGRAMAS. APSKAIČIUOTŲ ĮTEMPIŲ SAMPLAIKOS KOEFICIENTŲ REGRESINĖ ANALIZĖ 99
6. PAGRINDINIAI TYRIMŲ REZULTATAI IR BAIGIAMOSIOS IŠVADOS 103
LITERATŪROS SĄRAŠAS 105

A priedas. Plieninių antžeminių cilindrinių stačiųjų talpyklų sienelės vietinių geometrinių nuokrypių įtempių samplaikos koeficiento skaičiuosena 117
B priedas. Talpyklos sienelės fragmento su nuokrypiu BEM programos COSMOS2M tekstinios bylos pavyzdys (tamprusis skaičiavimas) 120
C priedas. Talpyklos sienelės fragmento su nuokrypiu BEM programos COSMOS2M tekstinios bylos pavyzdys (geometriškai ir fiziškai netiesinis skaičiavimas) 125

D priedas. Plonos plieninės plokštelės paviršiaus „Minkštojo“ nuokrypio įtempių ir deformacijų eksperimentinių tyrimų rezultatai 129

SVARBIAUSI SUTARTINIAI ŽYMENYS

Lotyniški rašmenys

A	polinominė funkcija
a	leistina nuokrypa, įdubos vidurinės srities taškas
B	empirinis koeficientas
b	empirinis koeficientas, įdubos apybraižos viršutinis taškas, plokštelės plotis
c	įdubos apybraižos šoninis taškas
D	talpyklos skersmuo
E	tamprumo modulis
f	įdubos gylis
f_u	charakteristinis tempiamasis, gniuždomasis, lenkiamasis plieno stipris pagal stiprumo ribą
f_y	charakteristinis tempiamasis, gniuždomasis, lenkiamasis plieno stipris pagal takumo ribą
$f_{u,d}$	skaičiuotinis tempiamasis, gniuždomasis, lenkiamasis plieno stipris pagal stiprumo ribą
$f_{y,d}$	skaičiuotinis tempiamasis, gniuždomasis, lenkiamasis plieno stipris pagal takumo ribą
g_B	eksperimentinė talpyklos sienelės pirmos pastovumo praradimo formos apkrova
g_{max}	eksperimentinė didžiausia bandomoji apkrova
g_U	eksperimentinė apkrova, esant sienelės visiškam pastovumo praradimui
g_{UEC}	teorinė skaičiuojamoji apkrova pagal Eurokodą
g_{U0DIN}	teorinė skaičiuojamoji apkrova pagal DIN standartą
H	talpyklos aukštis
h	talpyklos naudingas aukštis
K	kevalo standumo matrica
k	įtempių samplaikos koeficientas

k_ε	deformacijų samplaikos koeficientas
l	plokštelės ilgis
m	talpyklos sienutės tikrasis nuokrypis, plieno sustiprėjimas, empirinis koeficientas
N_{11}, N_{22}	ašinės kevalo jėgos
n	konstanta, bandymo numeris
P_1, P_2,	polinominės funkcijos
Q	kevalo nesubalansuotųjų jėgų vektorius
q	empirinis koeficientas
R	talpyklos spindulys
r	įdubos spindulys
S	dvimatis talpyklos sienelės įrąžų vektorius, tenzojutiklio jautrumo koeficientas
s	empirinis koeficientas
t	talpyklos sienelės storis, plokštelės storis
U	poslinkis, nuolatinė elektros srovės įtampa
u^*	radialinis poslinkis (santykinis)
x	atstumas nuo talpyklos apačios iki dominančio sienelės slėgio taško, cilindrinių koordinačių sistemos ašys, elektros įtampos reikšmė
z	santykinis atstumas, cilindrinių koordinačių sistemos ašys

Graikiški rašmenys

α_σ	teorinis samplaikos koeficientas
β	įdubos santykinis spindulys
β^m	polinominė funkcija
γ	įdubos santykinis gylis
γ_c	elemento darbo sąlygų koeficientas
γ_q	nuolatinio poveikio dalinis koeficientas
γ_{Mu}	medžiagos stiprio dalinis koeficientas

γ_{My}	medžiagos stiprio dalinis koeficientas pagal takumo ribą
ΔF	apkrovos prieauglis
ΔU	poslinkių vektoriaus prieauglis
ε	deformacija (santykinė)
ε_u	deformacija (santykinė esant stiprumo ribai)
ε_y	deformacija (santykinė esant takumo ribai)
η	apkrovos koeficientas
λ_1	empirinis koeficientas
ζ	santykinis žiedinis įtempis
ρ	medžiagos tankis
σ	įtempių intensyvumas
σ^*	santykinis įtempis
$\sigma_{0,2}$	sąlyginė plieno takumo riba
σ_u	plieno stiprumo riba
σ_n	santykinis įtempis
σ_{red}	efektyvusis įtempis
σ_y	žiedinis įtempis
σ_z	meridianinis įtempis, normalinis įtempis
χ	poslinkių samplaikos koeficientas
ψ	santykinis poslinkis
ψ_K	santykinis susiaurėjimas

Indeksai

d	skaičiuotinė reikšmė
i	apkrovos pakopos numeris
j	iteracijos numeris
max	maksimali reikšmė
nom	nominali reikšmė
q	apkrova

Įvadas

Tiriamoji problema

Staigi didelių pramoninių kompleksų plėtra 1960–1970 metais pasaulyje tapo įmanoma dėl tikslių ir efektyvių analitinių skaičiavimo metodų. Plėtra atitiko naftos produktų, dujų kiekio ir t.t. augimo spartą. Dėl šios priežasties problemos, susijusios su inžinerinių statinių likutiniais ištekliais, jų nuokrypiai (*defektai*), atsižvelgiant į eksploatacijos savybes, nebuvo laikomi pirmo svarbumo klausimais.

Didelės talpos plonasienių talpyklų remontas ir jų nuolatinė priežiūra yra labai brangūs. Cilindrinės (*ritininės*) plieno talpyklos yra atskiras plonasienių talpyklų atvejis. Įprastas talpyklų skaičiavimas, taikant analitinius metodus, nėra sudėtingas. Tų vietų, kur yra sutrikdoma tobula forma, pavyzdžiui, ties įpjovimo vietomis, angomis, defektais ir pan., sustiprinimas yra atsakinga ir sudėtinga tokių konstrukcijų projektavimo dalis. Defektų prevencijos eksploatacijos ir remonto laikotarpiu kylantys uždaviniai, taip pat būtinybė greitai užtikrinti pažeistų konstrukcijos vietų saugumą yra svarbesni ir labiau komplikuoti, nei įprasti skaičiavimai.

Klasikinėje defektų vertinimo teorijoje analizuojamos „aštrių“ (įpjovių, įtrūkių ir pan.) ir „minkštų“ (įdubių, išsipūtimų, pakibimų ir pan.) defektų problemos. „Aštrūs“ defektai yra pavojingesni dėl didesnės talpyklų irties rizikos. Todėl „minkšti“ nuokrypiai nėra tirti taip plačiai, kaip „aštrieji“, o jų apribojimai susiję tik su geometriniais rodikliais. Be to, nebuvo atsižvelgiama į tokių nuokrypių vietos, jų formų, talpyklos sienelės storio ir t.t. įtaką. Aukščiau išvardintos priežastys rodo, kad „minkšti“ nuokrypiai nėra pakankamai ištirti ir yra galimybė pagerinti jų įtakos konstrukcijos būviui vertinimo metodus.

JAV, Rusijoje ir Vokietijoje (API, SNIP, DIN) yra parengti naudojamų talpyklų nacionaliniai projektavimo standartai. Pastaruoju metu visoje Europoje įsigaliojo bendrieji tokių statinių projektavimo ir eksploatacijos standartai. Anksčiau minėtų šalių standartai riboja „minkštų“ nuokrypių matmenis tik montavimo ir naudojimo procedūrų metu. Pagal pateiktus leistinus nuokrypius, standartai skirtingai riboja „minkštų“ defektų dydį. Eurocode buvo pasiūlytas didžiausias leistinas nuokrypis nuo tobulos konstrukcijos

formos. Jis sudaro 1,6 % įdubos skersmens (1 lentelė). Čia parametras *f* yra įdubos gylis. Jis negali būti didesnis, nei nustatyta procentinė įdubos skersmens dalis. Tokiu atveju konstrukcija laikoma geros kokybės („C“ klasės). Atitinkamai, esant mažesniam nuokrypio dydžiui, konstrukcija gali būti klasifikuojama kaip labai geros kokybės („B“ klasės) arba kaip puikios kokybės („A“ klasės). Į konstrukcijos klasę atsižvelgiama, kai analizuojamas sienelės pastovumas, individualiai taikant dalinį koeficientą. Kiti

1 lentelė. Leistinos nuokrypos, priklausomai nuo projektavimo standartų

Standartas		**Nuokrypa, %**
ENV 1993–1–6: „Eurocode“ 3	A	$f \leq 0{,}6$
	B	$f \leq 1{,}0$
	C	$f \leq 1{,}6$
API 650		$f \leq 1{,}4$
SNIP III–18–75		$f \leq 1{,}0$
DIN 18800		$f \leq 1{,}0$

standartai, API, SNIP ir DIN, naudoja vidutinės nuokrypių reikšmes. Šios leistinosios nuokrypos konstrukcijų skaičiavimų neįtakoja. Aptariamos nuokrypos yra labai apibendrintos jose neatsižvelgiama į nuokrypių vietą konstrukcijoje, sienelės storį, spindulį ir pan.

Mokslo problemos aktualumas

Ritininių talpyklų, kurių talpa 5000–50000 m^3, gaminimas ir montavimas yra labai sudėtingas, vos pradėjus jas nauduoti, konstrukcijų sienelės matosi vietiniai defektai. „Minkštų“ nuokrypių sankaupa ir esamų (bendrųjų nuokrypių nuo projektinės geometrijos, nuosėdžių ir t.t.) didėjimas reikalauja talpyklos tinkamumo tolimesniam naudojimui įvertinimo. Šis klausimas yra labai svarbus konstrukcijoms su galutiniu naudojimo laikotarpiu. Profesionali išvada apie mechaninę konstrukcijos būklę yra labai svarbi. Jos

pagrindu rengiant, įmonės plėtros planus, būtina pasirinkti: a) brangus kapitalinis remontas ir tolimesnis talpyklos naudojimas; b) talpyklos pakeitimas.

Tačiau daug talpyklų, kurių nuokrypių matmenys viršija leistinąsias nuokrypas, yra praktiškai naudojamos, ir šis faktas, kaip rodo ilgalaikiai stebėjimai, nesąlygoja talpyklų būklės blogėjimo. Tiriant kiekvieną specifinį atvejį arba tokių uždavinių grupę, įvedama serija supaprastinančių prielaidų, atsižvelgiant į specifinės situacijos fizikinę prasmę ir ypatumus.

Tačiau analitinių modelių tobulinimas yra ypatingai svarbus taikytinam konstrukcijų būklės tyrimui. Šiandien tokie sprendimai ypatingai domina inžinierius praktikus.

Pagrindiniai tyrimų tikslai

Pagrindiniai pristatomų tyrimų tikslai yra šie:

1. Talpyklos sienelės su įduba įtemptojo deformuotojo būvio identifikavimas.
2. Skirtumų tarp pažeistos (su įduba) ir idealios geometrijos ritininių kevalų įtemptųjų deformuotųjų būvių nustatymas.
3. Metodikos įvertinančios įdubos įtaką saugiam talpyklos naudojimui sukūrimas.

Pagrindiniai uždaviniai

Siekiant pagrindinio tikslo, buvo sprendžiami šie uždaviniai:

1. Esamų talpyklos sienelės su „minkštu“ defektu įtemptojo deformuotojo būvio nustatymo metodų apžvalga.
2. Racionalaus baigtinių elementų dydžio talpyklos sienelės su įduba skaičiavimui nustatymas.
3. Racionalaus baigtinių elementų tinklo ir jų tipą parinkimas.
4. Įdubos taškų su maksimaliomis įtempių ir poslinkio reikšmėmis vietų nustatymas.
5. Talpyklos sienelės su defektu įtemptojo deformuotojo būvio nustatymas įvertinant medžiagos tik tamprias deformacijas.

6. Talpyklos sienelės su defektu įtemptojo deformuotojo būvio nustatymas įvertinant medžiagos tampriąsias plastiškąsias deformacijas ir deformacijų netiesiškumą.
7. Išanalizuoti trijų pavidalų įdubų poveikį – pusiau rutulio, kūgio ir nupjautojo kūgio – įtemptajam deformuotajam būviui.
8. Sukurti plieninės plokštelės su įduba įtemptojo deformuotojo būvio analizės metodiką, taikant eksperimentinį ir skaitinį metodus.
9. Nustatyti plieninės plokštelės įdubos pavojingiausią sritį ir irimo mechanizmą.
10. Atlikti plieninės plokštelės su įduba skaičiavimus įvertinant medžiagos tampriąsias plastiškąsias deformacijas ir deformacijų netiesiškumą.
11. Atlikti palyginimus tarp plieninės plokštelės su įduba ir talpyklos sienelės su įduba įtemptųjų deformuotųjų būvių.
12. Apskaičiuoti įtempių samplaikos koeficientus, priklausomai nuo įdubos pavidalo ir plieno rūšies.

Mokslinis naujumas

1. Sukurta talpyklos sienelės segmento su įduba skaičiavimo metodika.
2. Pasiūlyta talpyklos sienelės įdubos teorinių įtempių samplaikos koeficientų skaičiavimo metodika, įvertinanti tris įdubų pavidalus, atsižvelgianti į talpyklos ir defekto geometrinį pavidalą.
3. Sukurta talpyklos sienelės pusiau rutulio įdubos įtempių samplaikos koeficientų skaičiavimo metodika, įvertinanti skirtingų plienų tampriosios-plastiškosios stiprėjančiosios medžiagos modelius ir sienelės deformacijų netiesiškumą.
4. Sukurta plieninės plokštės su įduba įtemptojo deformuotojo būvio analizės metodika.
5. Nustatytos įtempių samplaikos koeficiento reikšmės plokštei su įduba.
6. Sukurtas praktinis įdubos pavojingumo vertinimo metodas.

Tyrimų metodika

Siekiant pagrįstų išvadų apie talpyklų su „minkštais“ nuokrypiais mechaninę būklę, lygiagrečiai taikomi du tyrimo metodai – *eksperimentinis metodą* (EM) ir *baigtinių elementų analizė* (BEA).

Praktinė tyrimų vertė

Atlikti tyrimai gali būti naudojami ilgą laiką eksploatuojamų talpyklų su defektais būklės įvertinimui (ekspertizei). Tikėtina, daugeliu atvejų, pratęsti jų saugios eksploatacijos laikotarpį tuo sutaupant daug lėšų. Jų pagrindu gali būti tobulinami nukrypius normuojantys teisiniai dokumentai.

Ginamieji teiginiai

1. Geometriniai nuokrypiai nėra pagrindinė talpyklų irimo priežastis.
2. Praktinis samplaikos koeficientų nustatymo metodas.
3. Normuojančiuose teisiniuose dokumentuose pateikiami nuokrypių apribojimai turi būti tikslinami įvertinant įdubas pagal defektų išdėstymą, jų pavidalus, vietą, talpyklų konstrukcijas ir pan.

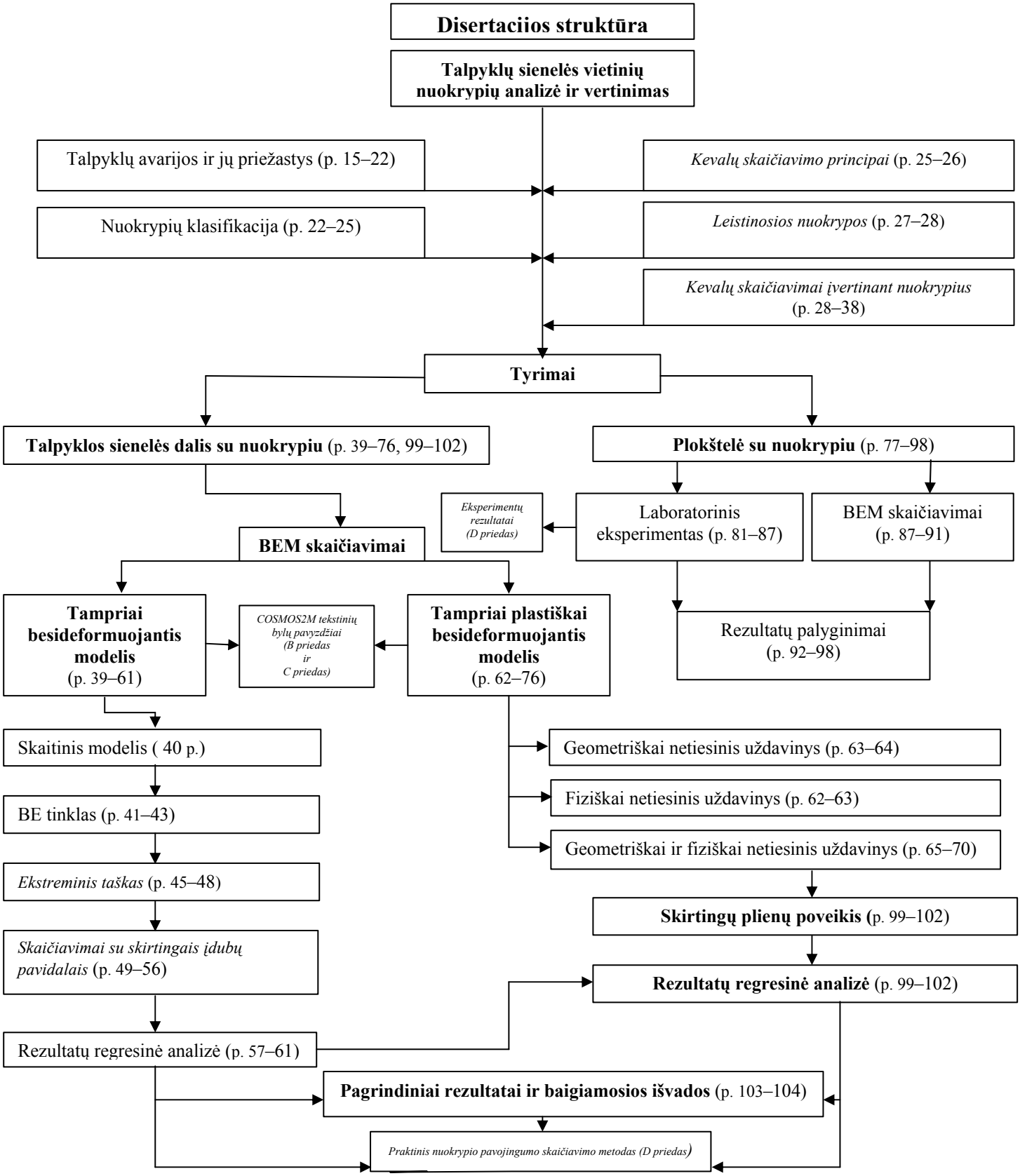
Disertacijos apimtis

Disertacija susideda iš bendrojo aprašymo, notacijų sąrašo, 60 paveikslų, 10 lentelių, šešių pagrindinių skyrių, bendrųjų išvadų ir šaltinių sąrašo. Visa disertacijos apimtis yra 136 puslapių. Disertacijos struktūra parodyta 1 paveiksle.

Darbo aprobavimas ir publikacijos

Disertacijos tema buvo paskelbta keturiolika straipsnių, iš kurių trys išspausdinti žurnaluose, įtrauktuose į Lietuvos mokslo tarybos patvirtintą duomenų bazės sąrašą.

Pagrindiniai šio darbo rezultatai buvo pristatyti aštuoniose mokslinėse techninėse konferencijose.



1 pav. Disertacijos struktūra

1. Plieninių cilindrinių vertikaliųjų talpyklų projektavimo, naudojimo ir tyrimų analizė

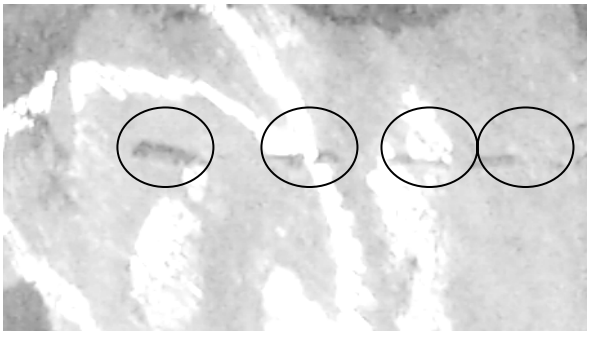
1.1. Talpyklų avarijos ir jų priežastys

Didelio tūrio plieninės ritininės stačiosios talpyklos yra plonasienės konstrukcijos. Laikoma, kad plokštė plonasienė, jei jos storio ir mažiausio matmens plokštumoje santykis yra $\leq \frac{1}{5}$. Talpykla – tai tūrinė konstrukcija iš plonų lakštų skirta sandėliuoti skystus, birius produktus ir dujinias medžiagas. Talpyklos priskiriamos ypatingų statinių grupei, kurių naudojimas siejamas su nuolatine jų diagnostika ir įtemptojo deformuotojo būvio vertinimu. Talpyklų montavimui ir remontui, jei tolimesnis naudojimas gali būti avarijos priežastimi, taikomos sudėtingos, daug kainuojančios jų įrengimo bei rekonstrukcijos technologijos.

Plieninių rezervuarų konstrukcijų avarijoms nagrinėti taikomi šie pagrindiniai apibrėžimai:

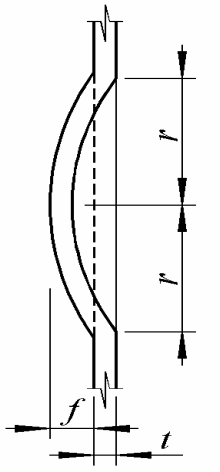
- *Gedimas* – įvykis, kurio pasekmė – statinio naudojimo proceso pažeidimas.
- *Katastrofa* – pavojingos situacijos rezultatas su žmonių žūtimi ir techninio statinio griūtimi.
- *Avarija* – pavojingos situacijos rezultatas be žmonių žūties, statinio griūties, apribojantis jo naudojimą arba sugadinantis statinį taip, kad jo atstatymas neįmanomas (ekonomiškai nenaudingas).
- *Resursas* (tarnavimo laikas) – suminė statinio naudojimo trukmė nuo jo naudojimo ar remonto pradžios iki konstrukcijos perėjimo į ribinį būvį [55].

Didelio tūrio talpyklų projektavimo, statybos ir naudojimo praktika rodo, kad labai sunku įgyvendinti tokių statinių projektus be klaidų projektinėje dokumentacijoje, statinio įrengimo technologijoje ir toliau naudoti be smulkių naudojimo pažeidimų [48, 57, 74, 96, 103, 109].



2 pav. Antžeminės ritininės stačiosios plieninės talpyklos sienelės lakšto „aštrus“ defektas

Pakankamai gerai žinomi konstrukcijų „aštrūs“ nuokrypiai (*defektai*), įpjovos, virintinių siūlių poros, krateriai, plieno plyšiai (2 pav.). Kadangi šio tipo vietiniai nuokrypiai turi didelį poveikį konstrukcijos stiprumui, jie yra išsamiai išanalizuoti ir pasiūlyta daug metodikų jiems vertinti [9, 65, 81, 83]. Tuo tarpu vietinių geometrinių „minkštųjų“ nuokrypių, įdubų, išgaubų ir pan., poveikis statinio deformacijoms, stiprumui bei ilgaamžiškumui nėra gerai ištirtas. Vietinių nuokrypių apribojimai yra pateikiami talpyklų projektavimo, statybos ir naudojimo standartuose [3, 17, 86, 88, 102]. Juose vietiniai „minkštieji“ nuokrypiai apribojami neatsižvelgiant į talpyklos tūrį, sienelės storį, nuokrypio vietą ir pan. Kadangi didelio skersmens plieninės antžeminių stačiųjų ritininių talpyklų pavidalas gali gerokai keistis dėl didelių poslinkių, deformacijų pervežimo, montavimo bei naudojimo metu, vietinės reikšmės defektai gali turėti didelį poveikį jų įtemptajam deformuotajam būviui. Tokių statinių vietiniams geometriniams, „minkštiems“ nuokrypiams ištirti reikalingi išsamesni tyrimai.



3 pav. Talpyklos sienelės pusiau rutulio defektas

Šio darbo tikslas – ištirti antžeminių ritininių plieninių talpyklų įtemptąjį deformuotąjį būvį sienelės vietinių geometrinių nuokrypių, įdubų, vietoje ir įvertinti jų poveikį talpyklos sienelės stiprumui.

Geometrinis talpyklos sienelės nuokrypis, įduba – tai vietinis lakšto nukrypimas nuo idealaus talpyklos paviršiaus susiformuojantis talpyklos sienelės lakšte dėl:

- montavimo, gamybos technologijos klaidų (suvirinimo, lakštų valcavimo technologijos, sandėliavimo, pervežimo taisyklių pažeidimo ir pan.);
- naudojimo klaidų (talpyklų iškrovimo, pakrovimo greičio nesilaikymo, vakuuminio slėgio padidėjimo ir pan.).

Geometrinis nuokrypis, turintis spindulį r ir gylį f, gali keisti pavidalą be konstrukcijos irimo. Čia r – įdubos spindulys, atstumas nuo įdubos centro iki jos krašto, f – maksimalus

atstumas nuo idealaus iki tikrojo lakšto paviršiaus, matuojamas statmenai lakšto



a b

4 pav. Paveiktos korozijos eksploatuojamos talpyklos rekonstrukcija: a) bendras vaizdas; b) antžeminės ritininės stačiosios plieninės talpyklos sienelės nuokrypas nuo jos spindulio virintinės siūlės vietoje

paviršiui (3 pav.). Sienelės lakšto „minkštas“ nuokrypis yra vietinis, jei įdubos gylis f lygus ar didesnis nei 1 % įdubos spindulio. Jei sąlyga netenkinama, nuokrypis yra bendras talpyklos konstrukcijos nukrypimas nuo projektinės geometrijos:

$$\text{kai } f \geq 0{,}01 \times r \text{ – vietinis nuokrypis,} \quad (1)$$

$$\text{kai } f < 0{,}01 \times r \text{ – bendras nuokrypis.} \quad (2)$$

Antžeminių plieninių ritininių talpyklų naudojimo trukmė yra gana neilga, t.y. 30–35 metai [75]. 1950–1970 metais pastatytų talpyklų naudojimas turi būti sustabdytas arba pratęstas įvertinus statinio esamą būklę. Dažniausiai susiduriama su pageidavimais pratęsti esamų talpyklų naudojimo laikotarpį, nes tokių statinių statyba reikalauja didelių investicijų. Tačiau vieningos inžinierinės metodikos įvertinti jų būklę nėra, dėl to užsakomi brangūs tyrimai. Talpyklų nuolatinė techninė priežiūra naudojimo metu ir



5 pav. Antžeminės ritininės stačiosios plieninės talpyklos sienelės geometrinis, „minkštas“ nuokrypis dėl lakšto valcavimo bei montavimo technologijos pažeidimo

projektinio naudojimo laikotarpio pabaigoje būtina, kadangi naftos ir jos produktų saugyklos priskiriamos ypatingiems statiniams su padidinta gaisro ir technogeninės katastrofos rizika. Juo labiau, kad šalia tokių saugyklų gali būti administraciniai ir gyvenamieji pastatai. Neteisingas talpyklos techninės būklės įvertinimas gali turėti skaudžias pasekmes su dideliais ekonominiais nuostoliais ir žmonių žūtimis.

2 lentelė. Suirusių talpyklų pasiskirstymas pagal jų tūrį

Talpyklos tūris	**Santykinis kiekis, %**
< 700	4,5
700	6,0
1000	10,5
2000	15,0
3000	3,0
5000	41,5
10000	9,0
14000	1,5
20000	6,0
30000	3,0

3 lentelė. Suirusių talpyklų pasiskirstymas priklausomai nuo jų paskirties

Statinio naudojimo sritis	**Santykinis kiekis, %**
Naftos produktų laikymas	49
Naftos gavyba	17
Naftos perdirbimas	14
Energetika	14
Kiti	6

4 lentelė. Suirusių talpyklų pasiskirstymas pagal saugomą produktą

Talpykloje saugomo produkto rūšis	**Santykinis kiekis, %**
Vanduo	26
Nafta	18
Mazutas	18
Benzinas	17
Dyzelinis kuras	11
Tepalai	3
Žibalas	2
Kiti	5

Tokio tipo statinių naudojimo metu bendri konstrukcijos nukrypimai (4a pav.), vietiniai pažeidimai (4b, 5 pav.), lakštų korozija ir kiti defektai „akumuliuojasi“. Nuokrypiai didėja dėl pamatų, pagrindų nuosėdžių, didesnių nei numatyta konstrukcijų deformacijų bei nepakankamos naudojimo procesų kontrolės. Eksploatuojant didelio tūrio kevalinio pavidalo plonasienius statinius turi būti vykdoma nuolatinė jų naudojimo būklės kontrolė ir minėtų nuokrypių prevencija.

Rusijos Federacijos statistiniais duomenimis, nuo 1960 m. iki 1995 m. jos teritorijoje užregistruota 318 saugyklų gaisrų ir avarijų, iš jų 65 atvejais talpyklos dalinai arba pilnai suiro [71, 99]. Penkiasdešimt procentų talpyklų suiro eksploatuojant 40 metų ir trisdešimt procentų po dviejų metų eksploatacijos. Dvidešimt procentų talpyklų suiro jų hidraulinio bandymo metu. Avaringiausios yra penkių tūkstančių kubinių metrų tūrio talpyklos ir, kai saugomas produktas – nafta arba naftos produktai (2, 3, 4 lentelė).

Talpyklų irtis dažniausiai prasideda nuo labiau apkrautos konstrukcijos vietos, nuo sujungimo sienelės su dugnu, virintinės siūlės defekto, skerspjūvio pasikeitimo vietos ir pan. [99]. Tolimesnė irtis vyksta ties vertikaliąja virintine siūle pagal talpyklos aukštį. Toliau dėl didelių žiedinių įtempių sienelės atsidaro ir išsitiesina $120–180^0$. Dažniausiai šios avarijos vyksta žiemą, kai žema oro temperatūra ir esant stipriam vėjui. Pagrindinės irties priežastys: padidintas hidraulinio bandymo slėgis, virintinių siūlių nuokrypos, pamatų nuosėdžiai, įtempių samplaikos ir pan. (5 lentelė) [71].

5 lentelė. Talpyklų irties priežastys

Irties priežastys	Santykinis kiekis, %
Padidintas hidraulinio bandymo slėgis, virintinių siūlių nuokrypos, pamatų nuosėdžiai, įtempių samplaikos	46,2
Žema temperatūra	15,4
Sprogimo bangos poveikis	15,4
Korozija	10,8
Aukštos temperatūros poveikis gaisro metu	7,7
Žemės drebėjimas	3,0
Kiti	1,5

6 lentelė. Talpyklų natūrinių eksperimentų rezultatai

koordinatė	**60000 m^3 talpykla**	**1000 m^3 talpykla**	**1500 m^3 talpykla**
	x	*x*	*x*
m/a	0,0330; 1,33	0,0937; 1,86	0,0756; 2,5→2,00
g_{UEC} (mbar); g_{UEC}/g_B	2,0; (0,29)	12,2; (0,90)	10,7; (0,73)
g_{U0DIN} (mbar); g_{U0DIN}/g_B	7,9; (1,12)	16,7; (1,23)	15,3; (1,04)
g_B (mbar)	7,0	13,6	14,7
g_U (mbar)	17,0	27,8	20,8
g_{max} (mbar)	27,0	49,5	39,4

čia *m/a* – maksimalūs nukrypimai *X* kryptimi; *m* ir *a* – atitinkamai tikrieji ir leistini nuokrypiai; *x* – atitinka talpyklos kevalo radialinę kryptį; g_{UEC} – teorinė skaičiuojamoji apkrova pagal Eurokodą, kai talpykla C klasės; g_{U0DIN} – teorinė skaičiuojamoji apkrova pagal DIN standartus, kai defektai neįvertinami; g_B – eksperimentinė sienelės pirmos pastovumo praradimo pavidalo apkrova; g_U – eksperimentinė apkrova esant sienelės pilnam pastovumo praradimui; g_{max} – eksperimentinė didžiausia bandymo apkrova

Surinkti antžeminių ritininių stačiųjų plieninių talpyklų avarijų duomenys [55] rodo, kad daugelyje atvejų vietiniai geometriniai „minkšti“ nuokrypiai nagrinėjami kaip antriniai faktoriai. Papildomai ir detaliau analizuojant vietinių geometrinių nuokrypių poveikį talpyklos sienelės stiprumui buvo nagrinėjami 84 plieninių ritininių antžeminių talpyklų irčių atvejai [50]. Atliktuose statinių duomenų tyrimuose buvo atsižvelgta į 16 pagrindinių veiksnių [50]. Tyrimai parodė, kad pagrindinės statinių avarijos priežastys yra: virintinių siūlių defektai – 47 atvejai, žema temperatūra – 28 atvejai, nuokrypiai nuo projektinės dokumentacijos statinio įrengimo metu – 24 atvejai, bloga plieno kokybė – 25 atvejai, temperatūros svyravimai – 21 atvejis, įtempių



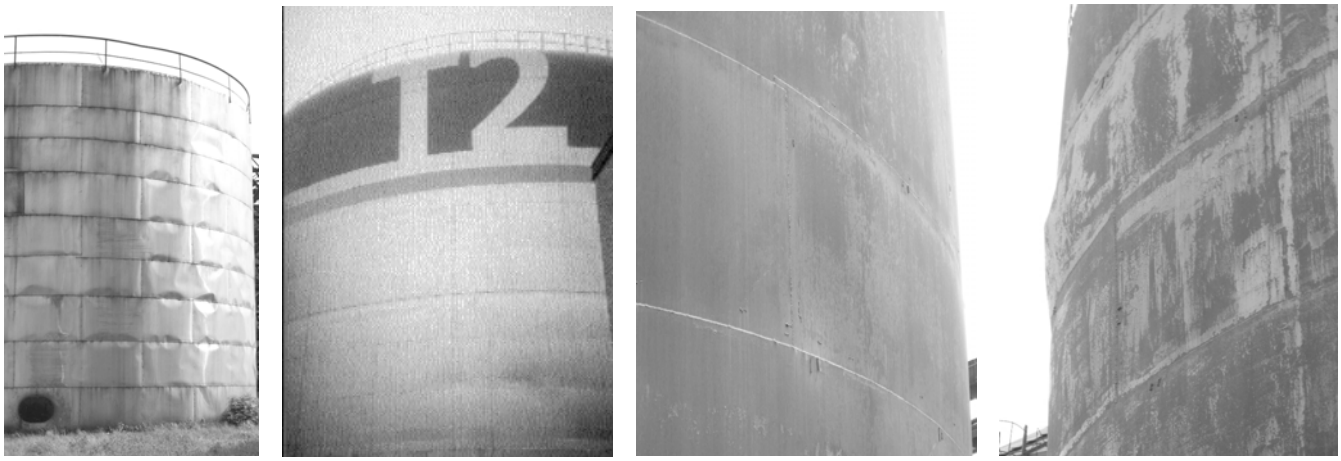
a



b

6 pav. Sienelės geometriniai vietiniai nuokrypiai: apatiniuose lakštuose (a); viršutiniuose lakštuose (b)

samplaika – 16 atvejų, slėgio skirtumai – 11 atvejų, talpyklų naudojimo klaidos – 9 atvejai, atramų poslinkiai – 7 atvejai, korozijos įtaka – 8 atvejai, talpyklų bandymo metodikų nesilaikymo – 9 atvejai. Tyrimų ataskaitose vietiniai „minkšti“ nuokrypiai buvo įvardinti kaip antraeiliai veiksniai [50]. Tuo tarpu trijų talpyklų: 65000 m^3, 1000 m^3 ir 1500 m^3 natūriniai eksperimentai parodė, kad neįvertinant vietinių nuokrypių, įdubų įtakos sienelės pastovumui jos išnaudojimo koeficientas veikiant apkrovai yra didesnis nei vienetas, atitinkamai 1,12, 1,23 ir 1,04 [24]. Įvertinant įdubų neigiamą poveikį talpyklos sienelės lakštų pastovumui išnaudojimo koeficientai pasikeičia atitinkamai 0,29, 0,90 ir 0,73 (6 lentelė) [24]. Be to, talpyklų sienelių vietiniai nuokrypiai stebimi gana dažnai, todėl į juos būtina atsižvelgti naudojimo ir renovacijos metu, pavyzdžiui, 78 lengvų naftos produktų antžeminių ritininių metalinių talpyklų terminalas [55]. Didesnė vietinių geometrinių defektų dalis nustatyta pirmose apatinėse (6a pav.) arba viršutinėse talpyklų juostose (6b pav.). Apžiūros metu buvo aptikti 286 nuokrypiai, iš jų 106 turėjo didesnę geometriją nei pateikti standartuose leidžiami nuokrypos dydžiai: 95 įdubos ir 11 išgaubos. 41 įduba ir 3 išgaubos buvo aptiktos 420 m^3 tūrio talpyklose, 24 įdubos ir 6 išgaubos – 700–3350 m^3 tūrio talpyklose, 26 įdubos ir 2 išgaubos – 5000 m^3 tūrio talpyklose, 4 įdubos buvo aptiktos didesnėse nei 5000 m^3 tūrio talpyklose.



a b c d

7 pav. „Minkšti“ plieninių antžeminių ritininių stačiųjų talpyklų sienelės įdubos pavidalo vietiniai nuokrypiai sukelti suvirinimo technologijos nesilaikymo (a); naudojimo pažeidimų (b, c, d)

Praktikoje yra labai daug naudojamų su nuokrypiais, viršijančiais leidžiamas nukrypimas pagal galiojančius standartus, talpyklų [3, 10, 17, 28, 86, 88], bet šis veiksnys nevisada lemia statinio paskirties pakeitimą arba jo naudojimo apribojimą [51, 52]. Atliekant statinio būklės įvertinimą turi būti atsižvelgta į faktinę statinio geometriją ir jo „minkštus“ vietinius nuokrypius. Šie nuokrypiai tampa ypač reikšmingi virintinių siūlių zonose ir esant prastai plieno kokybei [22, 100] (7 pav.).

Didelio skersmens plieno vamzdynai savo įtemptuoju deformuotoju būviu, vietiniais nuokrypiais yra panašūs į plienines ritinines talpyklas. Todėl sukaupta vamzdynų naudojimo ir tyrimo patirtis turi didelę praktinę reikšmę talpyklų tyrimams su panašiais vietiniais nuokrypiais [65, 83].

Visi aukščiau minėti tyrimai rodo, kad ritininių plieninių talpyklų sienelės įdubų poveikis talpyklos stiprumui, deformacijoms ir ilgaamžiškumui dar nepakankamai gerai išanalizuota. Esami techniniai statybos reglamentai ir standartai gana griežtai reglamentuoja įdubų dydžius, skersmenį, gylį ir pan. neatsižvelgiant į talpyklos skersmenį, sienelės storį, nuokrypio vietą. Šių svarbių veiksnių ignoravimas gali sąlygoti neteisingą nuokrypio poveikio saugiam naudojimui įvertinimą.

1.2. Nuokrypių klasifikacija, jų pavidalai

Kiekvienos metalinės plonasienės ritininės stačiosios talpyklos konstrukcija skiriasi nuo idealios projektinės geometrijos. Tai yra gamybinių ir montavimo netikslumų pasekmė [8, 13, 106]. Netikslumai, nuokrypos reglamentuojamos statybos taisyklėmis, normomis ir standartais [2, 3, 17, 43, 88]. Metalinės konstrukcijos gali būti saugiai naudojamos ilgą laiką, jei jų projektiniai skaičiavimai, gamyba, montavimas, apsauga nuo korozijos ir pan. atlikti be klaidų pagal galiojančius standartus ir reikalavimus. Realioje statinių eksploatacijoje susiduriama su įvairiais metalinių konstrukcijų defektais, nukrypimais. Plonasienių lakštinių metalinių konstrukcijų defektus ar trūkumus mažinančius statinio konstrukcijų stiprumą, ilgaamžiškumą ar pabloginančius naudojimo statinio savybes, dėl kurių padidėja remonto išlaidos, galima klasifikuoti taip [67, 69, 71, 74]:

- ***Pirma nuokrypių klasifikacija***
  1. Matomi konstrukcijų išoriniai, atviri defektai neuždengti kitais konstrukciniais elementais, kuriuos galima aptikti atliekant vizualinį patikrinimą.
  2. Nematomi konstrukcijų vidiniai defektai arba defektai uždengti apsauginiais sluoksniais nustatomi specialiais neardomais metodais.
- ***Antra nuokrypių klasifikacija***
  1. Konstrukcijų korozija dėl agresyvios aplinkos, pažeistų ar nepakankamo storio, ar netinkamai atliktų hidroizoliacinių sluoksnių, apsauginių dažų sluoksnių.
  2. Žema pagrindinio metalo kokybė (mažesnis plieno stiprumas, poros, plyšiai ir pan.).
  3. Bloga virintinių siūlių kokybė (mažesnis stiprumas, siūlių poros, neįvirinimai, šlakas, įpjovos, liekamieji įtempimai, plyšiai, siūlių neteisingas išdėstymas, skersinės ir išilginės virintinių siūlių deformacijos, kampinė siūlių deformacija ir pan.).
  4. Įtempių persiskirstymas, papildomos deformacijos dėl pamatų nuosėdžių, vietinio pastovumo praradimo ir pan.
  5. Įtempių koncentracija (sąstandų, skerspjūvių keitimo vietose, ties technologinių kiaurymių, sujungimų, nelygumų, geometrinių nuokrypių, įdubų, išpūčių, gofrų, plyšių ir pan.).
- ***Trečia metalinių konstrukcijų nuokrypių klasifikacija***
  1. „Aštrus“ defektas – tai lokalus defektas. Dažniausiai plyšys medžiagoje apibūdinamas staigaus skerspjūvio sumažėjimu, sukeliantis žymų įtempių padidėjimą lyginant su nominaliniais įtempimais toje pačioje konstrukcijos vietoje be defekto.
  2. Geometriniai nuokrypiai – tai vietiniai nuokrypiai nuo konstrukcijos projektinės geometrijos, kurie gali keisti savo formą, paveikti įtempių persiskirstymą, padidėjimą.

Kadangi plieno korozija, virintinių siūlių defektai, pamatų nuosėdžiai, samplaika ties sustandinimais, plyšiai akivaizdžiai turi didelį poveikį konstrukcijų stiprumui, yra gerai išnagrinėti mokslinėje literatūroje ir pasiūlyta daug metodikų jų prevencijai, vertinimui [12, 18, 49, 56]. Tuo tarpu geometriniai nuokrypiai, įdubos, išgaubos,

gofrai išnagrinėti ne taip detaliai. Standartai juos riboja pagal du geometrinius parametrus – gylį ir spindulį nevertinant konstrukcijos bendrosios geometrijos, nuokrypių formos ypatybių, jų vietos, mechaninių plieno savybių kitimo, apkrovos periodiškumo ir pan. [53, 54, 111, 112].

Geometriniai nuokrypiai, pavyzdžiui, įdubos, susiformuoja nuo montuojamųjų virintinių siūlių suvirinimo įtempių ar vamzdynų įkirtimo vietose [55]. Tokios įdubos turi „švelnų“ geometrinį pavidalą be staigių perlinkimų apybraižoje. Nuokrypiai atsirandantys dėl mechaninių pažeidimų dažniausiai yra kūgio ar rombo pavidalo [55]. Perėjimai nuo nuokrypio į nedeformuotą konstrukcijos paviršių būna staigūs su nedideliu spinduliu. Gali būti susiduriama ir su daugiau geometrinių nuokrypių. Pasireiškus pastovumo netekimui, avarijai susidaro geometrinių nuokrypių eilė.

Vietiniai geometriniai nuokrypiai gali būti klasifikuojami pagal šiuos požymius [55]:

1. ***pagal tipą***:

įduba;

išgauba;

2. ***pagal atsiradimo priežastį***:

suvirinimo deformacijos;

mechaninis pažeidimas;

pastovumo netekimas;

3. ***pagal atsiradimo laiką***:

gaminant;

montuojant;

naudojant;

4. ***pagal pavidalą*** [108]:

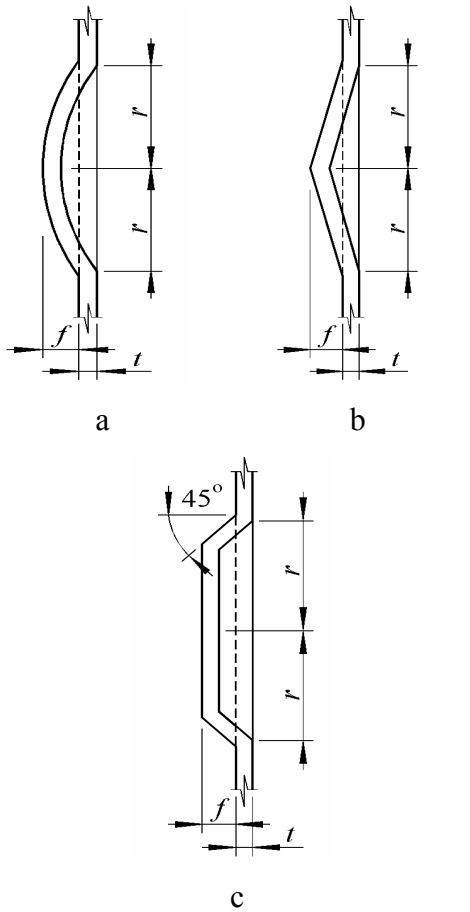
pusiau rutulinis nuokrypis;

kūginis nuokrypis;

pusiau kūginis nuokrypis;

5. ***pagal kiekį***:

vienetinis nuokrypis;



8 pav. Vietinių geometrinių nuokrypių modeliai: pusiau rutulinis nuokrypis (a); kūginis (b); pusiau kūginis nuokrypis (c)

dvigubas nuokrypis ir t.t.;

6. ***pagal išdėstymo vietą***:

momentinė sritis;

bemomentinė sritis,

pastovumo sritis.

Šiame darbe nagrinėjami matomi vietiniai vienetiniai geometriniai nuokrypiai pusiau rutulinio, kūginio ir pusiau kūginio pavidalo nemomentinėje srityje (8 pav.).

1.3. Cilindrinių plonasienių talpyklų skaičiavimo principai

1.3.1. Cilindrinių kevalų skaičiavimo principai ir prielaidos

Nagrinėjant ritininės talpyklos įtempių deformacijų būvį jos aproksimuojamos nuline Gauso kreive. Kadangi talpyklų spindulio R ir sienelės t storio santykis būna didesnis nei 200 bei jo aukščio H ir spindulio santykis telpa į intervalą $0{,}5 \le \frac{H}{R} \le 10$, jos gali būti nagrinėjamos kaip labai ploni vidutinio ilgio kevalai. Darbe nagrinėjamas antžeminės ritininės talpyklos sienelės mechaninis būvis veikiamas vidinio saugomo produkto slėgio, kai nėra vietiniai pridedamos apkrovos, sustandinimo elementų, toli nuo kevalo įtvirtinimų, be apkrovų staigių pakeitimų ir kitų faktorių, galinčių būti pakraščio efekto priežastimis. Veikiant vidiniam slėgiui ploną ritininį kevalą talpyklos sienelė yra tempiama. Tada sienelės įrąžų vektorius yra dvimatis susidedantis iš dviejų kintamųjų [5]:

$$S = \left(N_{11}, N_{22}\right)^T, \tag{3}$$

čia N_{11} – ašinė jėga ritininio kevalo aukščio kryptimi, N_{22} – ašinė jėga ritininio kevalo žiedine kryptimi.

Atliekant kevalo skaičiavimą taikomos tokios pagrindinės hipotezės:

1. Kevalo dvimatis įtempių būvis (kevalo sluoksniai vienas kito nespaudžia).

2. Kevalo medžiaga izotropinė: medžiagos tamprumo savybės visuose jo taškuose visomis kryptimis vienodos.
3. Vidurinio paviršiaus normalė po deformacijos lieka tiese, statmena deformuoto kevalo viduriniam paviršiui. Tai žinoma Kirchhofo ir Lavo hipotezė.

Šiame darbe taikomos šios kevalų skaičiavimo teorijos:

1. Bemomentinė tiesinė teorija.
2. Bemomentinė netiesinė teorija.

Projektuojant talpyklos sienelę storis apskaičiuojamas priklausomai nuo žiedinių įtempių σ_y apskaičiuojamų taip:

$$\sigma_y = \frac{\rho \times (H - x) \times R}{t}, \tag{4}$$

čia ρ – sandėliuojamo produkto tūrinis svoris, H – talpyklos aukštis, x – atstumas nuo talpyklos apačios iki dominančio slėgio taško, R – talpyklos spindulys; t – talpyklos sienelės storis.

Talpyklos sienelės viršutinių lakštų pastovumas tikrinamas priklausomai nuo meridianinių įtempių σ_z veikiančių kevale ir apskaičiuojamų taip:

$$\sigma_z = \frac{N_{11}}{t}. \tag{5}$$

Taip pat skaičiavimuose gali būti naudojami efektyviai įtempiai σ_{red} skaičiuojami taip:

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_y \times \sigma_z}. \tag{6}$$

Atskiruose atvejuose efektyviai įtempimai gali būti didesni nei žiediniai arba meridianiniai įtempiai atskirai.

1.3.2. Lakštinių konstrukcijų vietinės leistinos nuokrypos nuo idealaus konstrukcijos pavidalo

Kaip anksčiau buvo minėta, nuokrypių klasifikacijoje geometrinių, „minkštų“ nuokrypių poveikis konstrukcijų stiprumui mažiausiai ištirta lyginant su „aštriais“ defektais, metalinių konstrukcijų korozija, virintinių sandūrų defektais ir pan. Talpyklų irčių statistika rodo, kad „aštrūs“ defektai daug pavojingesni ir turi didelį poveikį konstrukcijos stiprumui. Dėl aukščiau įvardintos priežasties šie defektai gerai išanalizuoti, pasiūlytos metodikos vertinimui, jų tolesnis tyrimas atliekamas ir šiais laikais [9, 82, 83]. Geometriniams, „minkštiems“ nuokrypiams buvo skiriama mažiau dėmesio ir jų apribojimai nurodyti norminėje literatūroje [3, 17, 20, 88] pakankamai griežti be papildomų paaiškinimų neatsižvelgiant į nuokrypių išdėstymą, pavidalus, vietą, konstrukcijas ir pan.

Galiojančių Amerikos, Rusijos, Vokietijos projektavimo, montavimo ir eksploatavimo standartų reikalavimai vietinėms nuokrypoms parodyti šeštoje lentelėje (7 lentelė). Matmuo f – įdubos gylis (8 pav.). Nuokrypio gylis negali viršyti nurodytos reikšmės (7 lentelė) skaičiuojamos nuo įdubos skersmens. Pateikti įvairių šalių standartų reikalavimai riboja „minkštus“ nuokrypius projektavimo, montavimo ar naudojimo metu [3, 17, 20, 88]. Pagal pateiktas nuokrypių apribojimų ribas matyti (7 lentelė), kad

7 lentelė. Leistinos nuokrypos priklausomai nuo projektavimo standarto

Standartas		**Leistinos nuokrypos, %**
ENV 1993–1–6: Eurocode 3	A	$f \leq 0{,}6$
	B	$f \leq 1{,}0$
	C	$f \leq 1{,}6$
API 650		$f \leq 1{,}4$
SNIP III–18–75		$f \leq 1{,}0$
DIN 18800		$f \leq 1{,}0$

standartai skirtingai riboja „minkštus“ nuokrypius. Eurokode [17] pateiktos didžiausios leistinos vietinės nuokrypos nuo kevalo projektinio pavidalo. Reikšmė gali siekti 1,6 % nuo nuokrypio skersmens. Šiuo atveju statinys priskiriamas geros kokybės konstrukcijai („C“ klasei). Jei nuokrypos mažesnės, statinys gali būti klasifikuojamas kaip labai geros kokybės (klasė „B“) ir puikios kokybės (klasė „A“). Eurokodo klasifikacija naudojama skaičiuojant kevalo pastovumą. Priklausomai nuo statinio klasės taikomi skirtingi statinio daliniai koeficientai. Kitų šalių standartuose (API, DIN ir SNIP) numatytos vidutinės leistinos nuokrypos nuo idealaus kevalo pavidalo. Šios nuokrypos minėtų standartų skaičiavimuose nevertinamos, į jas atsižvelgiamą tik montavimo ir naudojimo metu. Nuokrypos reikalavimai neįvertina defekto vietos, kevalo storio, jo spindulio ir pan.

1.3.3. Plonasienių konstrukcijų skaičiavimo metodikos įvertinančios geometrinio nuokrypio poveikį mechaniniam būviui

Akivaizdu, kad „minkšti“ nuokrypiai turi poveikį įtempių ir deformacijų padidėjimui nuokrypių vietoje. Šie nuokrypiai tampa medžiagos takumo ribos padidėjimo, medžiagos sukietinimo, plyšių atsiradimo priežastimi. Įdubos medžiaga charakterizuojama reikšmingu sustiprėjimu ir aiškiai aukšta samplaika [15, 19, 21]. Be to, geometrinis nuokrypis gali turėti visai kitą reikšmę, jei jo vieta yra ties dugno ir sienelės sujungimu, sustandinimų, vietinių apkrovų pridėjimo vietomis ar pan. Šios statinio konstrukcijų vietos pavojingesnės dėl kraštinio efekto arba kitaip vadinamo pakraščio efekto [5, 37]. Dėl poslinkių suvaržymo, standaus sienelės sujungimo su dugnu vietoje ar panašiose vietose, reikia įvertinti reikšmingas momentų ir skersinių jėgų įrąžas [107]. Todėl kitų mokslininkų darbuose dažnai nagrinėjami talpyklų sienelės nuokrypių modeliai įvertinantys jos prijungimą prie talpyklos dugno, pamatų ar kitų pakraščio efekto vietų [45, 113].

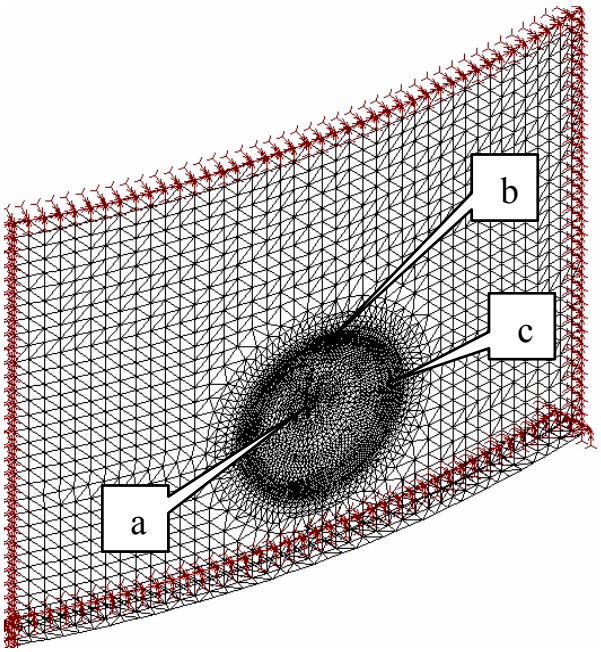
Tikslesnis ryšys tarp įtemptojo deformuotojo būvio pobūdžio nuokrypių vietose ir nuokrypių dydžių, konkrečios analizuojamos talpyklos konstrukcijos ir pan. nustatomas pagrįstomis įtempių pasiskirstymų analitinėmis priklausomybėmis, taip pat naudojamų talpyklų nuokrypių tyrimais [55, 76, 77, 83, 86]. Be to, labai plačiai naudojami vamzdynų

ir tempiamų plokštelių su nuokrypiais bandymo metodai nustatyti įtempių samplaikos koeficientų analitines formules [22, 40, 106].

Įtempių ar deformacijų samplaikos koeficientas bedimensis dydis lygus įtempio reikšmės samplaikos vietoje (σ_{max}) ir įtempio nominalinės reikšmės (σ_{nom}) toje pačioje konstrukcijos vietoje be samplaikos, nuokrypio, santykiui:

$$k = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{nom}}. \qquad (7)$$

Įtempių samplaikos koeficientas yra patogi reikšmė talpyklos stiprumo bei jos ilgaamžiškumo įvertinimui. Jis gali būti išreikštas per konstrukcijų ir nuokrypių matmenis. Visos apžvelgtos skaičiavimo metodikos siūlo įtempių padidėjimą nuokrypio vietoje įvertinti įtempių samplaikos koeficientu [55, 76, 77, 83, 86].



9 pav. Talpyklos sienelės nuokrypio skaitinis modelis

Pavojingiausieji charakteringieji geometrinio nuokrypio įdubos taškai yra vidurinis „a“, apybraižos viršutinis „b“ ir apybraižos šoninis taškas „c“ (9 pav.) [51, 76]. Priklausomai nuo nuokrypio didžiausia įtempių samplaikos koeficiento reikšmė gali būti nustatyta geometriniais matmenimis jo viduriniame arba apybraižos taškuose. Įdomiausia, kai didžiausia įtempių samplaikos koeficiento reikšmė nustatoma tarp įdubos charakteringųjų taškų, „a“, „b“ ir „c“. Kituose moksliniuose darbuose charakteringieji taškai neišskiriami [86] ar nagrinėjamas tik „b“ [76] arba „a“ ir „b“ taškai [55]. Tuo tarpu kiti talpyklos sienelės įdubos taškai ar taškai aplink nuokrypį pagal

stiprumo energetinę teoriją mažiau įtempti nei ekstreminis taškas ar kita sienelės be nuokrypio dalis.

Pagrindiniai nuokrypio geometriniai matmenys gali būti nusakyti nuokrypio santykiniu spinduliu [55]:

$$\beta(r, R, t) = \frac{r}{\sqrt{R\,t}} \tag{8}$$

ir santykiniu gyliu:

$$\gamma(f, t) = \frac{f}{t}, \tag{9}$$

čia r – nuokrypio spindulys, R – talpyklos spindulys, t – talpyklos sienelės lakšto storis nuokrypio vietoje, f – nuokrypio gylis.

Normos RD-08-95-95, „Naftos ir naftos produktų virintinių stačiųjų ritininių talpyklų techninio įvertinimo taisyklės“ [86] siūlo įvertinti įtempių padidėjimą įdubos vietoje samplaikos koeficientu skaičiuojamu taip:

$$k_{a,b} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}}, \tag{10}$$

čia σ_{nom} – nominalieji įtempiai konstrukcijos vietoje be nuokrypio ir σ_{max} – maksimalieji įtempiai įvertinantys nuokrypio įtaką. Šie įtempiai skaičiuojami pagal tokias formules:

$$\sigma_{nom} = \frac{p \times (D + t)}{2 \times t}, \tag{11}$$

$$\sigma_{max} = \frac{p \times (D + t)}{2 \times t \times \lambda_1}, \tag{12}$$

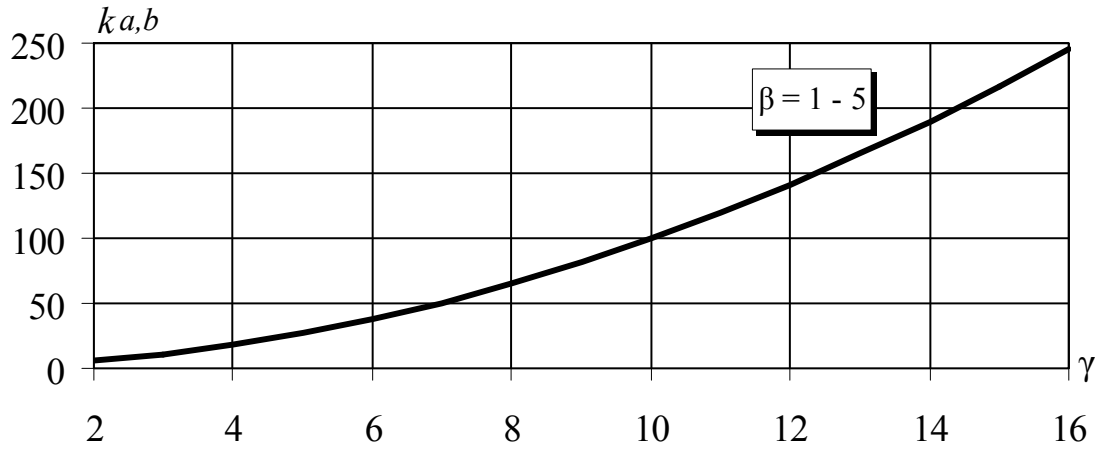
čia $p = \rho \times (H - x)$ – skysčio slėgis sienelės įdubos apatinėje dalyje nustatomas dauginant

skysčio tankį iš nagrinėjamo taško gylio, D – talpyklos skersmuo, t – kevalo lakšto storis nuokrypio vietoje, λ_1 – įtempių padidėjimą įvertinantis koeficientas nuokrypio vietoje, kuris skaičiuojamas taip:

$$\lambda_1 = 1, \text{ kai } \gamma(f,t) = \frac{f}{t} \le 0{,}1, \tag{13}$$

$$\lambda_1 = \frac{1{,}105}{\gamma^2 + \sqrt{\gamma^2 + 1}}, \text{ kai } \gamma(f,t) = \frac{f}{t} \ge 0{,}1. \tag{14}$$

Dešimtos formulės rezultatus, kai talpyklos spindulys $R = 11{,}5$ m, aukštis $H = 12{,}0$ m, sienelės storis nuokrypio vietoje $t = 7$ mm, nuokrypio santykinis gylis $2 \le \gamma \le 16$, nuokrypio santykinis spindulys $1 \le \beta \le 5$, galima pateikti diagramoje (10 pav.).



10 pav. Talpyklos sienelės įdubos vietoje, žiedinių įtempių samplaikos koeficiento ir defekto santykinio gylio γ ir spindulio β sąryšis

Iš (10 pav.) pateiktos kreivės matyti, kad įtempių samplaikos koeficientas priklauso tik nuo įdubos gylio γ. Prie pakankamai nedidelių nuokrypių, pavyzdžiui, kai įdubos gylis yra tris kartus didesnis nei sienelės storis, $\gamma = 3{,}0$, įtempių samplaikos koeficientas padidėja iki $k = 11$ kartų. Tai pakankamai griežtas ir nepagrįstas įvertinimas.

Kita metodika, teoriniam įtempių samplaikos koeficientui nustatyti geometrinio

nuokrypio įdubos vietoje, siūloma Lichman ir kt. metodika [76]. Ši metodika, priešingai nei prieš tai pateikta, jau įvertina įdubos gylio ir spindulio poveikį įtempių padidėjimui nuokrypio vietoje. Įtempių samplaikos koeficientą siūloma skaičiuoti taip:

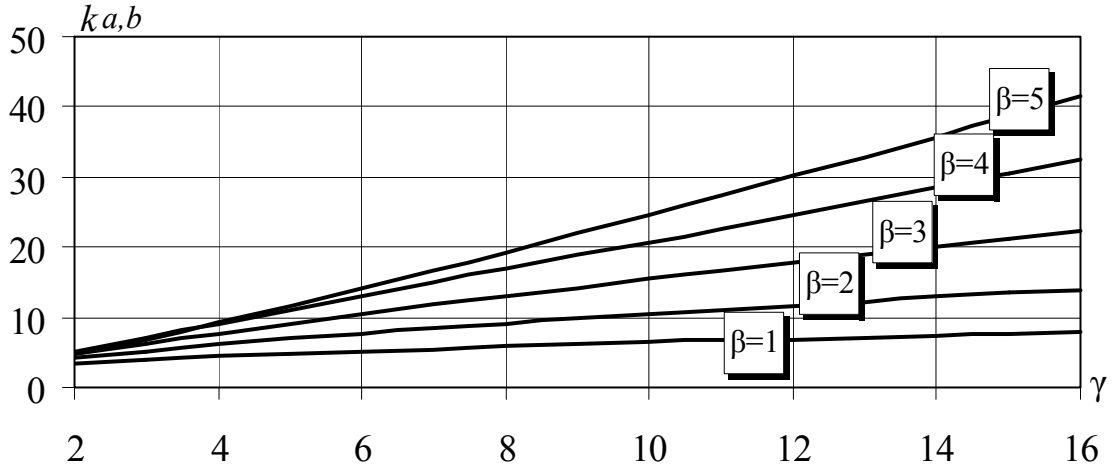
$$k_{a,b} = 1 + B \times \gamma^{m}, \tag{15}$$

čia B ir m empiriniai koeficientai priklausantys nuo statinio konstrukcijos ir defekto dydžio. Siūlomi skaičiuoti taip:

$$B = -0{,}117\frac{r^2}{R \times t} + 0{,}711\frac{r}{\sqrt{R \times t}} + 1{,}05, \tag{16}$$

$$m = 0{,}158\frac{r}{\sqrt{R \times t}} + 0{,}358. \tag{17}$$

Šios formulės (penkioliktos) rezultatai gali būti pateikti diagramoje (11 pav.), kai talpyklos ir nuokrypio dydžiai tokie pat kaip ir pirmuoju atveju.



11 pav. Talpyklos sienutės įdubos vietoje, efektyvių įtempių samplaikos koeficiento ir defekto gylio γ ir spindulio β sąryšis

Šioje metodikoje įvedamas naujas kintamasis B įvertinantis įdubos spindulį β. Lyginant su dešimtos formulės diagrama (10 pav.), įtempių samplaikos koeficientas turi mažesnes reikšmes. Įdubos gyliui, esant tris kartus didesniam už sienelės storį, $\gamma = 3{,}0$, įtempių

samplaikos koeficientas keičiasi nuo k = 4,0 iki k = 7,0 priklausomai nuo nuokrypio spindulio β (11 pav.).

Kituose darbuose [55] parodytas skirtumas tarp įtempių pasiskirstymo nuokrypio apybraižos taškuose ir jo vidurinės srities taškuose priklausomai nuo įdubos pavidalo. Nuokrypio vidurinio taško „a“ įtempių samplaikos koeficiento reikšmė siūloma skaičiuoti taip:

$$k_a(q_i,\beta,\gamma)=\frac{P_1(q_i,\beta,\gamma)}{P_2(q_i,\beta,\gamma)}. \tag{18}$$

Nuokrypio apybraižos viršutinio taško „b“ įtempių samplaikos koeficiento reikšmė siūloma skaičiuoti taip:

$$k_b(s_i,\beta,\gamma)=A(s_i,\gamma)\times\beta^m(s_i,\beta,\gamma), \tag{19}$$

čia P_1, P_2, A, β^m – polinominės funkcijos:

$$P_1(q_i,\beta,\gamma) = q_1 + q_2\beta - q_3\beta^2 + q_4\beta^3 + q_5\beta\gamma - q_6\beta^2\gamma - q_7\beta^3\gamma + q_8\beta\gamma^2 - q_9\gamma^2, \tag{20}$$

$$P_2(q_i,\beta,\gamma) = q_{10} - q_{11}\beta + q_{12}\beta^2 - q_{13}\beta\gamma - q_{14}\beta^2\gamma + \gamma^2, \tag{21}$$

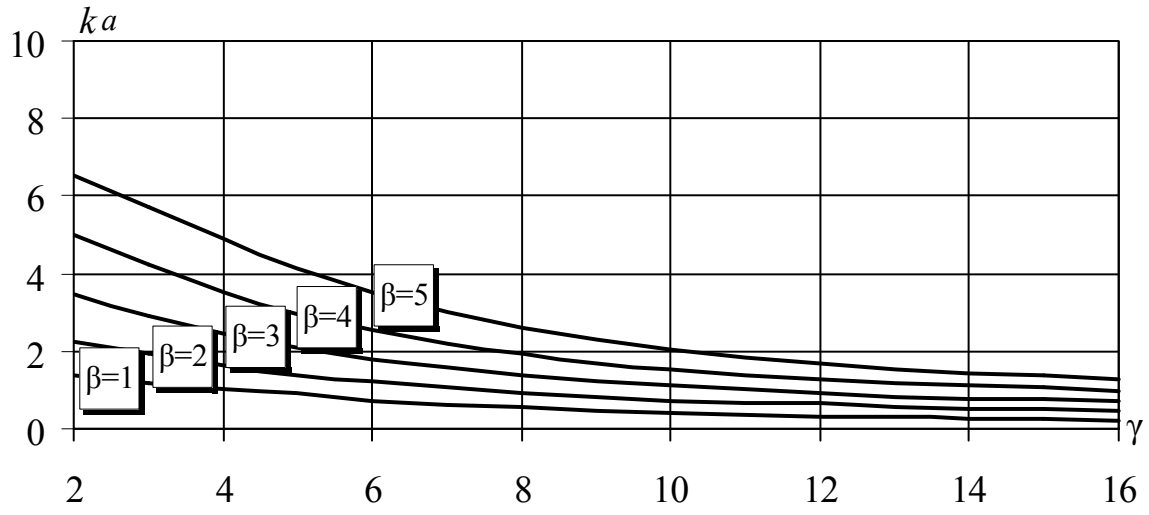
$$A(s_i,\gamma)=s_1 + s_2\gamma - s_3\gamma^2 + s_4\gamma^3 - s_5\gamma^4, \tag{22}$$

$$\beta^m(s_i,\beta,\gamma)=[\beta]^{(s_6\ln(\gamma)+s_7)}, \tag{23}$$

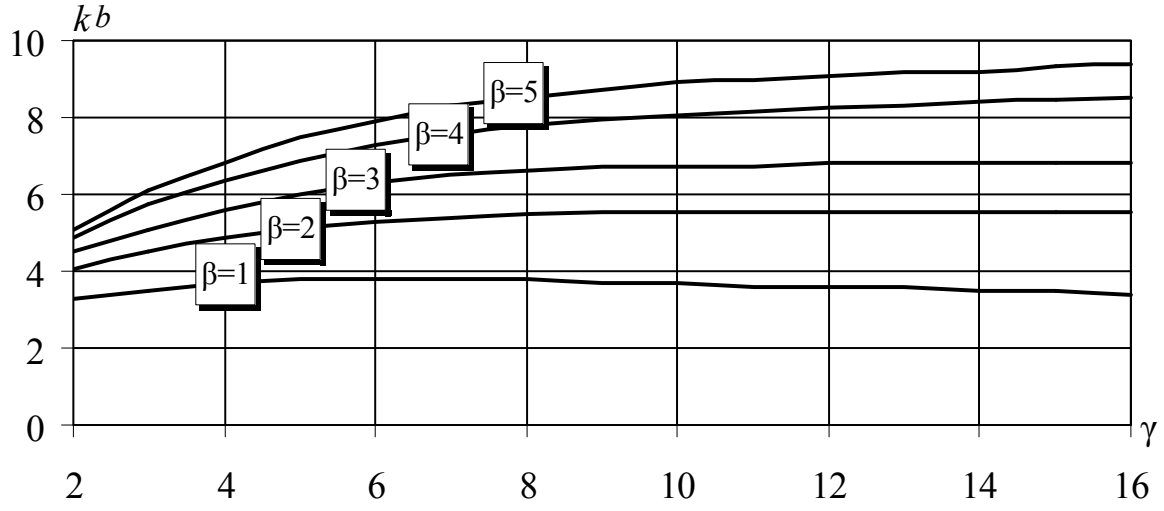
čia q_i ir s_i – empiriniai koeficientai: $q_1=56{,}1$; $q_2=27{,}4$; $q_3=0{,}821$ $q_4=0{,}286$; $q_5=0{,}057$; $q_6=0{,}034$; $q_7=0{,}028$; $q_8=0{,}161$; $q_9=0{,}150$; $q_{10}=59{,}5$; $q_{11}=9{,}71$; $q_{12}=1{,}79$; $q_{13}=0{,}378$; $q_{14}=0{,}174$; $s_1=2{,}57$; $s_2=0{,}51$; $s_3=0{,}0688$; $s_4=0{,}376\times10^{-2}$; $s_5=0{,}75\times10^{-4}$; $s_6=0{,}169$; $s_7=0{,}153$.

Aštuonioliktos ir devynioliktos formulės pagal gautas samplaikos koeficientų kreives pateiktos diagramose (12, 13 pav.).

Diagramos (12, 13 pav.) parodo esminį skirtumą tarp samplaikos viduriniame ir apybraižos taškuose įvertinant įdubos spindulį ir gylį. Be to, įtempių samplaikos koeficientas esant didžiausiam nuokrypio dydžiui žymiai mažesnis nei prieš tai aprašytose metodikose. Išraiškos (18) ir (19) įvertina konstrukcijos lakšto storio ir spindulio poveikį įtempių samplaikai įduboje, kas nenumatyta statybos reglamentuose [3, 17, 20, 88].



12 pav. Talpyklos sienelės įdubos viduriniame „a“ taške efektyvių įtempių samplaikos koeficiento ir nuokrypio gylio γ ir spindulio β sąryšis

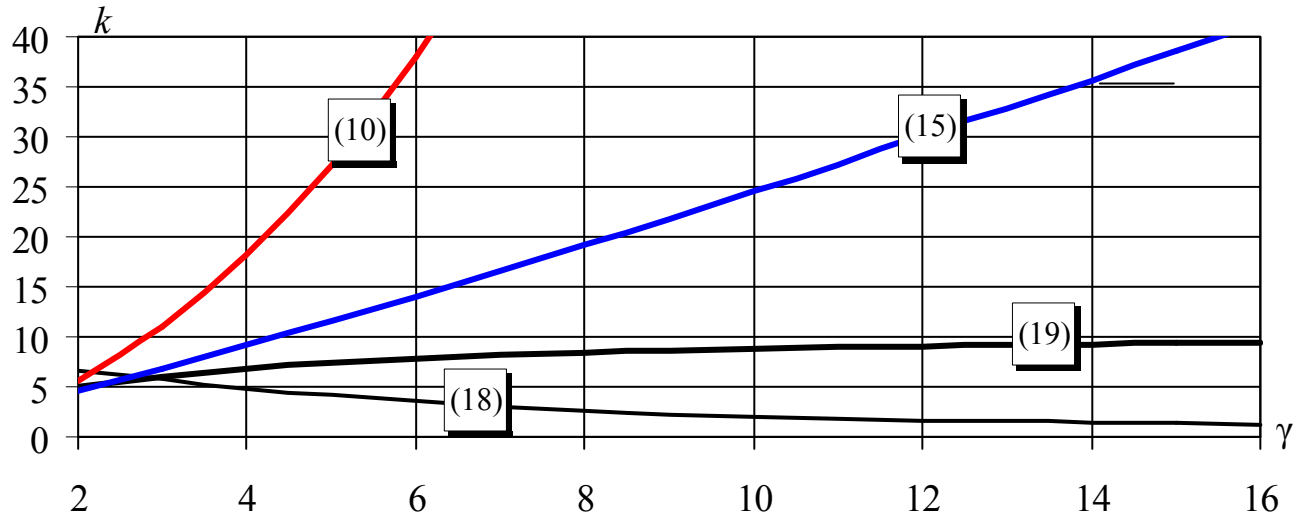


13 pav. Talpyklos sienelės įdubos viršutiniame apybraižos taške „b“ efektyvių įtempių samplaikos koeficiento ir nuokrypio gylio γ ir spindulio β sąryšis

Iš rezultatų matyti, kad siūlomi samplaikos koeficiento nustatymo sprendiniai gauti atliekant statinio tiesinę analizę, įvertina medžiagos tamprias deformacijas ir neįvertina statinio sienelės geometrijos pasikeitimo apkrovimo metu. Sprendimai formuluojami įvertinant konstrukcijų bandymus, apžiūros įvertinimus bei standartų reikalavimus.

Palyginimui bendrame grafike (14 pav.) pateikti trijų aprašytų metodikų rezultatai, kaip ir ankstesniuose pavyzdžiuose, įvertinant talpyklų ir nuokrypių pavidalą, $\beta = 5{,}0$. Iš pateiktos diagramos (14 pav.) matyti, kad kiekvienos metodikos samplaikos koeficientų sritys labai skirtingos. Vieningos nuomonės apie geometrinių nuokrypių poveikį įtempių ir deformacijų pasiskirstymui nėra. Didžiausia atsarga gaunama skaičiuojant įtempių samplaikos koeficientą pagal dešimtą formulę, o mažiausia – pagal aštuonioliktą ir devynioliktą formules.

Su panašiais geometriniais nuokrypiais, gofrais, įdubomis, išgaubomis ir pan. susiduriama pakankamai dažnai vamzdynų montavimo metu ir naudojime. Yra atlikta daug vamzdynų geometrinių nuokrypių tyrimų ir jų pagrindu pasiūlytos metodikos samplaiką įvertinti. Šių nuokrypių poveikis vamzdynų stiprumui ir ilgaamžiškumui išnagrinėta išsamiau Machutov ir Bardubanov darbuose [65, 83].



14 pav. Talpyklos sienelės įdubos ekstreminiuose taškuose įtempių samplaikos koeficiento ir nuokrypio gylio γ (kai β = 5,0) sąryšis

Vamzdynų geometriniai nuokrypiai panašūs į talpyklų geometrinius nuokrypius. Pagrindiniai nuokrypio, gofro geometriniai dydžiai: jo aukštis ir atstumas tarp gofro apybraižų kraštinių taškų. Šie geometriniai nuokrypio dydžiai atitinka talpyklos sienelės įdubos gylį f ir skersmenį $2r$. Machutovo darbuose buvo nagrinėjami vamzdynų naudojimo gofrų santykiniai dydžiai nuo $2r/f = 2{,}5$ iki $2r/f = 4{,}0$, dėl kurių gali įvykti vamzdynų gofrų statinė ar ciklinė irtis. Pavojingiausi nuokrypio taškai, kaip ir talpyklos įdubos, yra jo apybraižos ir vidurinis taškas. Dėl geometrinių nuokrypių nuo skaičiuojamosios vamzdyno schemos, keičiasi medžiagos mechaninės savybės: padidėja medžiagos takumo riba, kietumas, atsiranda plyšiai ir įtrūkimai. Gofrų, įdubų vietoje atsiranda žymūs liekamieji įtempiai, kurie gali būti staigios vamzdyno irties priežastimi [65, 83].

Siūlomos tokios išraiškos įtempių k ir deformacijų k_ε samplaikos koeficiento skaičiavimui įvertinant plieno sustiprėjimą įdubos vietoje [83]:

$$k_\varepsilon = \frac{\alpha_\sigma^{2/(1+m)} \times \bar{\sigma}_n^{(1-m)/(1+m)}}{\left(\alpha_\sigma \times \bar{\sigma}_n\right)^{n\frac{1-m}{1+m}\left[1-\left(\bar{\sigma}_n - 1/\alpha_\sigma\right)\right]}} \text{ kai } \bar{\sigma}_n \le 1, \tag{24}$$

$$k_\varepsilon = \frac{\alpha_\sigma^{2/(1+m)}}{\left(\alpha_\sigma \times \bar{\sigma}_n\right)^{n\frac{1-m}{1+m}\left[1-\left(\bar{\sigma}_n - 1/\alpha_\sigma\right)\right]}} \text{ kai } \bar{\sigma}_n \ge 1, \tag{25}$$

$$k = \frac{\alpha_\sigma^{2m/(1+m)}}{\bar{\sigma}_n^{(1-m)/(1+m)}\left(\alpha_\sigma \times \bar{\sigma}_n\right)^{n\frac{1-m}{1+m}\left[1-\left(\bar{\sigma}_n - 1/\alpha_\sigma\right)\right]}} \text{ kai } \bar{\sigma}_n \le 1, \tag{26}$$

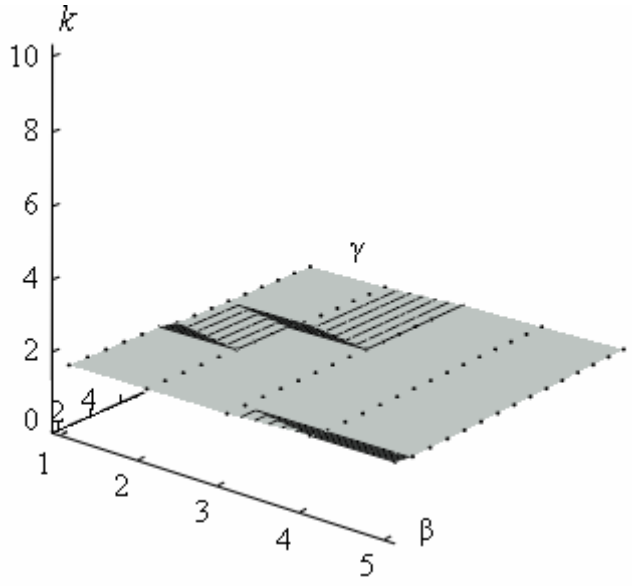
$$k = \frac{\alpha_\sigma^{2m/(1+m)}}{\left(\alpha_\sigma \times \bar{\sigma}_n\right)^{n\frac{1-m}{1+m}\left[1-\left(\bar{\sigma}_n - 1/\alpha_\sigma\right)\right]}} \text{ kai } \bar{\sigma}_n \ge 1, \tag{27}$$

čia samplaikos koeficientai priklauso nuo įtempių reikšmės kevale be nuokrypio ir takumo ribos santykio ($\sigma_n = \sigma_{nom} / \sigma_y$) ir plieno sustiprėjimo nuokrypio vietoje *m* skaičiuojamo pagal formulę:

$$m'' = \frac{\lg\left(k \times \frac{\sigma_u}{\sigma_{0,2}} \times \left(1 + 1{,}4 \times \psi_K\right)\right)}{\lg\left[\left(\chi \times 10^5 \times \ln\frac{1}{1-\psi_K}\right) / \left(200 + 0{,}5 \times \sigma_{0,2}\right)\right]}, \qquad (28)$$

n – konstanta ($n \approx 0.5$), $\sigma_{0,2}$ – sąlyginė plieno takumo riba, ψ_K – santykinis susiaurėjimas, α_σ – teoriniai samplaikos koeficientai skaičiuojami įvertinant tik tamprios medžiagos deformacijas. Samplaikos koeficientai apskaičiuojami pagal formules (10) ar (15) arba (18) ir (19).

Įvertinant konstrukcijos ir nuokrypio matmenis pateiktus ankstesniuose pavyzdžiuose (R = 11,5 m, H = 12,0 m, t = 7 mm, $2 \le \gamma \le 16$, $1 \le \beta \le 5$, $\alpha_\sigma = k_b$ pagal (19) formulę) įvertinant plieno markę (S355), tada (24) – (27) formulės įtempių samplaikos koeficientų reikšmių diagramos (15 pav.). Diagramoje matyti, kad įtempių samplaikos koeficientas nežymiai priklauso nuo nuokrypio geometrijos ir gali būti priimtas kaip nekintamas dydis kiekvienai plieno markei (15 pav.).



15 pav. Plonasienės konstrukcijos sienelės įdubos apybraižos viršutiniame taške įtempių samplaikos koeficiento ir defekto gylio γ ir spindulio β įvertinant plieno sustiprėjimą sąryšis

Šiame darbe nagrinėjamas didelio tūrio antžeminių ritininių stačiųjų talpyklų vietinių nuokrypių įdubų sienelėje skaitinis modeliavimas baigtinių elementų metodu, plonų lakštų su įdubomis skaitinis modeliavimas tūriniais ir plokščiais baigtiniais elementais, laboratorinis eksperimentas su plonais lakštais turinčiais įdubas, įdubų skirtingų pavidalų poveikį statinio sienelės

įtemptajam deformuotajam būviui bei kitų autorių ir standartų siūlomos metodikos.

1.4. Pirmojo skyriaus išvados

1. Talpyklų avarijų statistika rodo, kad geometriniai nuokrypiai nėra pagrindinė jų irties priežastis. Yra daug ilgalaikės talpyklų beavarinio naudojimo pavyzdžių be remonto ar sustiprinimo esant neleistiniems (pagal šiuo metu galiojančius standartus) nuokrypių geometriniams matmenims.
2. Mokslininkų darbuose nagrinėjami pavieniai nuokrypiai ir vieno tipo pavidalas. Tačiau antžeminių ritininių talpyklų sienelės geometrinių nuokrypių tipų atsiradimo priežastys, išdėstymo vietos, jų kiekis gali būti įvairus. Įdubų pavidalas galima klasifikuoti taip: pusiau rutulinis nuokrypis, kūginis nuokrypis, nupjautasis kūginis nuokrypis.
3. Pateiktų metodų analizė parodė, kad vieningos metodikos antžeminių ritininių talpyklų sienelės geometrinių nuokrypių įvertinimui nėra. Nėra vieningos nuomonės tokiais klausimais:
   - geometrinių nuokrypių ekstreminių taškų išdėstymas;
   - nuokrypio pavidalo poveikis įtemptajam deformuotajam būviui;
   - medžiagos netiesinių savybių poveikis įtemptajam deformuotajam būviui;
   - talpyklos apkrovimo istorijos poveikis talpyklos sienelės su nuokrypiu stiprumui;
   - talpyklos sienelės ir geometrinio nuokrypio deformacijos poveikis sienelės stiprumui.
4. Remiantis standartų pateiktomis nuokrypių apribojimų ribomis galime teigti, kad standartai skirtingai riboja „minkštus“ nuokrypius neatsižvelgiant į nuokrypių išdėstymą, pavidalus, vietą, konstrukcijas ir pan. Todėl standartuose siūlomos įvertinimo metodikos gali būti tobulinamos.

2. Cilindrinės talpyklos su „minkštu“ nuokrypiu skaičiavimai baigtinių elementų metodu

2.1. Bendra talpyklos su „minkštu“ nuokrypiu skaitinio modelio charakteristika

Plonų kevalų sudarytų iš kreivų paviršių skaičiavimą nagrinėja klasikinės kevalų teorijos. Šių teorijų (Flugge‘s, Vlasovo, Donello ir kt.) lygtys yra per daug sudėtingos, kad būtų galima taikyti bet kuriam kevalo atvejui.

Baigtinių elementų metodo (BEM) programos ir nuolatinis jų tobulinimas suteikia galimybes virtualių ar matematinių modelių kūrimui bei įvairių konstrukcijų ar jų nuokrypių analizei. Tikslesnių analitinių modelių kūrimui [38, 41] labai svarbus jų verifikavimo konstrukcijos mechaninio būvio tyrimas. Tokie analitiniai sprendimai ypatingai įdomūs inžinieriams praktikams.

Efektyviam uždavinio sprendimui tikslinga naudoti kelis metodus. Galėtų būti analitinis metodas, jį dubliuojantis skaitmeninis metodas ir natūriniai eksperimentai. Žemiau pateikti tyrimai apima visus tris tyrimo metodus atsižvelgiant į pirmame skyriuje paminėtas problemas.

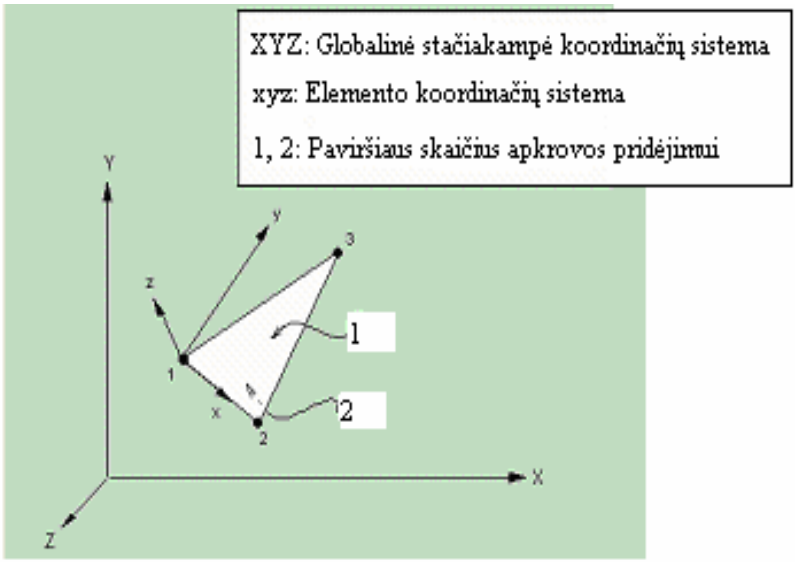
Šiame skyriuje pateikta tyrimų rezultatų tiesinės BEM analizė. Tyrimų objektas – ritininis kevalas su geometriniu nuokrypiu. Pagrindinis tyrimo objekto skaitinio modeliavimo tikslas - įvertinti ritininio kevalo geometrinio nuokrypio poveikį statinio sienelės mechaniniam būviui. Buvo siekta, kad konstrukcijos su įduba skaitinis modelis atitiktų statinio tikrąją nuokrypio situaciją. Be to, atliekant tolimesnius tyrimus keliais metodais buvo labai svarbu tiksliai prognozuoti mechaninį būvį, įtempių, deformacijų reikšmių dydžius ir t.t. Atliekant statinio su įduba įtemptojo deformuotojo būvio vertinimą buvo atsižvelgiama į konstrukcijos geometriją ir nuokrypių pavidalus. Kituose skyriuose buvo tiriami kevalo apkrovimas, pradžia ir pabaiga, jų išdėstymo vietos, medžiagos savybės ir t.t. Visi minėti veiksniai, realios ir individualios situacijos ypatumai yra vienodai svarbūs. Be to, atskiriems ypatingų grupių nuokrypiams, nestandartiniams atvejams, kurie neįvertinami normine literatūra taikomos prielaidos. Šios prielaidos

įvertinamos nagrinėjant fizikinę-mechaninę uždavinio pusę ir individualią situaciją [23, 25].

2.2. Skaitinis modelis

Pirmame skyriuje pateiktų analitinių formulių, įtempių samplaikos koeficiento skaičiavimui, patikrinimui buvo atliktas realaus statinio nuokrypio skaitinis modeliavimas baigtinių elementų metodu. Skaičiavimai atlikti naudojant standartinę BEM programą COSMOS/M [14, 39].

Pagrindinių uždavinių sprendimui programos COSMOS/M pagalba buvo modeliuojamas talpyklos sienelės kevalo fragmentas įvertinant kitos talpyklos kevalo dalies įtvirtinimo simetrijos sąlygas ir saugojimo produkto hidrostatinį slėgį pridedamą iš kevalo vidaus. Skaičiavimams buvo pasirinktas kevalinis „SHELL3T“ trikampinis *baigtinis elementas* (BE), turintis 3 mazgus ir kiekvienas mazgas apibūdinamas 6 *laisvės laipsniais* (LL) (trys poslinkiai ir trys posūkiai) (16 pav.). Skaičiavimuose BE dydis nuokrypio vietoje neviršija 1 mm. Modeliuojant talpyklą buvo bandoma atsižvelgti į visus reikšmingus veisknius. Gruntas buvo įvertinamas kaip tamprus pagrindas su 10,0 MPa standumu. Atliekant skaičiavimus buvo atsižvelgiama į įdubos padėtį ir talpyklos naudojimo sąlygas.

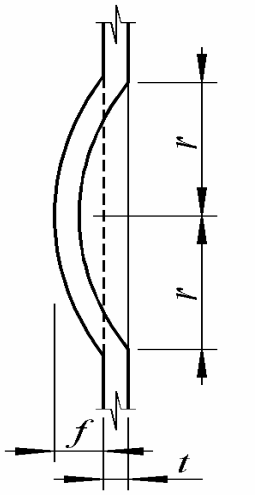


16 pav. Kevalinis „SHELL3T“ trikampinis *baigtinis elementas*

Talpyklos dalis buvo apkrauta sienelės svoriu ir saugojimo produkto slėgiu, kuris pridedamas kaip tolygiai išskirstyta apkrova mažėjanti link talpyklos viršaus. Nuokrypios pavidalai pasirinkti atsižvelgiant į talpyklų ekspertų išvadas (8 pav.).

2.3. Baigtinių elementų tinklas

Šiame tyrime analizuojamas „minkštas“ geometrinis nuokrypis įduba, turintis dvi pavojingiausias sritis [57, 73, 107]. Tai įdubos vidurinė ir apybraižos sritys. Kiekvienoje paminėtoje srityje yra įtempių ir poslinkių koncentracijos taškai. Analizuojamam nuokrypiui tai yra taškas „*a*“ ir taškas „*b*“ (17 pav.). Talpyklos sienelės nuokrypio vietoje įtempių ir poslinkių pasiskirstymas esant vidiniam saugojamo produkto slėgiui neatitinka klasikinių ritininių kevalų skaičiavimų dėl pakitusio kevalo pavidalo ir medžiagos savybių ir t.t. Tiriant įtempių ir poslinkių samplaiką ritininio kevalo įdubos vietoje BEM pirmiausia kyla klausimas, koks turėtų būti BE dydis nuokrypio vietoje [6, 72].

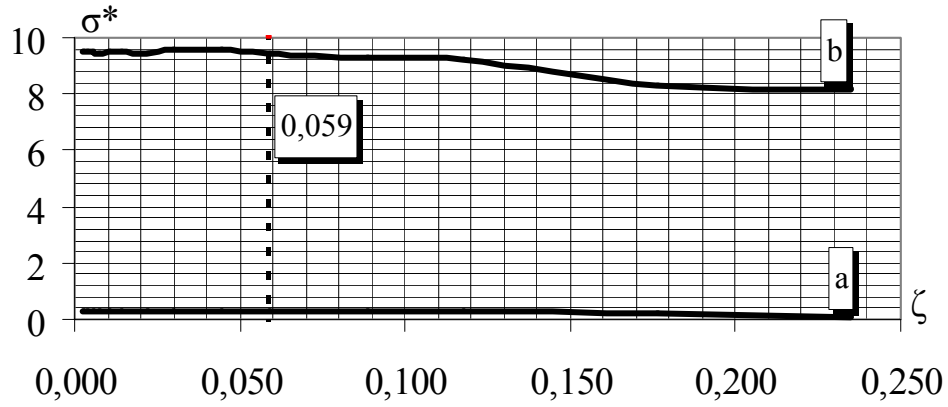


17 pav. Talpyklos sienelės pusiau rutulinis nuokrypis su ekstreminių taškų išdėstymu: a – vidurinis taškas, b – apybraižos taškas

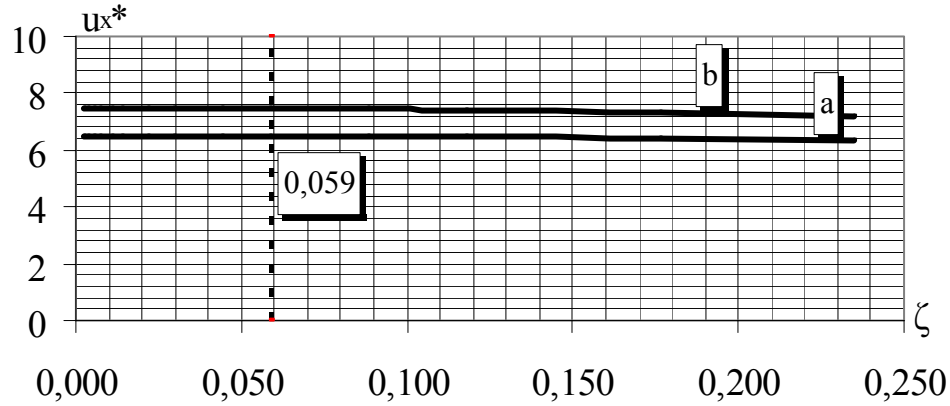
Optimalaus BE dydžio nustatymui buvo atlikti ir išanalizuoti ritininio kevalo su įduba skaičiavimai. Buvo analizuojama priklausomybė tarp santykinių žiedinių įtempių σ* ir BE dydžio ζ (18 pav.) ir priklausomybė tarp santykinių radialinių poslinkių u* ir BE dydžio ζ (19 pav.) charakteringuose nuokrypio taškuose. Santykinis BE dydis ζ - yra santykis tarp BE dydžio ir nuokrypio spindulio *r*.

Grafikuose (18, 19 pav.) vertikalioje ašyje pažymėti atitinkamai santykiniai žiediniai įtempiai σ* ir radialiniai poslinkiai u* charakteringuose nuokrypio taškuose priklausomai nuo BE dydžio. Horizontalioje ašyje pažymėti santykiniai BE dydžiai ζ. Čia santykiniai žiediniai įtempiai σ* – yra santykis tarp žiedinių įtempių nuokrypio vietoje veikiant vidiniam saugojimo produkto slėgiui ir žiedinių įtempių toje pačioje kevalo vietoje be nuokrypio veikiant tam pačiam slėgiui. Santykiniai poslinkiai u* – tai santykis tarp poslinkių, kurie matuojami statmenai vidurinio talpyklos sienelės kevalo paviršiui nuokrypio vietoje ir kevalo poslinkių toje pačioje vietoje be nuokrypio prie vienodos

apkrovos. Optimalaus BE dydžio nustatymui buvo analizuojami talpyklos sienelės kevalo dalies su pusiau rutuline įduba skaičiavimo rezultatai. Buvo tiriami vidutinio dydžio nuokrypiai, kai santykinis įdubos spindulys didesnis už vienetą, $\beta > 1$. Kadangi esant $\beta = 1$



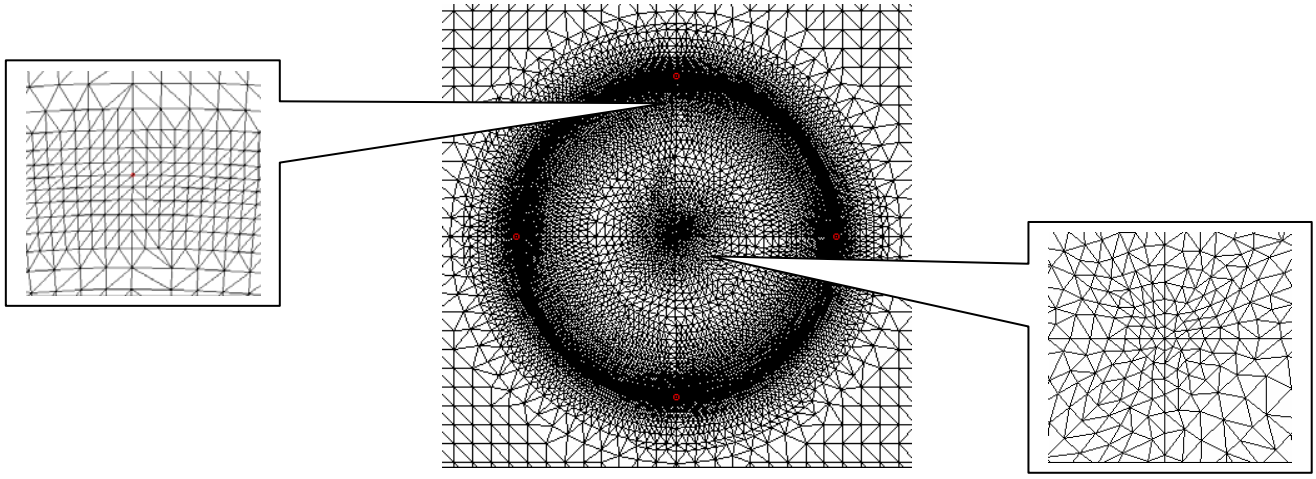
18 pav. Santykinių žiedinių įtempių reikšmių ir santykinių baigtinių elementų dydžių charakteringuose nuokrypio taškuose sąryšis: a − vidurinis įdubos taškas; b − viršutinis įdubos apybraižos taškas



19 pav. Santykinių radialinių poslinkių reikšmių ir santykinių baigtinių elementų dydžių charakteringuose defekto taškuose sąryšis: a − vidurinis įdubos taškas; b − viršutinis įdubos apybraižos taškas

nuokrypio įtemptasis deformuotasis būvis lengvai nuspėjamas, ekstreminės įtempių ir poslinkių reikšmės visada yra charakteringuose įdubos taškuose. Kai santykinis nuokrypio spindulys $\beta > 1$, ekstreminiai taškai su maksimalioms mechaninio būvio reikšmėmis gali būti išdėstyti tarp charakteringųjų įdubos taškų. Taigi analizuojant BE dydžio poveikį skaičiavimo rezultatams, tyrimui turi būti naudojamas kuo didesnės skersmens nuokrypis. Analizuojamos talpyklos sienelės su nuokrypiu pagrindiniai duomenys: įdubos spindulys $r = 851$ mm (santykinis įdubos spindulys $\beta = 3$), įdubos gylis $f = 63$ mm (santykinis

įdubos gylis $\gamma = 9$), dugno lakšto storis $t = 7$ mm, sienelės lakšto storis $t = 7$ mm, talpyklos spindulys $R = 11{,}5$ m. BE dydis buvo keičiamas nuo 200 mm iki 2,0 mm atitinkamai santykinis BE dydis ζ – nuo 0,235 iki 0,002.



20 pav. Talpyklos sienelės nuokrypio vietoje baigtinio tinklelio pavyzdys

Pagal gautus rezultatus matyti, kad konvergencija pasiekiama, kai skaičiavimuose BE dydis neviršija $\zeta = 0{,}059$ (18, 19 pav.). Didesnę reikšmę skaičiavimo rezultatams BE dydis turi įdubos apybraižos srityje. Tinkamiausias BE dydis yra $\zeta = 0{,}059$. Esant tokiam BE dydžiui skaičiavimo rezultatai nuo ankstesniuose žingsniuose gautų skaičiavimo rezultatų skyrėsi 1,7 %.

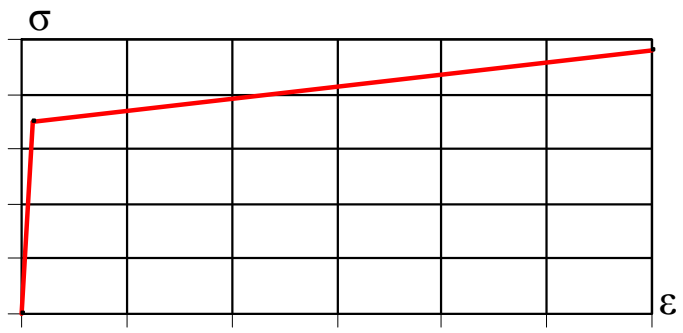
2.4. Skaičiavimo baigtinių elementų metodu rezultatai

2.4.1. Sprendimų apibūdinimas

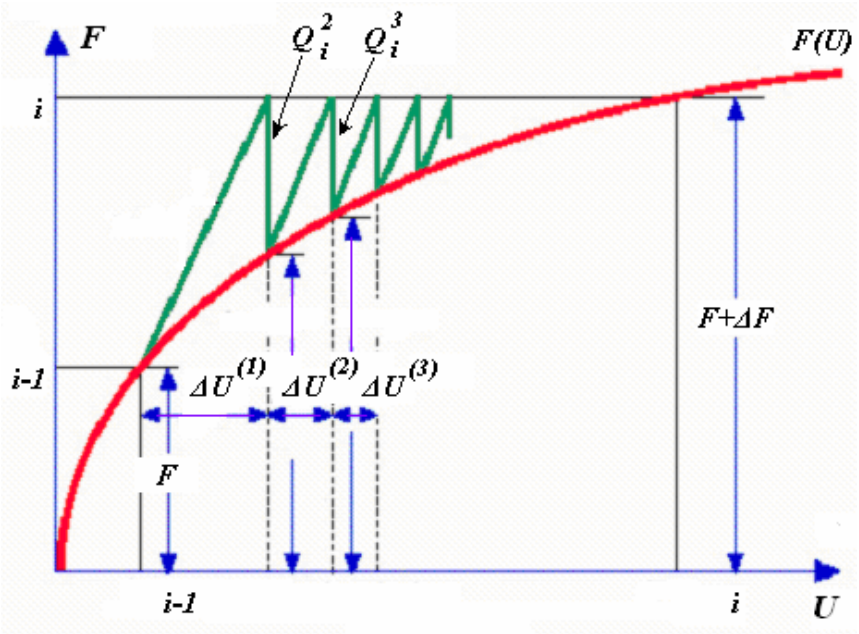
Talpyklos sienelės skaitinio modelio tyrimuose skaičiavimai atlikti įvertinant vietinių nuokrypį (įdubą) su santykiniu spinduliu $\beta \le 5$ ($\beta = 1$, $r = 283$ mm; $\beta = 2$, $r = 567$ mm; $\beta = 3$, $r = 851$ mm; $\beta = 4$, $r = 1418$ mm ir $\beta = 5$, $r = 1418$ mm) [42]. Kai įdubos santykinis spindulys $\beta > 5$, nuokrypis nenagrinėjamas kaip lokalus. Esant kiekvienam nuokrypio spinduliui atlikti penkiolika skaičiavimų BEM keičiant nuokrypio gylį $2 \le \gamma \le 16$ [42, 49]. Be to kiekvienam nuokrypiui atlikti keturi skaičiavimai:

- tiesinis BEM uždavinys;
- geometriškai netiesinis BEM uždavinys;
- fiziškai netiesinis BEM uždavinys;
- fiziškai ir geometriškai netiesinis BEM uždavinys.

Medžiagos fiziniam netiesiškumui įvertinti buvo naudojamas tampriosios, plastiškosios, stiprėjančiosios medžiagos modelis (21 pav.) [39]. Geometriniam ir fziniam netiesiškumui įvertinti buvo taikomas modifikuotas Newton-Raphson jėgų kontrolės metodas [17] (22 pav.). Jėgų kontrolės Newton-Raphson metode daromos iteracijos tam, kad būtų eliminuotos nesubalansuotos jėgos $\{Q_i^j\}$. Šios paklaidos atsiranda ištiesinant uždavinį, t.y. standumų matrica *i* apkrovos prieauglyje nekeičiama visam *j* iteracijų skaičiui. Tarkime, kad *i* apkrovos prieauglyje $(j-1)$



21 pav. Tampriosios plastiškosios stiprėjančiosios medžiagos įtempių deformacijų diagrama



22 pav. Modifikuoto Newton–Raphson jėgų kontrolės metodo schema

iteracijos rezultatai yra žinomi. Tuomet *i* apkrovos prieauglio *j* iteracijai galima užrašyti [6]:

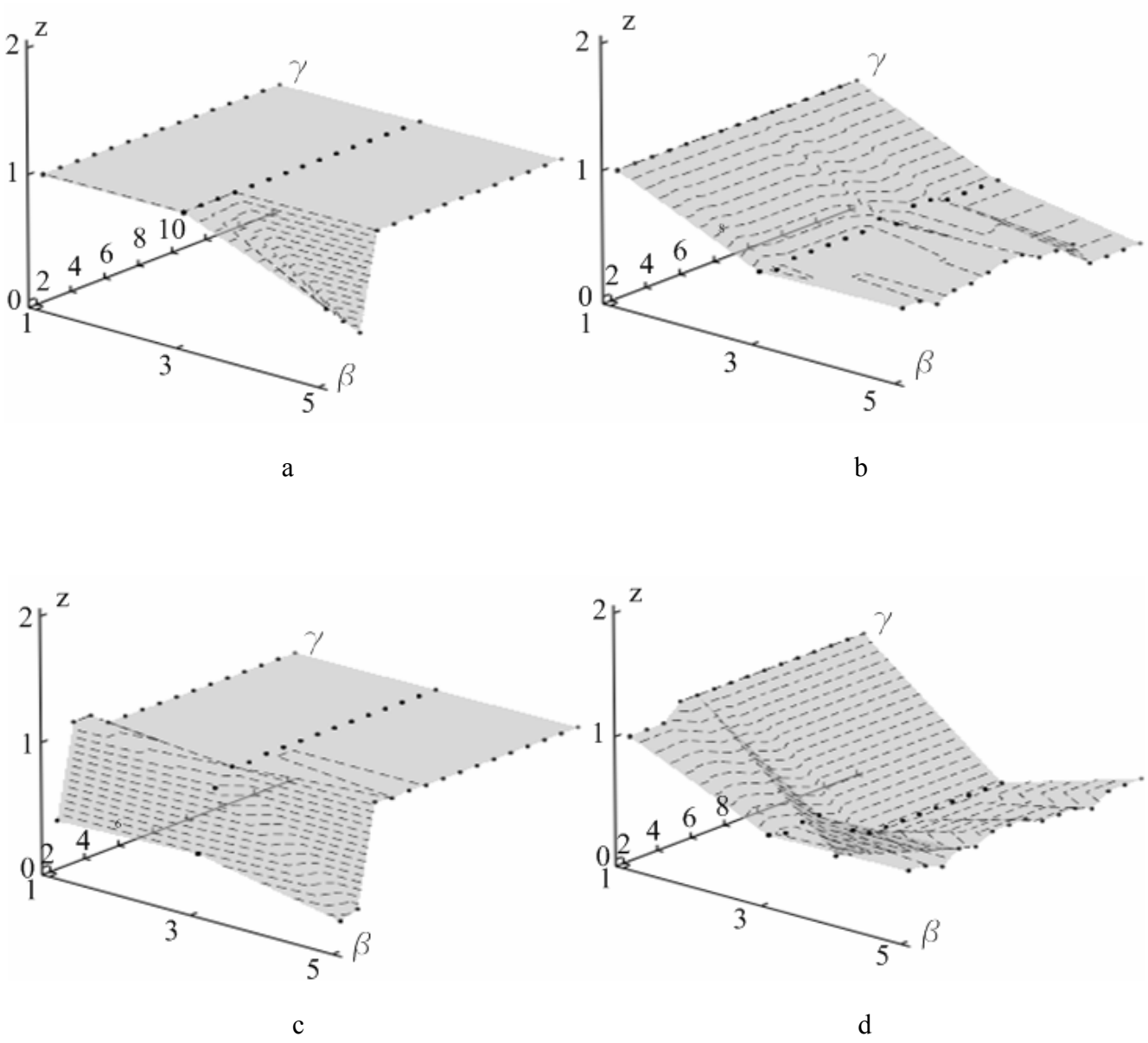
$$\left[K_i^{j-1}\right]\left\{\Delta U_i^j\right\}=\left\{\Delta F_i^j\right\}+\left\{Q_i^j\right\}, \tag{29}$$

čia $\left[K_i^{j-1}\right]$ – *i* apkrovos žingsnio standumų matrica; $\left\{\Delta U_i^j\right\}$ – poslinkių vektoriaus prieauglis *i* apkrovos žingsnio *j* iteracijoje; $\left\{\Delta F_i^j\right\}$ – apkrovos prieauglis *i* apkrovos žingsnio *j* iteracijoje; $\left\{Q_i^j\right\}$ – nesubalansuotų jėgų vektorius *i* apkrovos žingsnio *j* iteracijoje.

Įtempių ir poslinkių reikšmės nustatomos kiekviename skaičiavimo žingsnyje įdubos charakteringuose taškuose „a“, „b“ ir „c“. Galimi atvejai, kai įtempių ir poslinkių maksimalios reikšmės nesutampa su nuokrypio charakteringaisiais taškais [105]. Todėl įtempių ir poslinkių reikšmės buvo fiksuojamos ekstreminiuose taškuose neatsižvelgiant į charakteringuosius taškus.

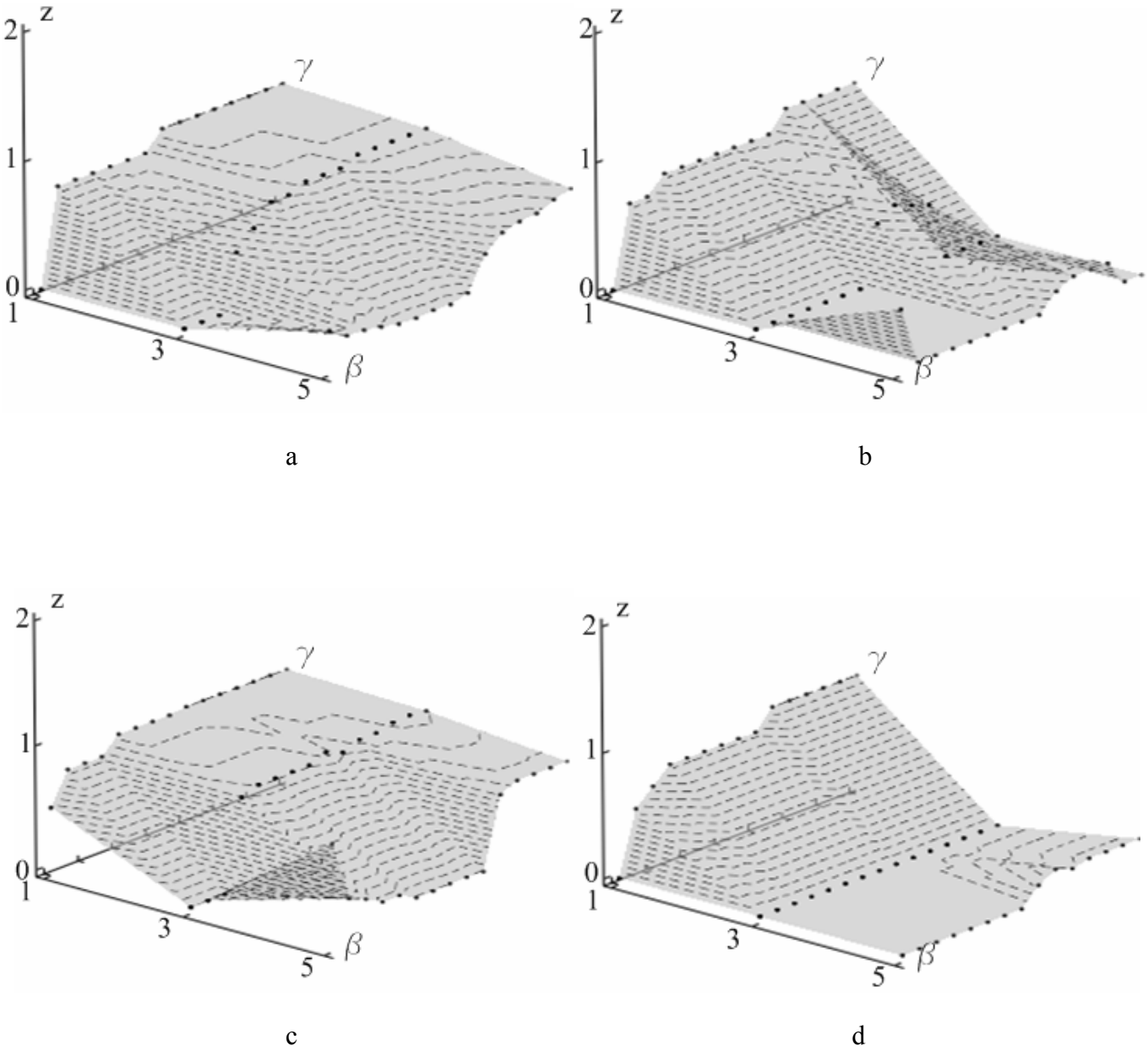
2.4.2. Nuokrypio ekstreminio taško padėties nustatymas

Čia nagrinėjama ekstreminio taško su maksimaliomis įtempių ir poslinkių reikšmėmis padėtis priklausomai nuo nuokrypio spindulio ir gylio dydžių, atitinkamai $1 \le \beta \le 5$, $2 \le \gamma \le 16$, ir atliekamų skaičiavimų: tiesinio skaičiavimo uždavinys, geometrinio netiesiškumo skaičiavimo uždavinys, medžiagos fizinio netiesiškumo skaičiavimo uždavinys, geometrinio ir medžiagos fizinio netiesiškumo skaičiavimo uždavinys. Ekstreminio taško vieta su maksimalioms įtempių ir poslinkių reikšmėmis atitinkamai parodyta grafikuose (23, 24 pav.). Grafikų vertikalioje ašyje atidėtas santykinis atstumas *z* nuo nuokrypio centro iki ekstreminio taško padėties. Santykinis atstumas *z* – tai santykis tarp atstumo nuo nuokrypio centro iki ekstreminio taško ir nuokrypio spindulio.



23 pav. Ekstreminio taško su maksimaliomis įtempių reikšmėmis padėties priklausomybė nuo defekto dydžio ir atliktų skaičiavimų pobūdžio: pagal tiesinių skaičiavimų rezultatus (a); pagal objekto geometrinio netiesiškumo skaičiavimo rezultatus (b); pagal medžiagos fizinio netiesiškumo skaičiavimo rezultatus (c); pagal statinio geometrinio ir medžiagos fizinio netiesiškumo skaičiavimo rezultatus (d)

Tiesinės analizės rezultatuose, kai santykinis įdubos spindulys ir gylis $\beta = 1 \;\; 2 \le \gamma \le 16$, $\beta = 3 \;\; 2 \le \gamma \le 16$ ir $\beta = 5 \;\; 5 \le \gamma \le 16$, įtempių maksimalios reikšmės sutampa su nuokrypio apybraiža (23a pav.), bet, kai $\beta = 5$ ir $2 \le \gamma < 5$, maksimalūs įtempiai sutampa su vidurine įdubos dalim (23a pav.). Įvertinant skaičiavimuose deformacijų geometrinį netiesiškumą



24 pav. Ekstreminio taško su maksimaliomis poslinkių reikšmėmis padėties priklausomybė nuo defekto dydžio ir atliktų skaičiavimų pobūdžio: pagal tiesinių skaičiavimų rezultatus (a); pagal objekto deformacijų geometrinio netiesiškumo skaičiavimo rezultatus (b); pagal medžiagos fizinio netiesiškumo skaičiavimo rezultatus (c); pagal statinio deformacijų geometrinio ir medžiagos fizinio netiesiškumo skaičiavimo rezultatus (d)

(23b pav.) ir geometrinį – fizinį netiesiškumą (23d pav.), kai $\beta = 3 \quad 2 \le \gamma \le 16$, $\beta = 5 \quad 2 \le \gamma \le 16$ (23b pav.), $\beta = 3 \quad 2 \le \gamma \le 16$, $\beta = 5 \quad 2 \le \gamma \le 16$ (23d pav.), maksimalios įtempių reikšmės gautos įdubos vidurinėje dalyje. Bet, kai nuokrypio spindulys $\beta = 1 \quad 3 \le \gamma \le 16$, visuose skaičiavimų atvejuose įtempių ekstreminis taškas sutampa su įdubos apybraiža

(23a, b, c, d pav.). Skaičiavimo rezultatai įvertinantys medžiagos fizinį netiesiškumą (22c pav.) beveik visada sutampa su tiesiniais skaičiavimo rezultatais (23a pav.). Rezultatų skirtumai tarp tiesinio modelio ir modelio įvertinant fizinį netiesiškumą pasireiškia tuomet, kai nuokrypio dydžiai yra lygūs $\beta = 1$ ir $\gamma = 2$, $\beta = 3$ ir $\gamma = 2$. Esant kitiems nuokrypio parametrams maksimalių įtempių reikšmių taškai sutampa su nuokrypio apybraižos taškais.

Toliau analizuojant skaičiavimo rezultatus matome, kad esant vienodiems nuokrypio dydžiams ekstreminiai taškai su maksimalioms įtempių reikšmėmis (23 pav.) nesutampa su poslinkių ekstreminių taškų vietomis (24 pav.). Tai akivaizdu tiesiniuose skaičiavimuose (23a, 24a pav.). Veikiant produkto slėgiui maksimalius poslinkius statmenai talpyklos sienelės paviršiui turi nuokrypio srityje įdubos vidurinės srities taškai, kai $\beta = 3 \quad 2 \le \gamma \le 6$, $\beta = 5 \quad 2 \le \gamma \le 10$ (24a pav.). Mažėjant įdubos spinduliui ir didėjant įdubos gyliui labiau deformuojama nuokrypio apybraiža nei vidurinė nuokrypio sritis, kai $\beta = 1 \quad 3 \le \gamma \le 16$, $\beta = 3 \quad 7 \le \gamma \le 16$, $\beta = 5 \quad 12 \le \gamma \le 16$ (24a pav.). Įvertinant sienutės medžiagos fizinį netiesiškumą poslinkių ekstreminio taško padėtis (24c pav.) pilnai sutampa su poslinkių ekstreminio taško tiesinių skaičiavimų padėtimi (24a pav.). Sienelės deformacijų įvertintas geometrinis netiesiškumas keičia maksimalių poslinkių ekstreminio taško padėtį (23b pav.). Kai $\beta = 3 \quad 2 \le \gamma \le 16$, $\beta = 5 \quad 2 \le \gamma \le 16$, maksimalūs poslinkiai fiksuojami nuokrypio viduriniame taške „a“ ar vidurinėje įdubos dalyje (24b pav.). Mažėjant įdubos spinduliui ir didėjant jos gyliui $5 \le \gamma \le 16$ maksimalūs poslinkiai fiksuojami nuokrypio apybraižoje ar šalia apybraižos (24b pav.).

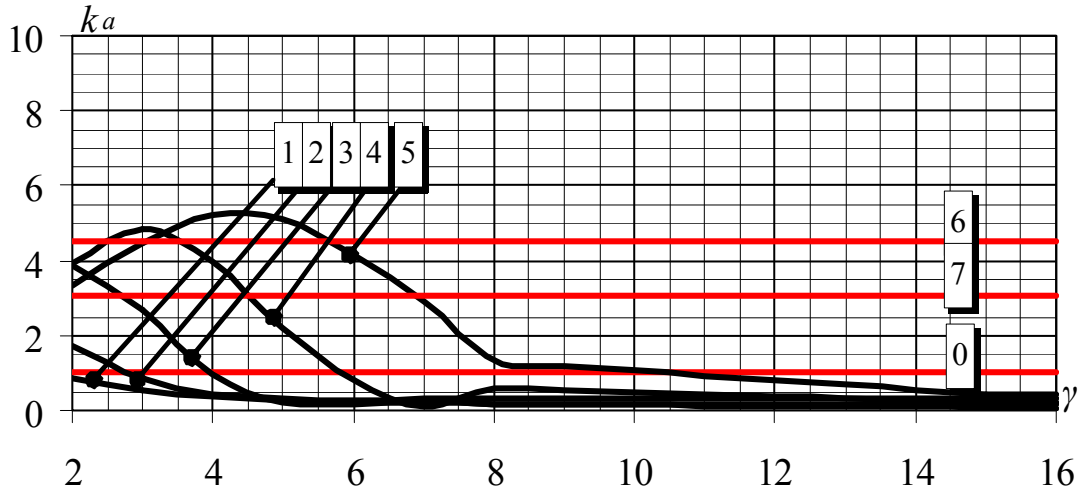
Iš gautų rezultatų galima suformuluoti tokias išvadas: esant nedideliam nuokrypio spinduliui (iki $\beta = 1$) įtempių ir poslinkių ekstreminių taškų padėtis beveik visada sutampa visuose skaičiavimo metoduose ir šis taškas yra nuokrypio apybražoje; didėjant nuokrypio spinduliui ir įvertinant talpyklos sienelės deformacijų geometrinį ir medžiagos fizinį netiesiškumą įtempių ekstreminio taško vieta įprastai yra tarp įdubos charakteringųjų taškų, tuo tarpu poslinkių ekstreminio taško padėtis dažniausiai būna vidurinėje nuokrypio srityje, bet skirtumai tarp ekstreminių taškų reikšmių ir kitų įdubos taškų mažėja.

2.4.3. Tampriai deformuojamo konstrukcijos mechaninio būvio analizė

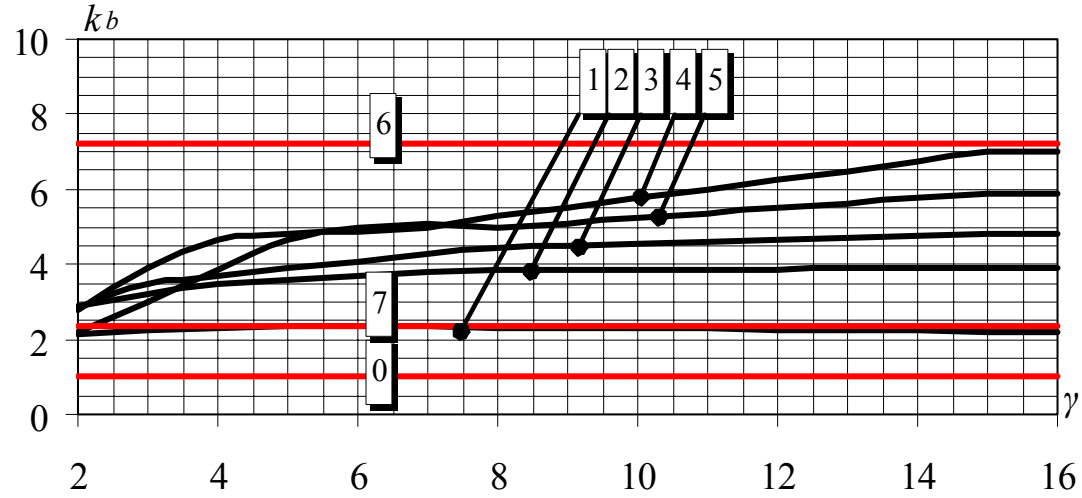
Pirmame skyriuje pateiktos įtempių pasiskirstymo nuokrypio srityje analizės analitinių metodų lygtys (10)–(27). Šiame skyriuje ieškomas įtempių pasiskirstymo nuokrypio srityje uždavinio sprendinys taikant tiesinę BEM analizę. Nagrinėjamos talpyklos geometriniai parametrai *R* ir *t*, o taip pat plieno mechaninės savybės įvertinamos kaip nekintami dydžiai. Atliekant skaičiavimus nustatomi įtempių samplaikos koeficientai trijuose įdubos charakteringuose taškuose ir nagrinėjami trijų pavidalų defektai: rutulinio, kūginio ir nupjautojo kūgio pavidalų (8 pav.). Gauti rezultatai taškuose „a“, „b“ ir „c“ parodė, kad įtempių samplaikos koeficientas keičiasi įdubos centre ir apybraižoje priklausomai nuo jos spindulio ir gylio. Gautos kreivės (25–27 pav.) rodo įtempių samplaikos koeficientų ir nuokrypių santykinių gylių $\gamma = 2,...,16$ ir santykinių spindulių $\beta = 1,...,5$, atitinkamai kreivės „1“–„5“, sąryšį.

Lengviausias idealizacijos požiūriu ir populiariausias įdubos skaičiavimo atvejis yra pusiau rutulinio nuokrypio įtempių ir deformacijų būvio modeliavimas (8a pav.) [59, 76, 108,]. Samplaikos koeficiento reikšmės nagrinėjamos charakteringuose nuokrypio taškuose – „a“, „b“, „c“ (9 pav.). Šiuo atveju didžiausia įtempių samplaikos koeficiento reikšmė gauta apybraižos viršutiniame taške „b“, $k_b = 7{,}0$ kai $\beta = 4$ ir $\gamma = 16$ (25b pav.). Įdubos apybraižos taškuose „b“ ir „c“ įtempių samplaikos koeficiento priklausomybė nuo β ir γ yra skirtinga (25b, c pav.). Šis skirtumas gali būti paaiškintas skirtingais įtemptaisiais deformuotaisiais būviais. Maksimalus skirtumas šiuose taškuose nustatomas, kai santykinis įdubos gylis $\gamma \geq 9$. Tai rodo, kad analitinė lygtis (19) skirta įtempių samplaikos koeficientui skaičiuoti defekto apybraižos taškuose neįvertina tikrojo įtempių būvio ir, kad turima analitinė lygtis gali būti tikslinama baigtinių elementų metodu.

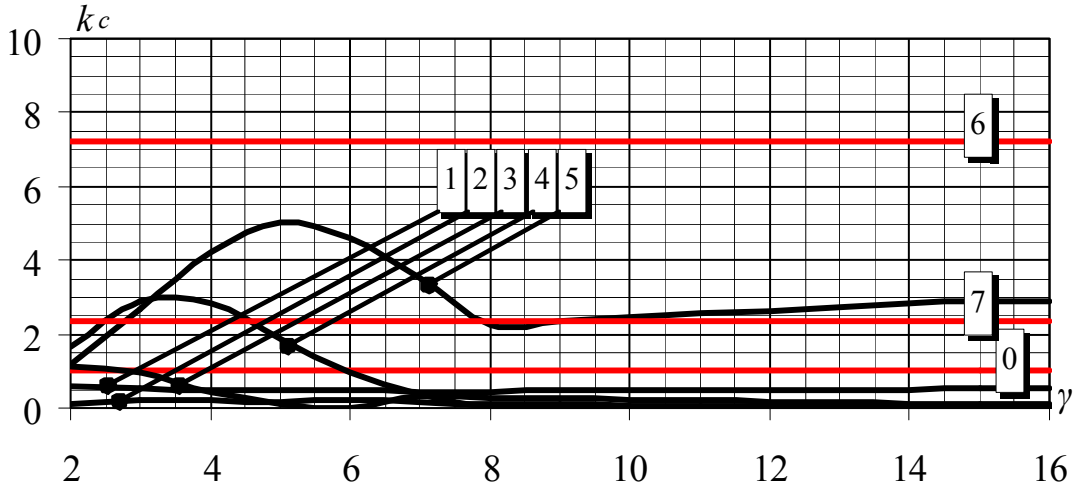
Nuokrypio viduriniame taške didžiausia įtempių samplaikos koeficiento fiksuojama reikšmė yra lygi $k_a = 5{,}2$ kai $\beta = 5$ ir $\gamma = 4$ (25a pav.), o apybraižos šoniniame taške $k_c = 5{,}1$ kai $\beta = 5$ ir $\gamma = 5$ (25c pav.). Reikia pažymėti, kad nuokrypio trijų charakteringųjų taškų kreivės su ekstreminėmis reikšmėmis susikerta kai $\beta = 5$ ir $\gamma = 5$. Nuokrypio



a



b



c

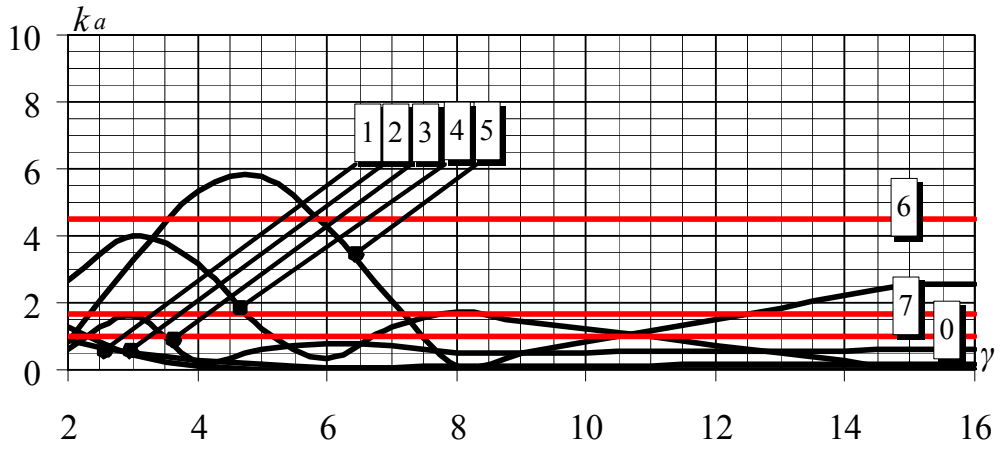
25 pav. Pusiau rutulinio pavidalo nuokrypio charakteringųjų taškų įtempių samplaikos koeficiento ir gylio γ ir spindulio β sąryšis: viduriniame taške (a); viršutiniame taške (b); šoniniame taške (c)

spindulio poveikis samplaikos koeficientui yra reikšmingas. Skaičiavimo rezultatų palyginimas su „0“ tiese, kai įtempiai nuokrypio charakteringuose taškuose lygūs nominaliniams ($k=1$) (25, 26, 27 pav.).

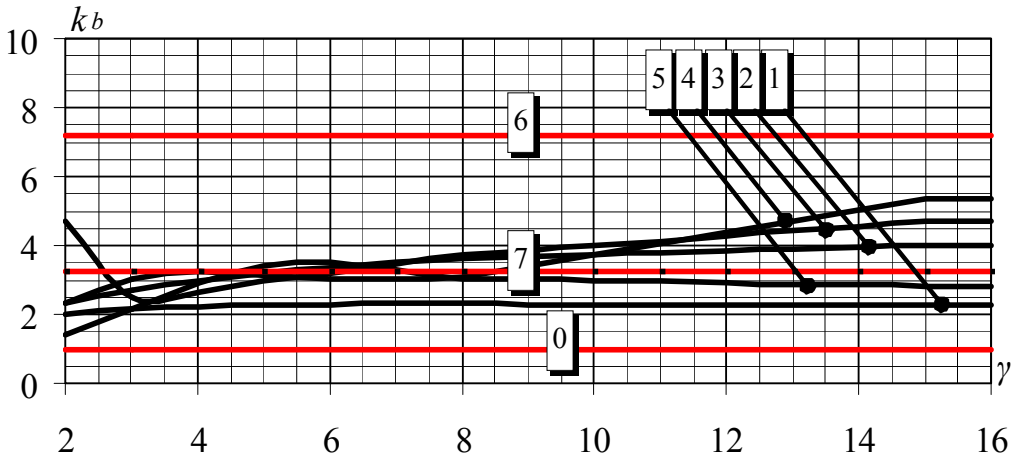
Skaičiavimo rezultatai gauti pagal kūginį nuokrypio modelį (26 pav.) rodo, kad įtempių samplaikos koeficiento priklausomybė nuo įdubos dydžių (β ir γ) panaši į pusiau ritininio nuokrypio rezultatus. Maksimalūs įtempių samplaikos koeficientai lygūs: $k_a=5{,}8$, kai $\beta=5$ ir $\gamma=5$; $k_b=5{,}3$, kai $\beta=4$ ir $\gamma=16$; $k_c=4{,}1$, kai $\beta=5$ ir $\gamma=4$. Skirtumai tarp samplaikos koeficientų reikšmių $k_a(\beta,\gamma)$ ir $k_c(\beta,\gamma)$ priklausomai nuo nuokrypio dydžių padidėjo ir šie skirtumai pastebėti ne nuokrypio suaštrėjimo srityje. Lyginant kūginio pavidalo ir pusiau ritininio pavidalo nuokrypių skaičiavimo rezultatus matyti, kad pirmas pavojingesnis kontūre, o antras – nuokrypio viduriniame taške. Tai galėtų paaiškinti išorinių apybraižų skirtingi pavidalai.

Analizuojant nupjautojo kūgio pavidalo nuokrypio skaičiavimo rezultatus (27 pav.) gautos tokios įtempių samplaikos koeficientų ekstreminės reikšmės: $k_a=5{,}1$, kai $\beta=5$ ir $\gamma=2$; $k_b=8{,}0$, kai $\beta=5$ ir $\gamma=6$; $k_c=1{,}7$, kai $\beta=5$ ir $\gamma=4$. Šiame defekte koeficiento k priklausomybė nuo įdubos gylio γ ($k(\gamma)$) nepriklauso. Be to įtempių samplaikos koeficiento dydis taške „c“ sumažėja. Praktikoje tokio pavidalo nuokrypio įtempių samplaikos koeficientą geriausia nustatyti tuomet, kai galima nustatyti nuokrypio dydį, bet nėra modeliavimo galimybės.

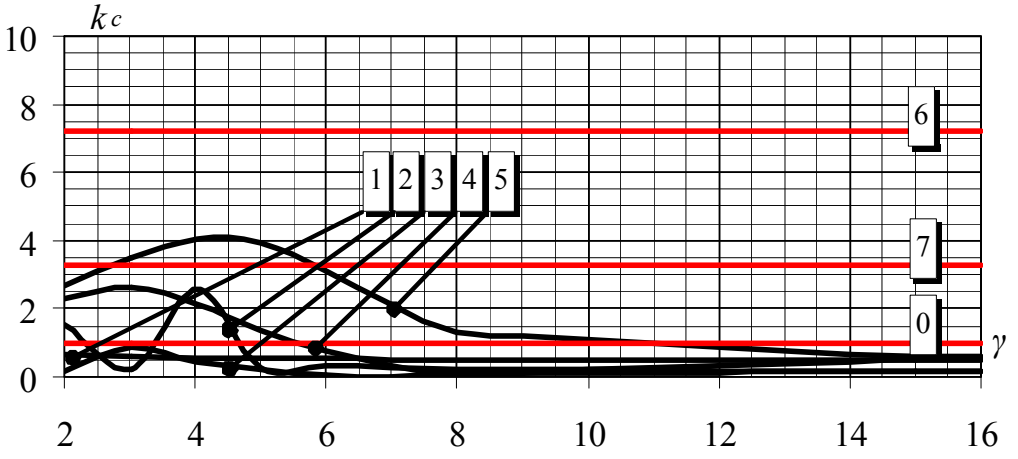
Lyginant gautas įtempių samplaikos koeficientų kreives 1-5 (25–27 pav.) su leistinomis, nustatytomis pagal formules (18) ir (19), tiesėje 6 akivaizdžiai matome, kad įdubos viduriniame taške „a“ ir šoniniame taške „c“ įtempių samplaikos koeficientai žymiai viršija leistinas reikšmes prie įvairių įdubos pavidalų. Pusiau ritininio nuokrypio atveju viršijimas fiksuojamas, kai $\beta\geq 4$ ir $2<\gamma<6$, nupjautojo kūgio pavidalo atveju – $\beta=5$ ir $2\leq\gamma<3$, kūginio pavidalo atveju – $\beta=5$ ir $3<\gamma<6$. Tuo tarpu viršutiniame taške fiksuojamas leistinų įtempių samplaikos koeficientų nežymus viršijimas. Nupjautojo kūgio atveju viršijimas fiksuojamas, kai $\beta\geq 4$ ir $\gamma\geq 3$, kūgio pavidalo atveju ir pusiau rutulinio pavidalo atveju viršijimo nėra.



a



b



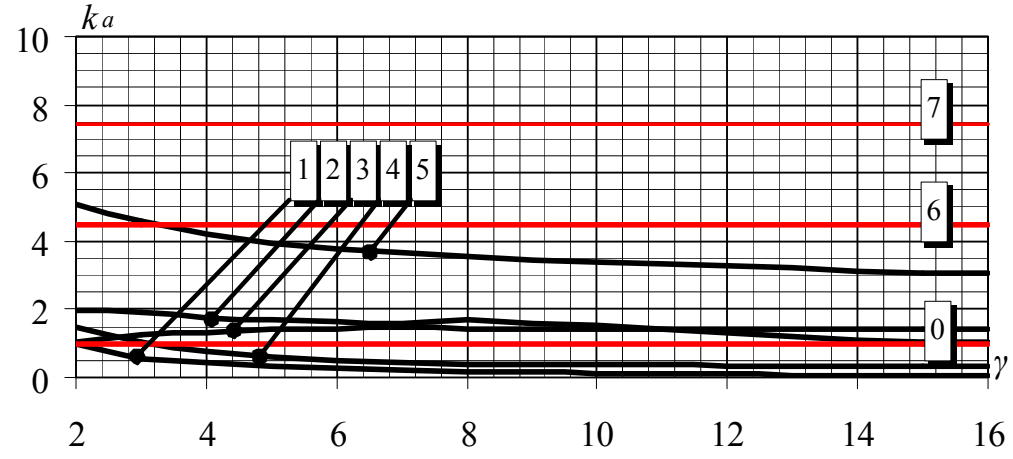
c

26 pav. Kūginio pavidalo nuokrypio charakteringųjų taškų įtempių samplaikos koeficiento ir gylio γ ir spindulio β sąryšis: viduriniame taške (a); viršutiniame taške (b); šoniniame taške (c)

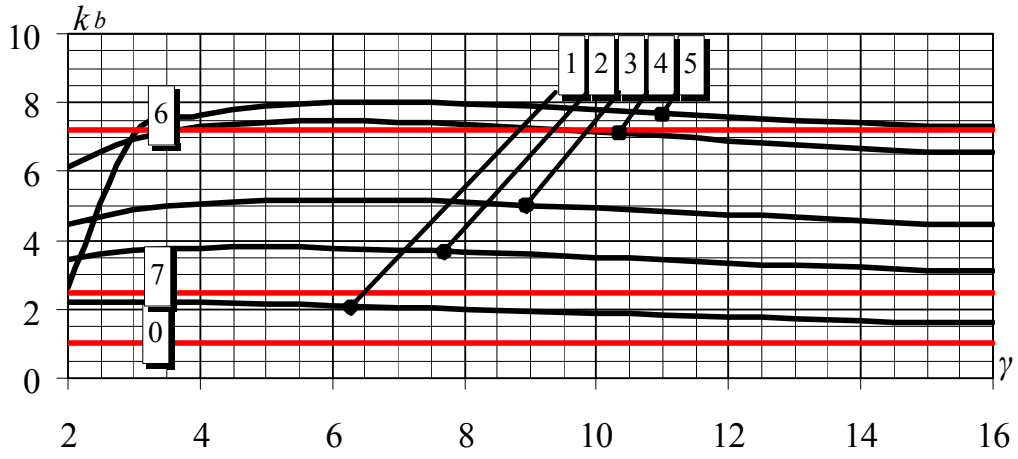
Toliau lyginant nustatytus įtempių samplaikos koeficientus su leistinais skaičiuotais BEM (7 tiesė) matyti, kad leistini koncentracijos koeficientai viršijami beveik kiekvienu atveju. Viduriniame „a“ taške įdubos pusiau ritininio ir kūginio pavidalo atveju įtempių samplaikos koefcientai viršija leistinus, kai $\beta \geq 3$ ir $2 \leq \gamma \leq 7$. Įdubos nupjautojo kūginio pavidalo atveju nėra leistinų įtempių samplaikos koeficientų viršijimo. Viršutiniame „b“ taške visų įdubų atvejais leistini įtempių samplaikos koeficientai viršijami. Kai rutulinio pavidalo nuokrypis viršijimas nustatytas, kai $\beta \geq 2$ ir $\gamma \geq 3$, įdubos kūgio pavidalo atveju – $\beta \geq 3$ ir $\gamma \geq 5$, įdubos nupjautojo kūgio atveju – $\beta \geq 2$ ir $\gamma \geq 2$. Šoniniame „c“ taške įdubos pusiau rutulinio pavidalo atveju leistini įtempių samplaikos koeficientai viršijami, kai $\beta \geq 4$ ir $3 \leq \gamma \leq 8$, įdubos kūgio pavidalo atveju – $\beta \geq 5$ ir $3 \leq \gamma \leq 6$, įdubos nupjautojo kūgio atveju nėra leistinų dydžių viršijimo.

Apibendrindami tiesinių skaičiavimų rezultatus galime teigti, kad esant nedideliam nuokrypio spinduliui samplaikos koeficientai viduriniame taške yra mažesni arba lygūs vienetui ($k_a \leq 1$). Tai reiškia, kad esant nedideliems nuokrypio dydžiams mechaninis būvis šiame taške yra nepavojingas. Taip pat reikia pabrėžti, kad didinant įdubos santykinį spindulį β įtempių samplaikos koeficiento reikšmė visuose atvejuose auga. Be to gautų rezultatų analizė parodė, kad įtempių samplaikos koeficiento reikšmės apybraižoje didesnės nei centre, kai $\gamma > 5$ ir $\gamma < 5$. Kai $\gamma = 5$, įtempių samplaikos koeficientas vienodai pavojingas įdubos viduryje ir apybraižoje. Įdomu, kad viršutiniame taške, kai $\beta = 4$ ir $\gamma \geq 8$ įtempių samplaikos koeficiento reikšmė didesnė nei esant $\beta = 5$. Bet, kai įdubos gylis $\gamma \leq 8$, pavojingesnis atvejis, kai $\beta = 5$. Didžiausias įtempių samplaikos koeficientas $k_b = 8$, kai įdubos yra nupjautojo kūgio pavidalo.

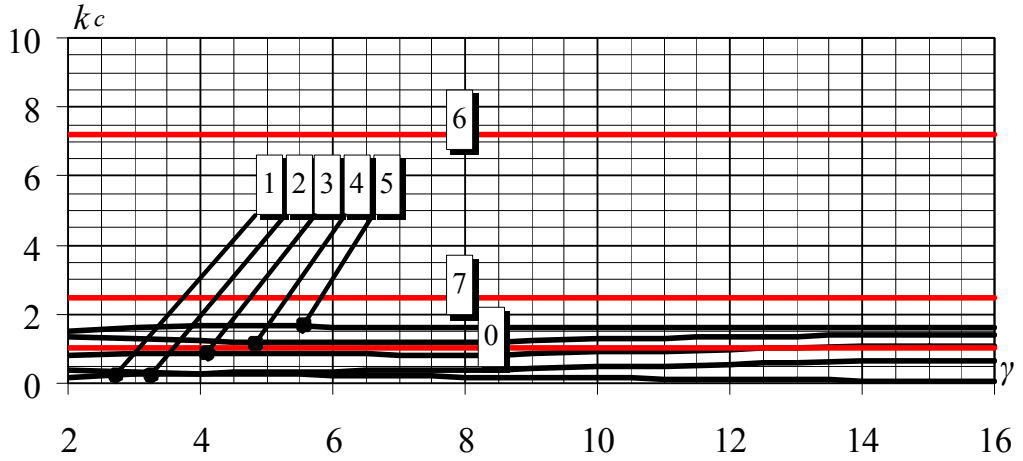
Lyginamieji skaičiavimai programa ANSYS [63] patvirtino gautus rezultatus. Taip pat jie parodė, kad savasis svoris ir kiti faktoriai modeliuojant įtakos neturi. Didžiausi skirtumai nustatyti su COSMOS/M programos rezultatais, kurie nesiekė 2 %. Tai nėra reikšminga inžineriniuose skaičiavimuose.



a



b

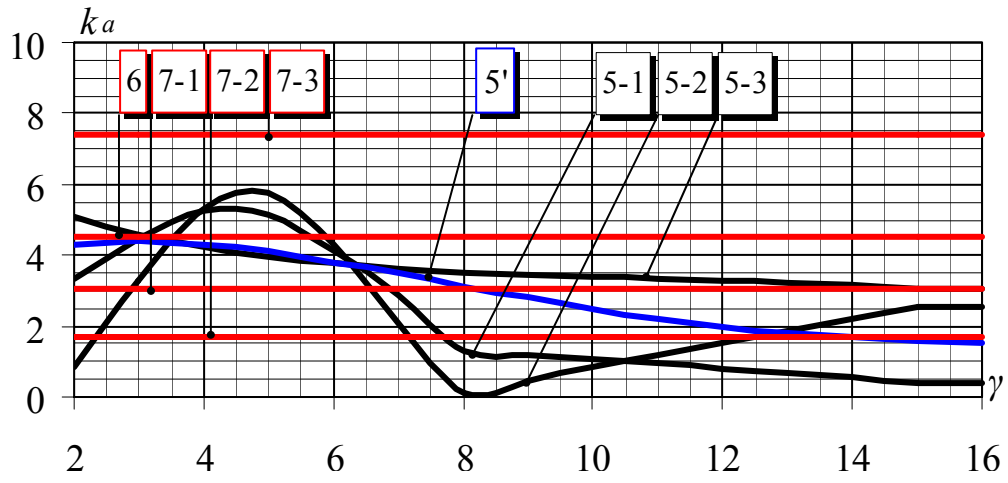


c

27 pav. Nupjautinio kūginio pavidalo nuokrypio charakteringųjų taškų įtempių samplaikos koeficiento ir gylio γ ir spindulio β sąryšis: viduriniame taške (a); viršutiniame taške (b); šoniniame taške (c)

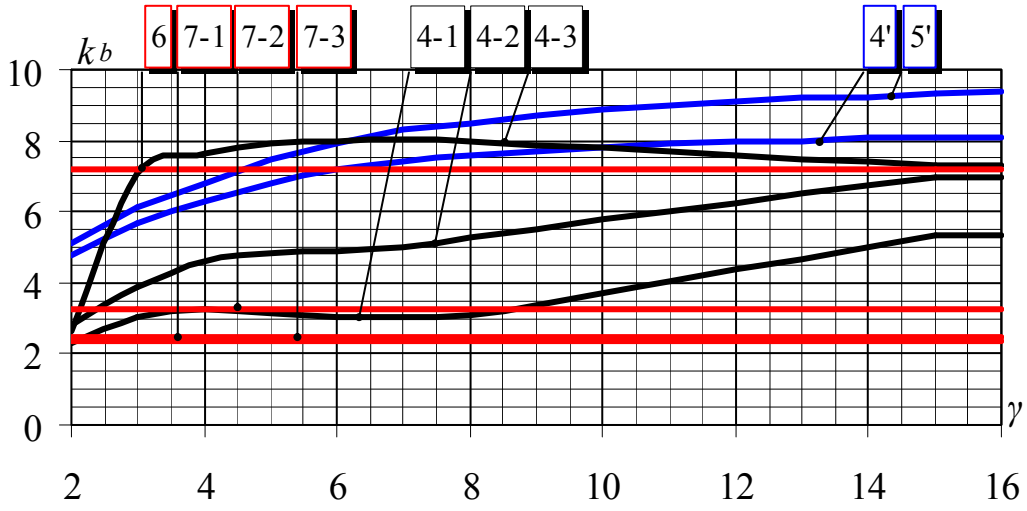
2.4.4. Tiesinių skaičiavimų rezultatų palyginimas

Lyginant analitinius (pirmo skyriaus) ir tiesinių skaičiavimų skaitinius rezultatus matyti, kad analitinių lygčių tendencija skiriasi nuo skaitiniais metodais gautų priklausomybių. Analizuojamas statinys, jo mechaninis būvis ir naudojimo istorija yra pakankamai sudėtingi. Dabartiniai pasiūlyti analitiniai matematiniai modeliai neįvertina daugelio galimų veiksnių derinių. Atskiruose skaičiavimo BEM atvejuose gauta įtempių samplaika yra didesnė arba mažesnė nei pagal analitines formules. Tai vaizdžiai iliustruoja samplaikos koeficiento tyrimai pusiau rutulinio ir kūginio pavidalo nuokrypio viduriniame taške. Kūginio ir pusiau rutulinio pavidalo atvejais įtempių samplaika k_a didesnė intervale $\beta = 5$, $\gamma = 4,...,6$, nupjautojo kūgio pavidalo atveju samplaika didesnė intervale $\beta = 5$, $\gamma \geq 6$ nei gauta pagal analitinę formulę (18) (28 pav.).



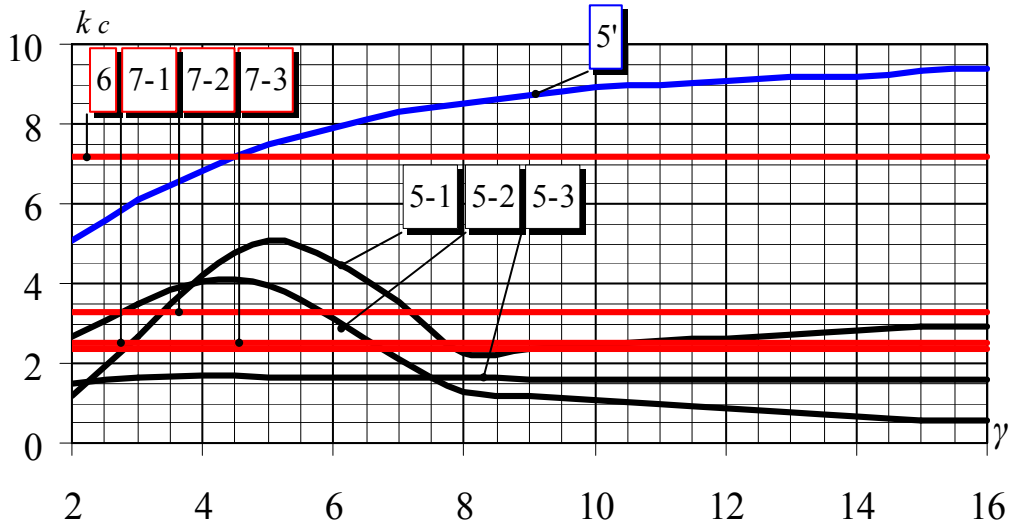
28 pav. Įtempių samplaikos koeficiento ir įdubos vidurinio taško gylio γ sąryšis, kai β = 5: 5–1, 5–2, 5–3 – pusiau rutulinė, kūginė, nupjautojo kūgio įduba (BEM); 5’ – pusiau rutulinė įduba pagal formulę (18); 6 – norminis pagal formulę (18); 7–1, 7–2, 7–3 – norminis (BEM) čia: 7–1, 7–2, 7–3 – pusiau rutulinė, kūginė, nupjautojo kūgio įduba

Analitinė lygtis (19) kontūro viršutinio taško įtempių samplaikai skaičiuoti pakankamai tiksliai nustato samplaikos koeficientus. Tačiau ir nupjautinio kūginio nuokrypio atvejyje matyti samplaikos padidėjimas skaičiuojant BEM, kai $\beta = 5$ ir $\gamma = 3,...,6$ (29 pav.).



29 pav. Įtempių samplaikos koeficiento ir įdubos apybraižos viršutinio taško gylio γ sąryšis, kai β = 5: 4–1, 4–2, 4–3 – pusiau rutulinė, kūginė, nupjautojo kūgio įduba (BEM); 4', 5' – pusiau rutulinė įduba pagal formulę (19); 6 – norminis pagal formulę (19); 7–1, 7–2, 7–3 – norminis (BEM) čia: 7–1, 7–2, 7–3 – pusiau rutulinė, kūginė, nupjautojo kūgio įduba

Šoniniam taškui analitinės išraiškos suteikia didelę atsargą (30 pav.). Dėl šios priežasties ties šiuo tašku mechaninis būvis gali būti nenagrinėjamas. Šio taško įtemptasis deformatasis būvis nepavojingas, bet turėti pilną informaciją apie įtempių pasiskirstymą nuokrypio srities visuose taškuose būtų pravartu analitinių lygčių sudarymui.



30 pav. Įtempių samplaikos koeficiento ir įdubos apybraižos šoninio taško gylio γ sąryšis, kai β = 5: 5–1, 5–2, 5–3 – pusiau rutulinė, kūginė, nupjautojo kūgio įduba (BEM); 5' – pusiau rutulinė įduba pagal formulę (19); 6 – norminis pagal formulę (19); 7–1, 7–2, 7–3 – normativinis (BEM) čia: 7–1, 7–2, 7–3 – pusiau rutulinė, kūginė, nupjautojo kūgio įduba

2.5. Tampriai deformuojamos talpyklos sienelės su nuokrypiu įtempių samplaikos koeficientų skaičiavimo rezultatų regresinė analizė

Šiame skyriuje apibendrinsime skaičiavimų, atliktų pagal tiesinį uždavinį, rezultatus. Atlikti didelės apimties tiesiniai BEM skaičiavimai leidžia tikėtis pakankamai tikslių regresinės analizės rezultatų. Tyrimai liudija apie nuokrypio santykinio gylio γ ir spindulio β reikšmių poveikį įtempių samplaikos koeficientui. Todėl regresinei analizei atlikti buvo parinkti γ ir β reikšmės. Tiesinio skaičiavimo rezultatus galima suvesti į duomenų masyvą ir atlikti matematinę regresinę analizę. Pasirinkti pavojingiausio įdubos charakteringojo „b“ taško samplaikos koeficientų duomenys. Matematinės regresijos tikslas – masyvo reikšmėms parinkti analitinės funkcijos nežinomus koeficientus minimizuojant klaidų sumą. Kadangi reikšmių variacija pakankamai skirtinga, priklausomai nuo įdubos formos ir jos dydžių, spindulio ir gylio, todėl verta taikyti polinominę regresiją, kuri reiškia masyvo duomenų aproksimacija *n* laipsnio polinomu:

$$k(\gamma,\beta)=b_1+b_2\gamma+b_3\beta+b_4\gamma\beta+b_5\gamma^2+b_6\gamma^2\beta+b_7\beta^2+b_8\gamma\beta^2+b_9\gamma^2\beta^2\ldots+b_i\gamma^n. \quad (29)$$

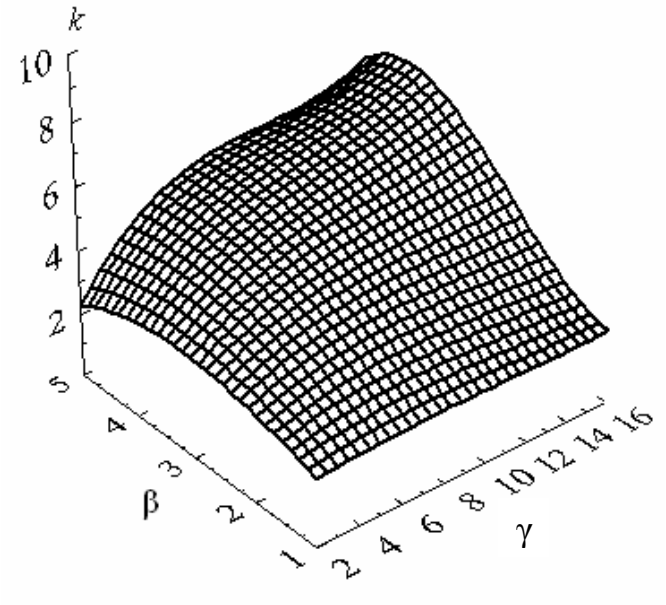
Praktikoje dažniausiai taikomi nedidesni nei penkto laipsnio polinomai ($n \le 5$). Tiesinių skaičiavimų rezultatų regresinei analizei, visiems nuokrypio pavidalams, buvo taikoma trečio laipsnio polinominė funkcija. Šios funkcijos pakankamai tikslios turimų duomenų aprašymui su nedidele sklaida, R = 0,98–0,99.

Trečio laipsnio polinominė lygtis aprašanti pusiau ritininės, kūginės ir nupjautojo kūgio įdubos viršutiniame taške įtempių samplaikos pasiskirstymą priklausomai nuo defekto dydžių užrašoma taip:

$$k(\gamma,\beta)=b_1+b_2\gamma+b_3\beta+b_4\gamma\beta+b_5\gamma^2+b_6\gamma^2\beta+b_7\beta^2+b_8\gamma\beta^2+b_9\gamma^2\beta^2 \quad (30)$$
$$b_{10}\gamma^3+b_{11}\gamma^3\beta+b_{12}\gamma^3\beta^2+b_{13}\beta^3+b_{14}\gamma\beta^3+b_{15}\gamma^2\beta^3+b_{16}\gamma^3\beta^3,$$

čia b_i – empiriniai koeficientai. Kai įduba pusiau ritininio pavidalo, empiriniai koeficientai lygūs: b_1 = 2,322834; b_2 = -0,510997; b_3 = -0,705611; b_4 = 0,868975; b_5 = 0,051702;

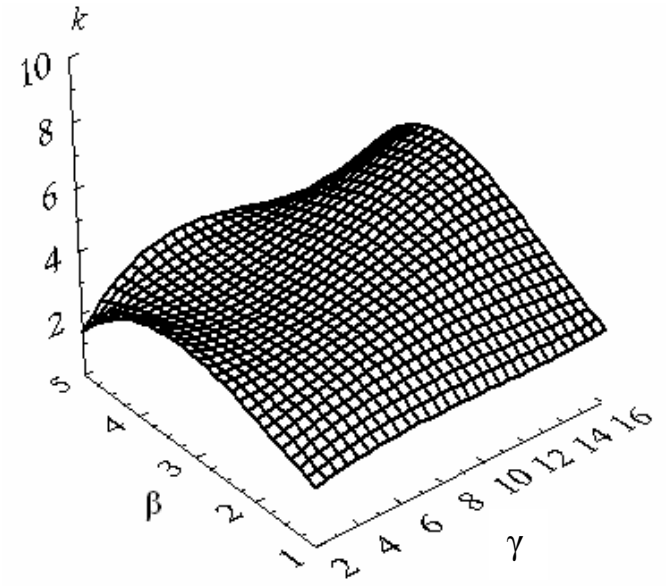
b_6 = -0,093184; b_7 = 0,462208; b_8 = -0,272787; b_9 = 0,033774; b_{10} = -0,001034; b_{11} = 0,002034; b_{12} = -0,000743; b_{13} = -0,084377; b_{14} = 0,035709; b_{15} = -0,004499; b_{16} = 0,000108. Įrašant gautus koeficientus į trisdešimtą formulę (polinomą) galime gauti įtempių samplaikos koeficientą, kai įdubos spindulys $1 \le \beta \le 5$, gylis $2 \le \gamma \le 16$. Trisdešimtos formulės rezultatus, kai nuokrypis pusiau rutulinis, galime pamatyti (31 pav.) grafike.



31 pav. Pusiau rutulinės įdubos viršutinio apybraižos taško įtempių samplaikos koeficiento ir defekto gylio γ ir spindulio β sąryšis

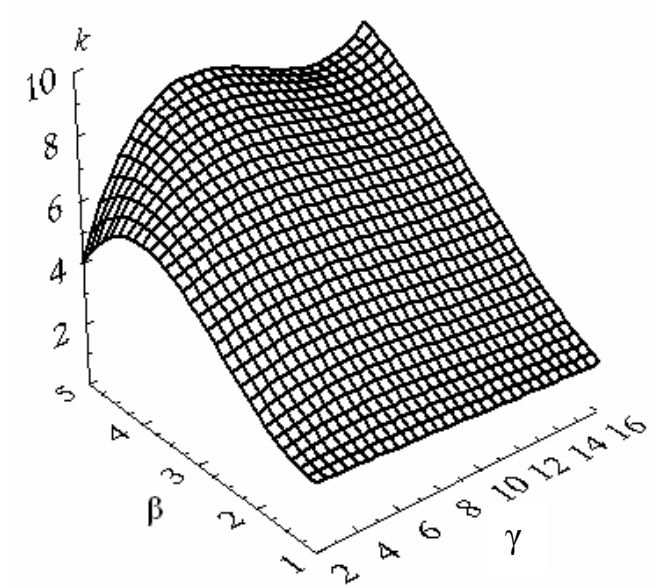
Kai įduba kūginio pavidalo, empiriniai koeficientai lygūs: b_1 = 3,472117; b_2 = -1,13359; b_3 = -4,33157; b_4 = 2,581921; b_5 = 0,087675; b_6 = -0,230896; b_7 = 2,711607; b_8 = -1,34669; b_9 = 0,132841; b_{10} = -0,001334; b_{11} = 0,005183; b_{12} = -0,003414; b_{13} = -0,404171; b_{14} = 0,186761; b_{15} = -0,019270; b_{16} = 0,000526. Trisdešimtos formulės rezultatus, kai nuokrypis kūginis, galime pamatyti grafike (32 pav.).

Kai įduba nupjautojo kūginio pavidalo, empiriniai koeficientai lygūs: b_1 = 7,107451; b_2 = -1,71711; b_3 = -8,37417; b_4 = 2,651787; b_5 = 0,168859; b_6 = -0,269467; b_7 = 4,201326; b_8 = -1,11358; b_9 = 0,113259; b_{10} = -0,005268; b_{11} = 0,008450; b_{12} = -0,003572; b_{13} = -0,571097; b_{14} = 0,155881; b_{15} = -0,015885; b_{16} = 0,000503.



32 pav. Kūginės įdubos viršutinio apybraižos taško įtempių samplaikos koeficiento ir defekto gylio γ ir spindulio β sąryšis

Trisdešimtos formulės rezultatus, kai nuokrypis nupjautasis kūginis, galime pamatyti grafike (33 pav.).



33 pav. Nupjautosios kūginės įdubos viršutinio apybraižos taško įtempių samplaikos koeficiento ir defekto gylio γ ir spindulio β sąryšis

Praktiniuose skaičiavimuose naudoti pateiktą trečio laipsnio polinomą įtempių samplaikos koeficientus skaičiuoti nuokrypių apybraižos viršutinimame taške yra nepatogu, todėl šios funkcijos reikšmės esant skirtingoms nuokrypių pavidalams ir dydžiams patogiau suvesti į lentelę (8 lentelė). Čia (8 lentelė) pajuodintu šriftu pažymėti

8 lentelė. Įtempių samplaikos koeficiento k_b reikšmė priklausomai nuo nuokrypio pavidalo ir matmenų

Defekto gylis, γ	**Įtempių samplaikos koeficiento k_b reikšmė priklausomai nuo nuokrypio pavidalo ir spindulio β**														
	Pusiau rutulinis nuokrypis					***Kūginis nuokrypis***					***Nupjautasis kūginis nuokrypis***				
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**
2	2,191	**2,794**	**3,127**	**3,127**	**2,262**	1,914	**2,706**	**3,301**	**3,076**	**1,412**	2,305	**3,188**	**5,043**	**5,955**	**4,011**
3	2,258	3,055	**3,529**	**3,529**	**3,156**	2,072	2,851	**3,143**	**2,928**	**2,188**	2,268	3,373	**5,251**	**6,504**	**5,736**
4	2,307	3,262	**3,865**	**3,865**	**3,858**	2,189	2,995	**3,083**	**2,863**	**2,744**	2,227	3,494	**5,388**	**6,891**	**6,986**
5	2,340	3,420	4,141	**4,141**	**4,394**	2,269	3,135	3,109	**2,874**	**3,111**	2,182	3,560	5,463	**7,136**	**7,824**
6	2,360	3,534	4,365	4,365	**4,786**	2,319	3,269	3,207	2,951	**3,318**	2,133	3,578	5,486	7,262	**8,313**
7	2,368	3,611	4,545	4,545	5,061	2,344	3,393	3,361	3,083	3,395	2,083	3,557	5,464	7,289	8,517
8	2,368	3,655	4,689	4,689	5,241	2,350	3,507	3,560	3,263	3,373	2,030	3,506	5,409	7,239	8,499
9	2,360	3,673	4,804	4,804	5,352	2,342	3,607	3,787	3,480	3,280	1,977	3,432	5,327	7,134	8,323
10	2,348	3,670	4,899	4,899	5,418	2,328	3,690	4,031	3,725	3,148	1,923	3,344	5,230	6,995	8,052
11	2,334	3,651	4,981	4,981	5,463	2,312	3,755	4,277	3,990	3,005	1,869	3,249	5,125	6,843	7,748
12	2,319	3,622	5,057	5,057	5,511	2,300	3,798	4,511	4,263	2,882	1,817	3,157	5,022	6,699	7,476
13	2,306	3,589	5,137	5,137	5,588	2,298	3,818	4,719	4,537	2,808	1,766	3,075	4,929	6,586	7,299
14	2,297	3,557	5,227	5,227	5,716	2,311	3,811	4,887	4,801	2,814	1,717	3,011	4,857	6,524	7,281
15	2,294	3,531	5,335	5,335	5,921	2,346	3,776	5,003	5,047	2,930	1,672	2,974	4,814	6,536	7,483
16	2,300	3,518	5,469	5,469	6,228	2,408	3,709	5,051	5,265	3,184	1,630	2,972	4,809	6,642	7,971

galiojančių standartų leistinų nuokrypių įtempių samplaikos koeficientai.

2.6. Antrojo skyriaus išvados

Pagal atliktą tiesinę analizę galime daryti tokias išvadas:

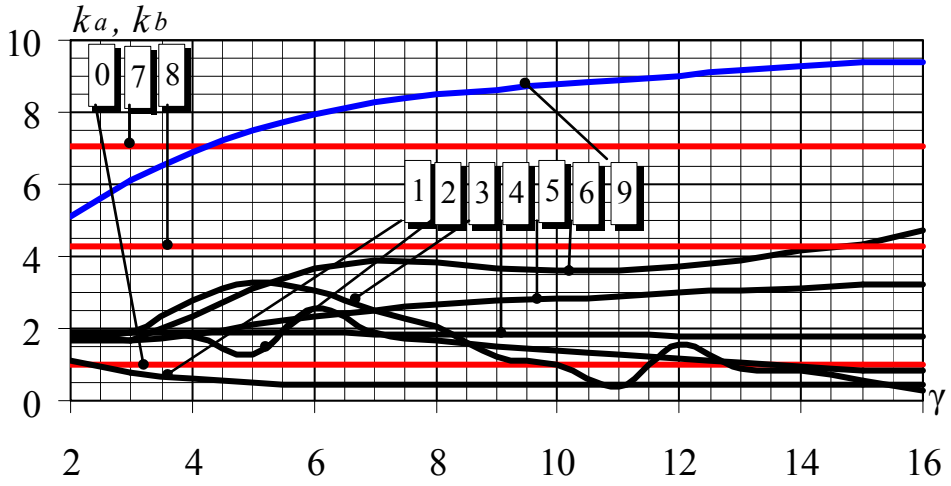
1. Analizuojant įtempių ir poslinkių koncentraciją nuokrypio srityje tinkamiausias BE dydis įdubos samplaikos vietose lygus $\zeta = 0{,}059$.
2. Kai įdubos spindulys $\beta = 1$, įtempių ir poslinkių ekstreminio taško vieta beveik visada sutampa su nuokrypio apybraiža. Analizuojant didesnius įdubos atvejus, kai $\beta = 3$, $\beta = 5$, ekstreminių reikšmių taškai fiksuojami tarp apybraižos ir vidurinės srities taškų. Labiausiai deformuojasi nuokrypio vidurinė sritis, kurioje fiksuojamos maksimalios poslinkių reikšmės. Dėl apybraižos srities didesnio suvaržymo, jo taškuose pasireiškia didesnė samplaika.
3. Gautų rezultatų analizė parodė, kad įtempių samplaikos koeficiento reikšmės apybraižoje didesnės nei centre, kai $\gamma > 5$ ir $\gamma < 5$. Kai $\gamma = 5$, įtempių samplaikos koeficientas vienodai pavojingas įdubos viduryje ir apybraižoje.
4. BEM rezultatai liudija, kad didžiausias įtempių samplaikos koeficientas $k_b = 8$, kai įdubos yra nupjautojo kūgio pavidalo. Įtempių samplaikos koeficientas beveik nekinta, kai keičiasi įdubos didumas, dėl to nesunkiai prognozuojamas.
5. Lyginant skaitinių ir analitinių įtempių samplaikos koeficientų skaičiavimo rezultatus, gauti nedideli skirtumai. Siūlomi sprendiniai tiksliau apibrėžia situaciją nei yra siūloma norminiuose dokumentuose.
6. Analitines lygtis reikėtų patikslinti pasitelkiant BEM rezultatus, tai reiškia, pagerinti situacijos prognozę įdubos srityje. Taip pat formulės gali būti naudojamos kuriant normatyvinę dokumentaciją.

3. Netiesinis talpyklos sienelės su geometriniu nuokrypiu uždavinys

3.1. Tampriai plastiškai deformuojamos konstrukcijos būvio analizė

Analizuojant tiesinio skaičiavimo rezultatus tampa akivaizdu, kad geometrinio nuokrypio (įdubos) vietoje įtempių koncentracija aukšta ir šis nuokrypis turėtų būti pirmose vietose talpyklų irčių statistikoje. Bet analizuotų talpyklų griūčių ekspertų išvadose eksploatuojamų talpyklų su geometriniais nuokrypiais viršijančiais leistinus nurodytus standartuose [17, 88] pavyzdžiai atlikti eksperimentai rodo, kad įdubos yra talpyklos griūties antraeiliai veiksniai. Talpyklų sienelė veikiant produkto slėgio dėl jos labai nedidelio storio ženkliai keičia savo pavidalą, pasislenka, keičiasi sienelės geometrija tame tarpe ir nuokrypio pavidalas bei medžiagos savybės. Todėl atliekant talpyklos skaičiavimą reikia atsižvelgti į talpyklų sienučių medžiagos faktinį fizinį modelį. Kitas įdubų tyrimų etapas BEM būtų skaičiavimai įvertinantys talpyklos medžiagos fizinį netiesiškumą, plastines ir tampriai plastines deformacijas. Šiame tyrime įtempių ir deformacijų priklausomybė įvertinta dvitiesine diagrama (21 pav.). Talpyklos sienelės medžiaga deformuojasi tampriai iki charakteringojo „$\sigma - \varepsilon$" diagramos taško, kai normaliniai įtempiai lygūs $\sigma = 345\ \text{MPa}$, santykinės deformacijos lygios $\varepsilon = 1{,}6 \cdot 10^{-3}$. Esant tolimesniam apkrovimui sienutės plienas deformuojasi kaip tamprioji plastiškoji stiprėjančioji medžiaga, $\sigma = 480\ \text{MPa}$, $\varepsilon = 0{,}21$.

Gautas BEM įtempių samplaikos koeficiento pasiskirstymas įvertinant modelio fizinį netiesiškumą priklausomai nuo nuokrypio gylio ir spindulio, kai $\beta = 1$ $\beta = 3$ $\beta = 5$ parodo, kad maksimali samplaikos reikšmė viršutiniame apybraižos taške „b" (analogiškai tiesinio skaičiavimo rezultatams), $k_b = 4{,}7$, kai $\beta = 5$ ir $\gamma = 16$ (34 pav., atitinkamai spinduliui kreivė 4, 5, 6). Įdubos centrinėje srityje (34 pav., atitinkamai spinduliui kreivė 1, 2, 3) maksimali įtempių samplaikos koeficiento reikšmė mažesnė ir lygi $k_a = 3{,}3$, kai $\beta = 5$ ir $\gamma = 5$.



34 pav. Pusiau ritininės įdubos charakteringųjų taškų įtempių samplaikos koeficiento ir įdubos gylio ir spindulio sąryšis: 1, 2, 3 – centrinis „a“ taškas; 4, 5, 6 – kontūro viršutinis „b“ taškas; 9 – analitinis sprendimas, formulė (19).

Remiantis gautais skaičiavimo rezultatais galime daryti išvadas, kad dėl medžiagų plastinių deformacijų ir įtempių persiskirstymo įtempių samplaika mažėja lyginant su tiesinių skaičiavimų rezultatais. Įvertinant medžiagos plastines savybes mažėja įtempių samplaikos priklausomybė nuo įdubos gylio ir spindulio.

3.2. Talpyklos skaitinis modelis, įvertinantis konstrukcijos sienelės geometrinį netiesiškumą

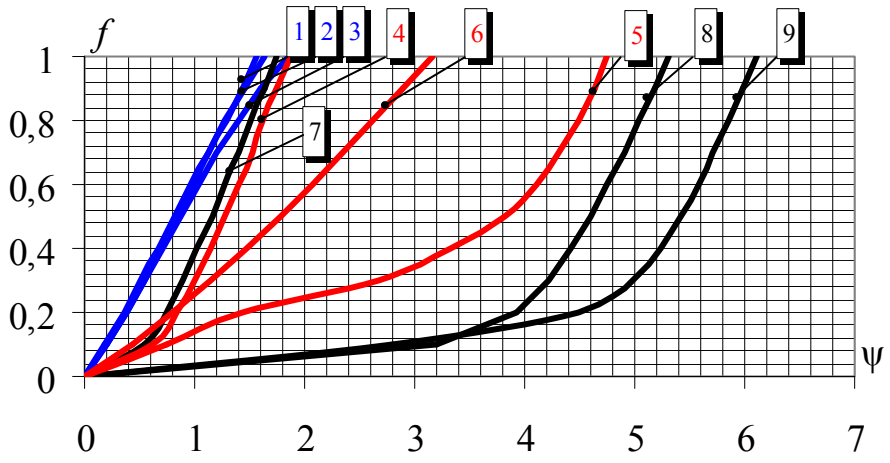
Baigtinių elementų metodo skaičiavimų įvertinančių talpyklos sienelės deformacijų geometrinį netiesiškumą ir jos medžiagos fizinį netiesiškumą rezultatas yra tolygesnis įtempių ir deformacijų pasiskirstymas nuokrypio paviršiuje nei lyginant su tiesinio uždavinio skaičiavimo rezultatais. Sumažėja įtempių ir poslinkių samplaika. Skaičiavimuose įvertinant geometrinį ir atskirai fizinį netiesiškumą samplaikos koeficientai skirtingai priklauso nuo nuokrypio dydžių. Įtempių ir poslinkių samplaikos koeficientai pirmuose ir antruose skaičiavimuose didėja didėjant įdubos spinduliui $1 \le \beta \le 3$ ir gyliui $2 \le \gamma \le 16$. Toliau atliekant skaičiavimą įvertinantis geometrinį netiesiškumą įtempių samplaikos koeficientas mažėja didėjant nuokrypio spinduliui iki $\beta = 5$. Fizinis medžiagos netiesiškumas turi didėjimo poveikį įtempių samplaikos

koeficientui su nedideliu sumažėjimu ar padidėjimu keliuose nuokrypio dydžių skaičiavimų atvejuose. Poslinkių samplaikos koeficientai nuolat didėja didėjant nuokrypio dydžiams visuose skaičiavimuose.

Detaliau tiriant geometrinio netiesiškumo poveikį skaičiavimo rezultatams BEM buvo analizuojami pusiau rutulinio pavidalo vidurinio „a“ nuokrypio taško poslinkiai, kai nuokrypio santykinis spindulys $\beta = 1$ (35 pav., kreivė 1, 2, 3), $\beta = 3$ (35 pav., kreivė 4, 5, 6), $\beta = 5$ (35 pav., kreivė 7, 8, 9) ir santykinis gylis $\gamma = 2, 9, 16$. Esant kiekvienam įdubos spinduliui buvo atlikti trys skaičiavimai, kai įdubos santykinis gylis $\gamma = 2$ (35 pav., kreivė 1, 4, 7), $\gamma = 9$ (35 pav., kreivė 2, 5, 8), $\gamma = 16$ (35 pav., kreivė 3, 6, 9). Pagal atliktus skaičiavimus nustatyta priklausomybė tarp apkrovos koeficiento f ir santykinių poslinkių $\psi = \frac{U_x}{U_{x,nom.}}$ (35 pav.). Apkrovos faktorius f = 1 lygus veikiant pilnai apkrovai. Poslinkiai U_x yra statmeni sienelės paviršiui.

Kai įdubos gylis lygus $\gamma = 2$, o santykiniai spinduliai keičiasi β = 1–5 (β = 1, β = 3, β = 5), atitinkmai maksimalūs poslinkiai keičiasi nuo 15–20 mm (krevės 1, 4, 7), bet kai $\gamma = 16$ maksimalūs poslinkiai lygūs 15–65 mm (kreivės 3, 6, 9).

Iš gautų poslinkių tyrimų rezultatų matyti, kad didesnę poveikį poslinkio dydžio reikšmei turi nuokrypio gylis, o mažesnę poveikį spindulys.



35 pav. Pusiau rutulinio nuokrypio vidurinio taško poslinkių ir apkrovos sąryšis

3.3. Talpyklos sienelės netiesinė analizė įvertinant medžiagos tamriai plastines defomacijas ir konstrukcijos deformacijų geometrinį netiesiškumą

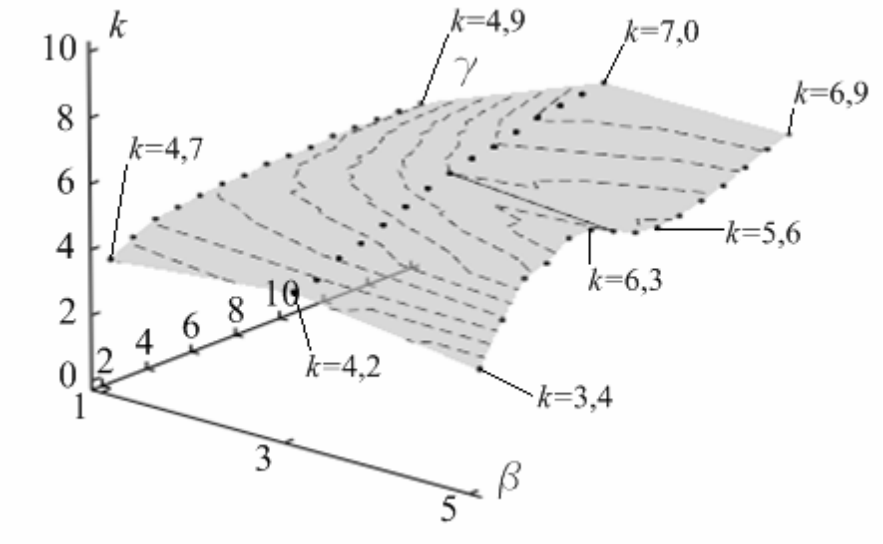
Talpyklų griūčių išvadų, pirmo ir trečio skyriaus skaičiavimų rezultatai rodo, kad atliekant tokių statinių geometrinių nuokrypių tyrimą reikia įvertinti talpyklos sienelės deformacijų netiesiškumą ir medžiagos tampriai plastinį modelį. Šie veiksniai realiame konstrukcijos darbe neatskiriami ir turi būti įvertinami vienu metu.

Įvertinant modelio pilną netiesiškumą, sieneltės deformacijų netiesinę elgseną ir medžiagos tampriai plastinį modelį, įtempių ir poslinkių samplaikos koeficientų reikšmės žymiai mažesnės lyginant su tiesinio modelio skaičiavimo rezultatais (36, 37 pav.). Tai įvyksta dėl nuokrypio „išlyginimo“ ir dėl deformacijų, įtempių persiskirstymo, sąlygoto medžiagos tampriai plastinių savybių (36, 37 pav.).

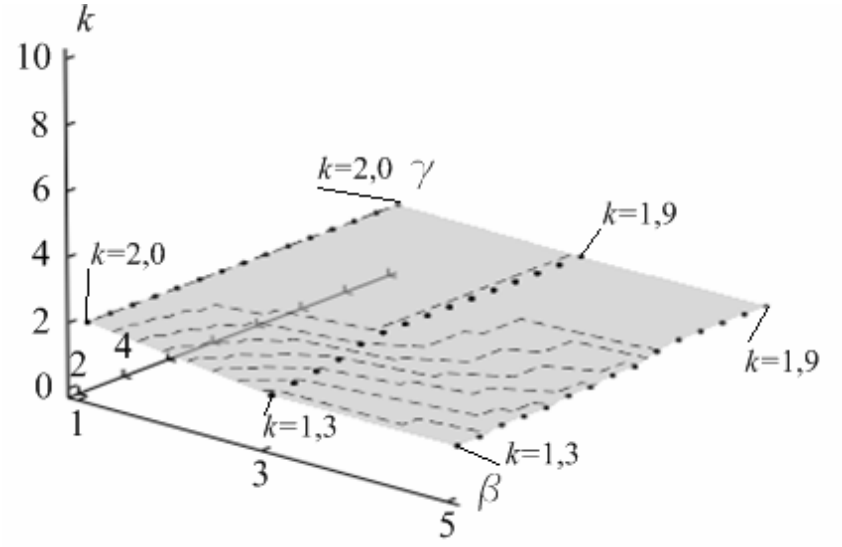
Iš pateiktų įtempių ir poslinkių samplaikos koeficientų diagramų priklausomai nuo nuokrypio gylio ir spindulio matyti, kad atliekant tiesinius skaičiavimus gautos sudėtingos priklausomybės (36a, 37a pav.), ir atliekant skaičiavimus, įvertinančius modelio netiesiškumą, lengvai prognozuojamos priklausomybės (36b, 37b pav.).

Analizuojant tiesinio modelio skaičiavimo rezultatus (36a pav.) matome, kad įdubos spindulys ir gylis yra reikšmingi veiksniai, įtakojantys įtempių samplaikos koeficiento dydį. Didėjant nuokrypio spinduliui ir gyliui atitinkamai didėja įtempių samplaikos koeficientas. Kai spindulys keičiasi $\beta = 1–3$, o gylis $2 \le \gamma \le 16$ įtempių samplaikos koeficientas keičiasi $4{,}2 \le k \le 7{,}0$. Toliau didėjant įdubos spinduliui įtempių samplaikos koeficientas sumažėja ypač esant nedideliems įdubos gyliams.

Pagal netiesinio modelio skaičiavimų rezultatus gauta samplaikos koeficiento priklausomybė (36b pav.) labai skiriasi nuo pagrįstos tiesinių skaičiavimų rezultatais (36a pav.). Įtempių samplaikos koeficientai žymiai sumažėja ir įdubų spindulys ir gylis jau turi kitokią įtaką samplaikai. Esant nedideliems įdubos gyliams didėjantis spindulys mažiau įtakoja įtempių samplaikos koeficientą. Esant įdubos spinduliui $\beta = 1$ įtempių samplaikos koeficientas pastovus $k = 2{,}0$. Didėjant įdubos spinduliui ($\beta = 3$) ir gyliui



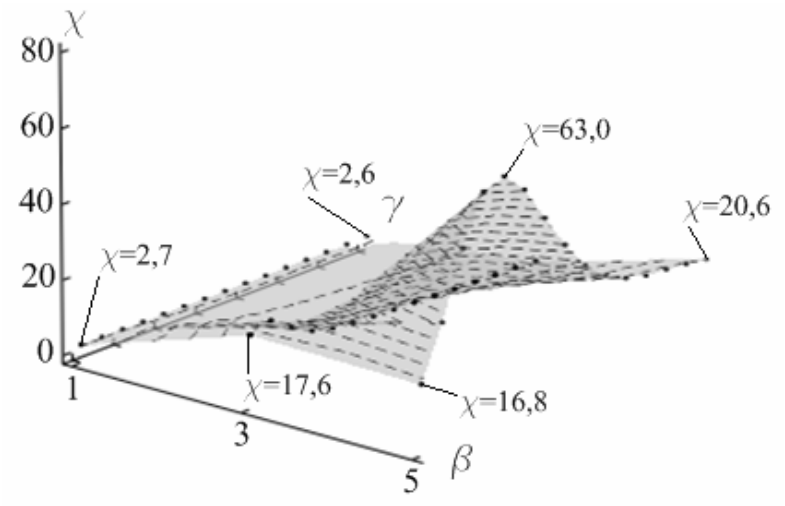
a



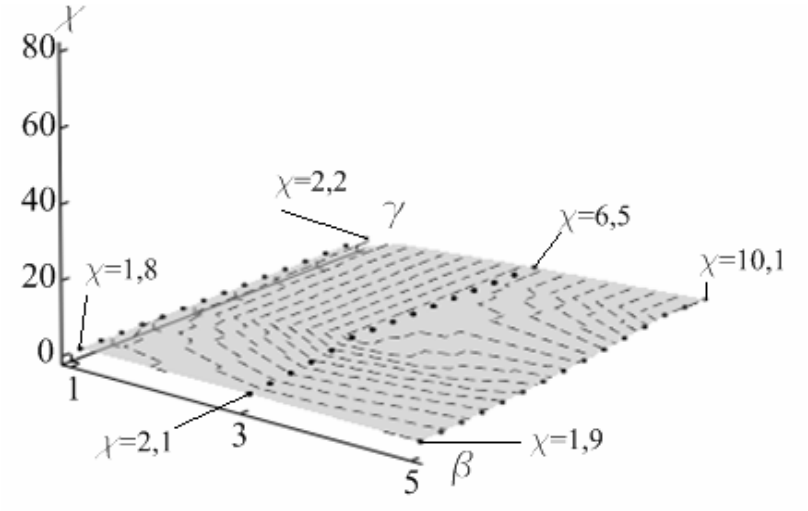
b

36 pav. Įtempių samplaikos koeficijento ir nuokrypio dydžių β, γ sąryšis: tiesinių skaičiavimų rezultatai (a); netiesinio modelio skaičiavimų rezultatai (b)

tarp $2 \le \gamma \le 6$ koeficientas k kinta nuo 1,3 iki 2,0. Toliau didėjant įdubos gyliui samplaikos koeficientas nekinta, $k = 2{,}0$. Įdubos spinduliui didėjant iki $\beta = 5$ ir esant įdubos gyliui tarp $2 \le \gamma \le 11$ samplaikos koeficientas sumažėja, $1{,}3 \le k \le 2{,}0$. Toliau didinant įdubos gyliui samplaikos koeficientas nesikeičia, $k = 2{,}0$. Skirtumas tarp įtempių



a



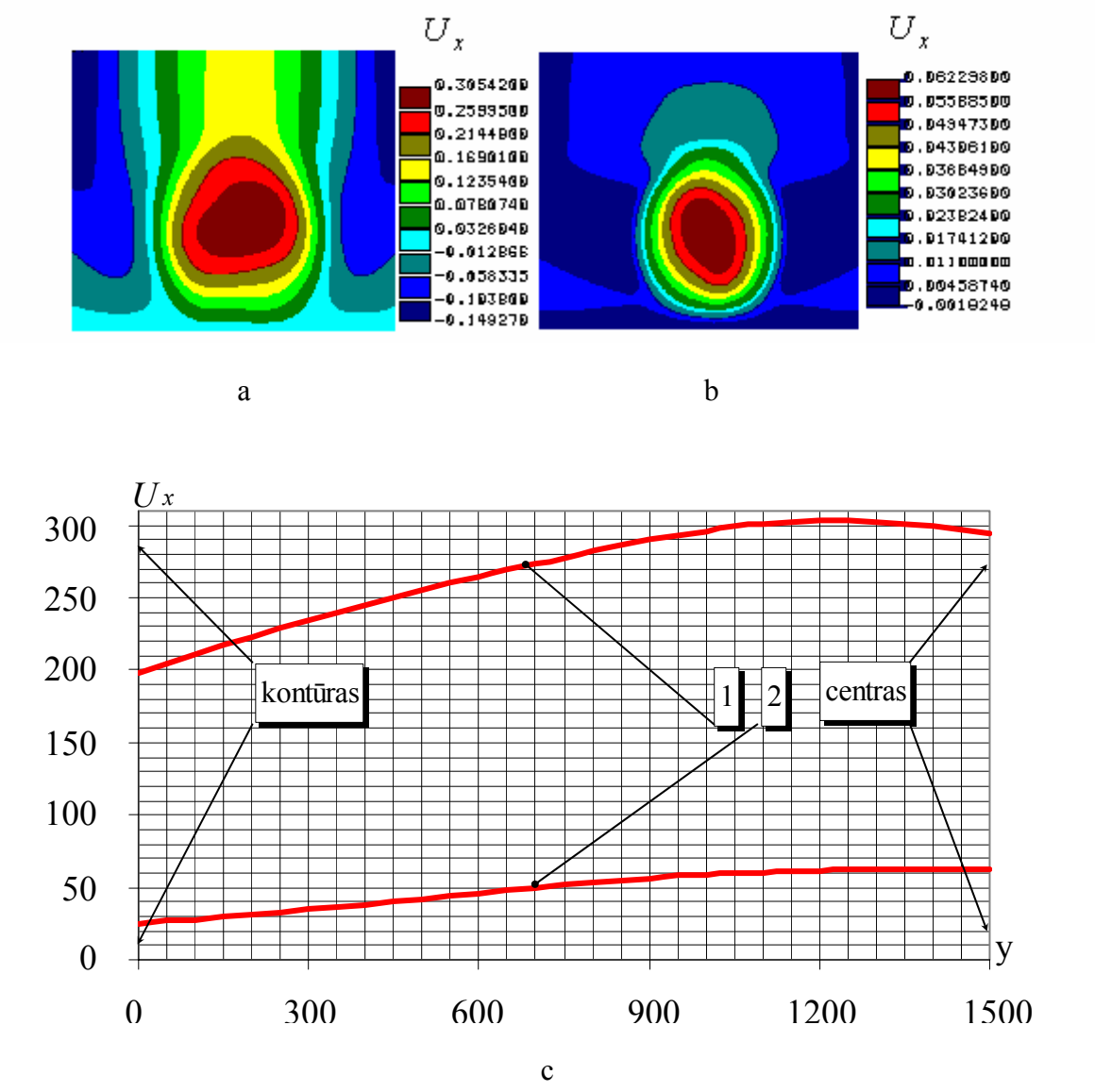
b

37 pav. Poslinkių koncentracijos koeficiento priklausomybė nuo defekto dydžių β, γ ir atliktų skaičiavimų: tiesinių skaičiavimų rezultatai (a); netiesinio modelio skaičiavimų rezultatai (b)

koncentracijos koeficientų reikšmių esant maksimaliai skirtingiems įdubos spinduliams, bet vienodiems įdubos gyliams sudaro apie 35 %, kai defekto gylis nedidelis ir 5 %, kai $12 \le \gamma \le 16$ (36b pav.).

Analizuojant poslinkių samplaikos koeficientų netiesinių skaičiavimų rezultatus matome aiškią priklausomybę tarp samplaikos koeficientų ir įdubos dydžių (37b pav.). Didėjant įdubos spinduliui ir gyliui tolygiai didėja poslinkių samplaikos koeficientas.

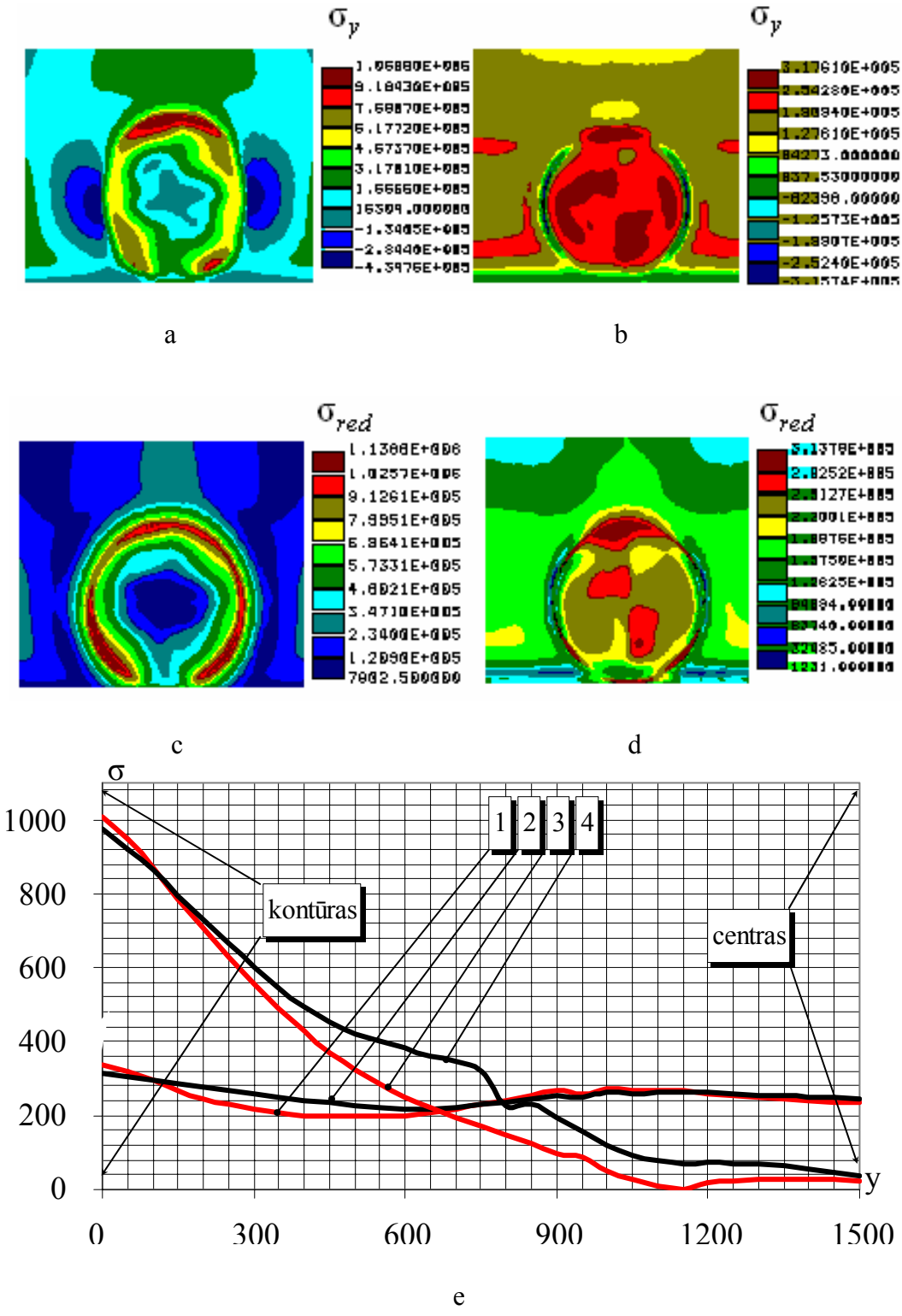
Netiesinio (37b pav.) ir tiesinio (37a pav.) modelio skaičiavimo rezultatai, poslinkių samplaikos koeficiento priklausomybės nuo įdubos dydžių taip pat labai skyrėsi. Tiesinio modelio skaičiavimuose įdubos spindulys ir gylis turi didesnę įtaką samplaikos koeficientų



a b c

38 pav. Poslinkių pasiskirstymas sienutės nuokrypio vietoje kai β = 5, γ = 10: tiesinio skaičiavimo rezultatų diagrama (a); netiesinio modelio skaičiavimo rezultatų diagrama (b); poslinkių U_x pasiskirstymas nuo defekto vidurinio iki viršutinio kontūro taško (c): 1 – tiesinio skaičiavimo rezultatai, 2 – netiesinio skaičiavimo rezultatai

dydžiams nei netiesinio modelio skaičiavimuose. Netiesinio modelio skaičiavimuose maksimalus poslinkių koncentracijos koeficientas $\chi = 10{,}1$, kai $\beta = 5$ $\gamma = 16$ (37b pav.). Skirtumas tarp poslinkių koncentracijos koeficientų reikšmių, kai įdubos gylis pastovus, o



39 pav. Žiedinių įtempių (a, b) ir efektyviųjų įtempių (c, d) pasiskirstymas sienelės nuokrypio vietoje, kai $\beta = 5$, $\gamma = 10$: tiesinio skaičiavimo rezultatų diagramos (a, c); netiesinio skaičiavimo rezultatų diagramos (b, d); žiedinių ir efektyviųjų įtempių pasiskirstymas nuo defekto vidurinio iki viršutinio kontūro taško, kreivė 1 – netiesinio modelio skaičiavimo rezultatai, žiediniai įtempiai, kreivė 2 – netiesinio modelio skaičiavimo rezultatai, efektyvieji įtempiai, kreivė 3 – tiesinio skaičiavimo rezultatai, žiediniai įtempiai, kreivė 4 – tiesinio skaičiavimo rezultatai, efektivieji įtempiai, (e)

spindulys maksimaliai skirtingas siekia 15 % esant $\gamma = 2$ ir 460 % esant $3 \le \gamma \le 16$.

Tiesinių ir netiesinių skaičiavimo rezultatų palyginimui papildomai pateiktos įtempių (39 pav.) ir poslinkių (38 pav.) pasiskirstymo diagramos, kai įdubos spindulys $\beta = 5$, o gylis $\gamma = 10$. Grafikuose (38 pav.) analizuojamas poslinkių statmenai sienelės paviršiui U_x pasiskirstymas sienelės nuokrypio vietoje. Gautas aiškus poslinkių pasiskirstymas. Esktreminiai poslinkių taškai fiksuojami nuokrypio centre. Tolstant nuo centro link nuokrypio apybraižos poslinkiai mažėja (38a, b pav.). Taip pat pagal gautus rezultatus konstatuojamas reikšmingesnis poslinkių sumažėjimas įvertinant sienelės su nuokrypiu deformacijų netiesiškumą (38c, kreivė 2) nei lyginant su tiesinio skaičiavimo rezultatais (38c pav., kreivė 1). Grafike (38c pav.) poslinkiai pateikti nuo nuokrypio centro iki viršutinio apybraižos taško. Kai y = 0 mm, poslinkiai fiksuojami nuokrypio centre ir, kai y = 1500 mm poslinkiai – apybraižos viršutiniame taške.

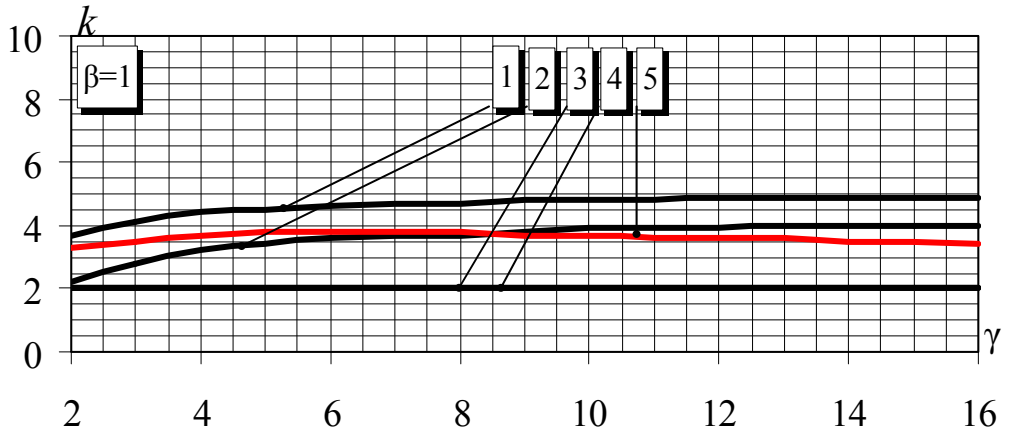
Diagramose (39 pav.) analizuojami žiedinių (39 a, b pav.) ir efektyviųjų (39 c, d pav.) įtempių pasiskirstymai. Pagal tiesinių skaičiavimų diagramas aiškiai matyti (39 a, c pav.), kad centrinė nuokrypio sritis nukrauta ir įtempių ekstreminiai taškai fiksuojami viršutinės dalies apybraižoje. Įvertinant deformacijų ir medžiagos netiesinį modelį žiedinių ir efektyviųjų įtempių pasiskirstymas skyrėsi nuo tiesinio modelio rezultatų. Visa nuokrypio apybraiža ir sritis šalia apybraižos tampa įtempių ekstreminių taškų vietomis. Toliau analizuojant įtempių pasiskirstymą nuo nuokrypio centro iki jo apybraižos (39c pav.) fiksuojamas žymus skirtumas tarp tiesinių ir netiesinių skaičiavimo rezultatų. Netiesiniuose skaičiavimuose žiedinių ir efektyviųjų įtempių reikšmės (39c pav., kreivė 1, 2) žymiai mažesnės nei tiesiniuose skaičiavimuose (39c pav., kreivė 3, 4). Iš pateiktų grafikų (39c pav.) matyti, kad priklausomai nuo įdubos taško žiediniai įtempiai ne visada didesni nei efektyvieji, bet didžiausi žiediniai įtempimai yra defekto apybražoje.

Iš pateiktų rezultatų matyti, kad įtempių ir poslinkių samplaikos koeficientai reikšmingai mažėja įvertinant talpyklos sienelės su nuokrypiu netiesinį modelį dėl nuokrypio pavidalo kitimo ir tolygesnio deformacijų pasiskirstymo. Įdubos gylio ir spindulio įtaka samplaikos koeficientų reikšmėms mažėja. Žiediniai įtempimai yra ekstreminiai.

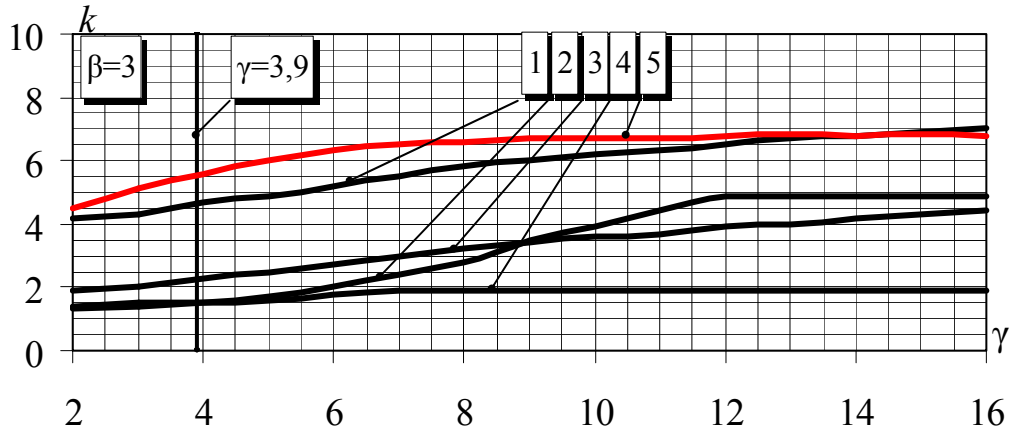
3.4. Nuokrypių apribojimų, numatytų Eurokode 3, pagrįstumo tyrimai netiesinio modelio skaitinio eksperimento rezultatų pagrindu

Analizuojant skaičiavimo rezultatų ir standartuose pateiktų apribojimų (lentelė 7) skirtumus matyti (40, 41 pav.), kad analizuojamo geometrinio nuokrypio poveikis sienelės įtemptajam deformuotajam būviui nepakankamai ištirta ir reikalingi papildomi tyrimai.

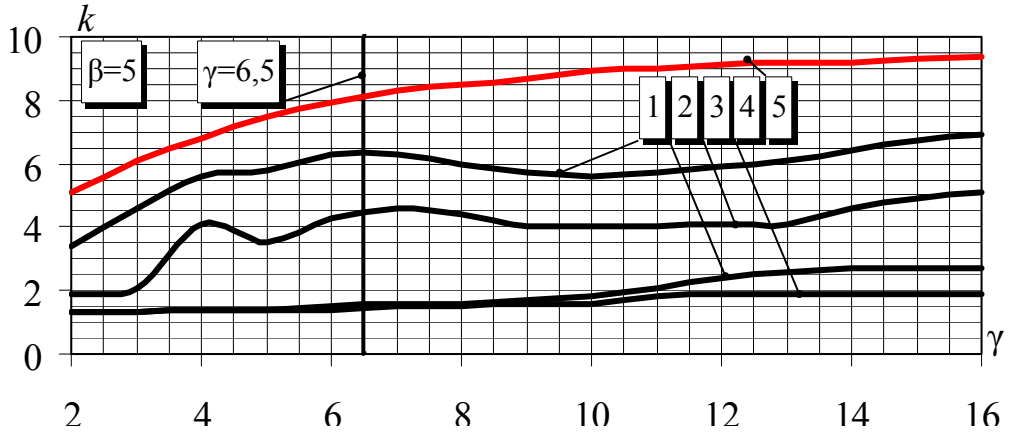
Palyginamieji tyrimai atlikti skyriuje analizuojamai talpyklai su prielaida, kad jos kokybės klasė pagal Eurokodo 3 [31] klasifikaciją yra „C“. Atsižvelgiant į pirmo skyriaus analizuojamos talpyklos geometriją, kai įdubos santykinis spindulys $\beta = 1$ leistinas įdubos gylis $\gamma = 1{,}3$. Didėjant įdubos spinduliui jos leistinas gylis taip pat didėja: kai $\beta = 3$ ir $\beta = 5$ atitinkamai leistini įdubos gyliai $\gamma = 3{,}9$, $\gamma = 6{,}5$ (40, 41 pav.). Esant įdubos spinduliui $\beta = 1$ statinį su tokiu nuokrypiu nauduoti neleidžiama, kai analizuojami gyliai $2 \le \gamma \le 16$. Reikalingas talpyklos remontas, naudojimo apribojimas ar statinio paskirties pakeitimas. Toliau analizuojant pateiktus tiesinio skaičiavimo rezultatus (40, 41 pav., kreivė 1) akivaizdu, kad pasirinktus didesnius leistinus apribojimus, $\gamma = 3{,}9$, $\gamma = 6{,}5$, pasireiškia pakankamai aukšta įtempių samplaika. Kai įdubos spindulys $\beta = 3$ ir $\beta = 5$, atitinkamai įtempių samplaikos koeficientai $k = 4{,}7$, $k = 6{,}3$. Taip pat fiksuojama maksimali poslinkių koncentracija, kai $\beta = 3$ ir $\beta = 5$, atitinkamai poslinkių koncentracijos koefcientai lygūs $\chi = 15{,}4$, $\chi = 61{,}0$. Bet atliekant leistinų nuokrypio dydžių ir skaičiavimo rezultatų įvertinant modelio pilną netiesiškumą palyginimus (40, 41 pav., kreivė 4), įtempių ir poslinkių koncentracija neekstreminė ir žymiai mažesnė nei tiesiniuose skaičiavimuose. Kai įdubos spindulys $\beta = 3$, samplaikos koeficientai lygūs $k = 1{,}5$ $\chi = 2{,}7$ ir, kai $\beta = 5$ – $k = 1{,}4$ $\chi = 4{,}1$ (40, 41 pav.). Akivaizdu, kad realiai samplaikos koeficientai nepasiekia tiesinių skaičiavimų samplaikos koeficientų reikšmių. Veikiant produkto slėgiui keičiasi įdubos pavidalas, o jos ekstreminiuose taškuose medžiaga dirba plastiškai ar tampriai plastiškai. Tačiau svarbu įvertinti, kad dėl talpyklos apkrovos ciklišumo, medžiaga ekstreminiuose taškuose keičia savo savybes: praranda plastiškąsias savybes, stiprėja, tampa trapesnė. Įdomu, kad didėjant nuokrypio



a



b

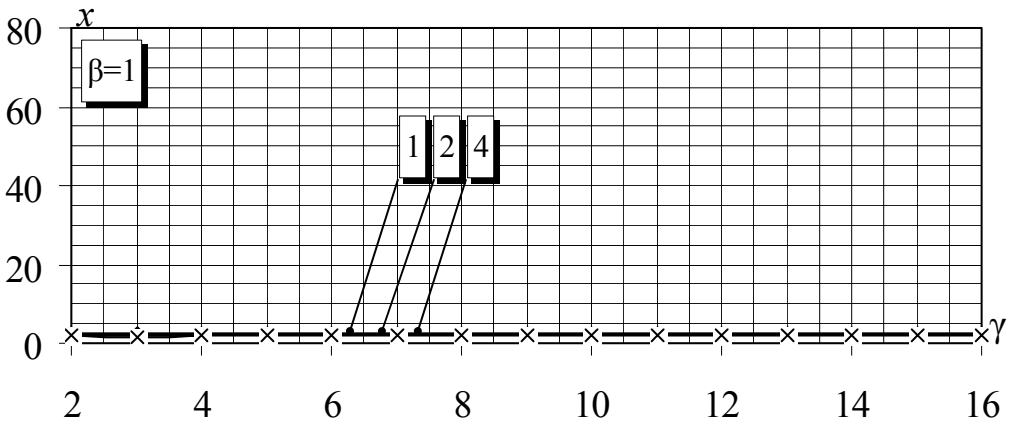


c

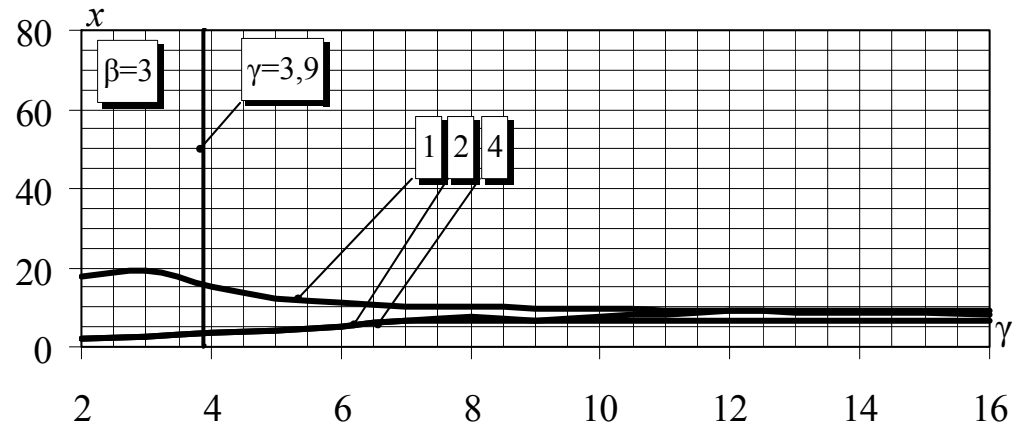
40 pav. Įtempių samplaikos koeficiento ir įdubos gylio ir spindulio sąryšis: $\beta = 1$ (a); $\beta = 3$ (b); $\beta = 5$ (c)

spinduliui esant pastoviam jo gyliui įtempių samplaikos koeficientas ir poslinkių

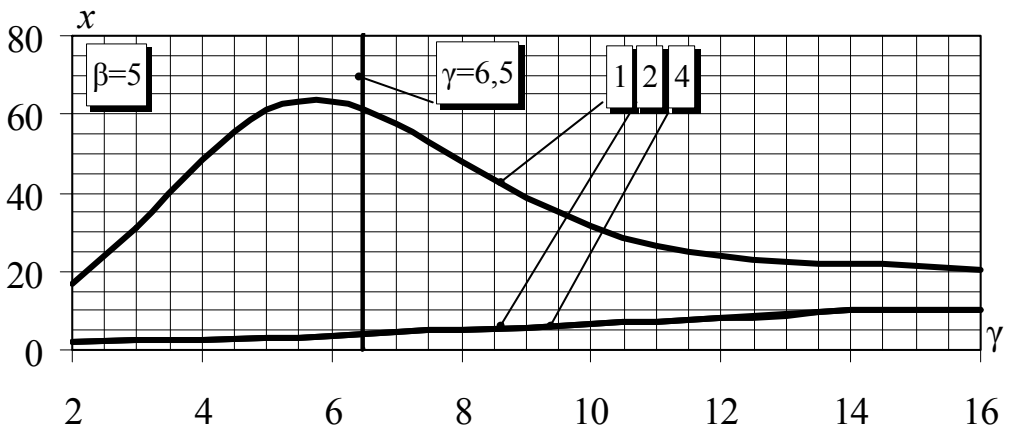
samplaikos koeficientas mažėja. Pavyzdžiui, analizuojant netiesinio modelio skaičiavimo rezultatus (40, 41 pav., kreivė 4), kai santykinis nuokrypio gylis pastovus ($\gamma = 8{,}0$), įtempių samplaikos koeficientas mažėja didėjant įdubos spinduliui, kai $\beta = 1$ $k = 2{,}0$,



a



b



c

41 pav. Poslinkių samplaikos koeficiento ir įdubos gylio ir spindulio sąryšis: $\beta = 1$ (a); $\beta = 3$ (b); $\beta = 5$ (c)

$\beta = 3$ $k = 1{,}9$, $\beta = 5$ $k = 1{,}5$.

Esant tokioms pačioms sąlygoms poslinkių samplaikos koeficientas taip pat mažėja, kai $\beta = 1$ $\chi = 2{,}0$, $\beta = 3$, $\chi = 6{,}5$, $\beta = 5$ $\chi = 5{,}0$. Be to matyti, kad didėjantis įdubos gylis beveik neturi įtakos įtempių ir poslinkių koncentracijos reikšmei taikant netiesinio modelio uždavinį (39, 40 pav.). Vertinant nuokrypius reikia nepamiršti, kad eksploatuojamos talpyklos turinčios didesnius nuokrypius nei numatyta standartuose, sėkmingai naudojamos be apribojimų ar remonto. Diagramose (39, 40 pav.) kreivės 2 ir 3 parodo įtempių ir poslinkių samplaikos koeficientų pasiskirstymą priklausomai nuo nuokrypio dydžių, kai atliekami skaičiavimai įvertinant atitinkamai tik geometrinių deformacijų netiesiškumą ir medžiagos fizinį netiesiškumą.

9 lentelė. Maksimalios įtempių ir poslinkių samplaikos koeficientų reikšmės

Eil. nr.	**Skaičiavimo būdas**	**Ekstreminio taško padėtis, z**	**ISK, k_{max}** **PSK, χ_{max}**	γ	β
1	Tiesinio uždavinio sprendimai	1,000	7,0	16	3
		0,132	63,0	6	5
2	Geometriškai netiesinio uždavinio sprendimai	0,549	4,9	12	3
		0,196	10,0	14	5
3	Fiziškai netiesinio uždavinio sprendimai	1,000	5,1	16	5
4	Geometriškai ir fiziškai netiesinio uždavinio sprendimai	0,876	2,0	2	1
		0,196	10,1	14	5

Geriausiai iš visų pirmame skyriuje pateiktų skaičiavimo būdų BEM skaičiavimo rezultatus atitinka pagal (19) formulę gauta kreivė (39 pav. kreivė 5). Lyginant minėtos formulės samplaikos koeficientų rezultatus su BEM rezultatais matyti, kad abiem atvejais samplaikos koeficiento keitimo priklausomai nuo nuokrypio dydžių dėsnis sutampa. Kai

kuriais skaičiavimo atvejais rezultatai visiškai sutampa. Toliau detaliau analizuodami kiekvieną nuokrypio atvejį (β = 1, 3, 5) mes galime konstatuoti, kad, kai $\beta = 1$ BEM gautas įtempių samplaikos koeficientas yra didesnis nei gautas pagal siūlomą (19) formulę (39a pav.). Kai įdubos spindulys $\beta = 5$, pagal siūlomą formulę gaunama didesnė atsarga nei skaičiuojant BEM (39c pav.). Įtempių samplaikos koeficientas pagal siūlomą formulę gaunamas didesnis, kai $\beta = 3$ ir $2 \le \gamma \le 13$. Tačiau keliuose skaičiavimo atvejuose įtempių samplaikos koeficientai turi vienodas reikšmes pagal abu skaičiavimo metodus, kai $\beta = 3$ ir $\gamma = 14$ (39b pav.). Siūloma formulė negali būti naudojama netiesinio modelio skaičiavimuose dėl didelio atsargos koeficiento.

Remiantis skaičiavimo rezultatais, palyginimais ir sukaupta patirtimi atsiranda galimybė padidinti leistinų įdubos dydžių ribas išnaudojant medžiagos darbą už takumo ribos iki plyšio atsiradimo.

3.5. Trečiojo skyriaus išvados

Remiantis atliktų tyrimų rezultatais galimos tokios išvados:

1. Faktinių tyrimų metu gautos maksimalios įtempių ir poslinkių samplaikos koeficientų reikšmės pateiktos 9 lentelėje.
2. Įtempių ir poslinkių samplaikos koeficientų reikšmės žymiai mažėja įvertinant deformacijų geometrinį ir medžiagos fizinį netiesiškumą dėl įdubos pavidalo keitimo, sumažėjimo. Atitinkamai „sušvelnėja“ perėjimas nuo įdubos paviršiaus į pagrindinį talpyklos paviršių.
3. Netiesinio modelio skaičiavimo rezultatai rodo, kad nuokrypio dydžiai, gylis, spindulys, turi mažesnį poveikį įtempių ir poslinkių samplaikos koeficientų reikšmėms nei tiesinio skaičiavimo metu.
4. Maksimalūs įtempiai tiesinių skaičiavimų metu fiksuojami įdubos kontūre $k = 7{,}0$, kai $\gamma = 16$, $\beta = 3$. Maksimalūs poslinkiai fiksuojami vidurinėje nuokrypio dalyje ir maksimalus poslinkių samplaikos koeficientas $\chi = 63{,}0$, kai $\gamma = 6$, $\beta = 5$.

5. Maksimalūs įtempiai pilno netiesinio modelio skaičiavimo metu fiksuojami įdubos apybraižoje ir įtempių samplaikos koeficientas lygus $k = 2{,}0$, kai $\gamma = 2$, $\beta = 1$. Maksimalūs poslinkiai fiksuojami vidurinėje nuokrypio dalyje ir maksimalaus poslinkio samplaikos koeficientas lygus $\chi = 10{,}1$, kai $\gamma = 14$, $\beta = 5$.
6. (19) formulės gauta koncentracijos koeficientų priklausomybė nuo įdubos dydžių panaši į BEM rezultatus.
7. Remiantis skaičiavimo rezultatais, palyginimais, sukaupta talpyklų naudojimo patirtimi atsiranda galimybė padidinti leistinų įdubos dydžių ribas išnaudojant medžiagos savybes už takumo ribos iki plyšio atsiradimo.

4. Plonos plieninės plokštelės „minkštojo“ paviršinio nuokrypio įtempių ir deformacijų būvio analizė eksperimentiniu ir skaitiniu metodais

4.1. Bendros žinios apie tyrimo metodą

Dvidešimtame amžiuje inžinerinio progreso, sėkmingo verslo įvairiose pramonės šakose (energetikoje, chemijoje, dujotiekio, naftos produktų pramonėje) rezultatas – yra didelių pramoninių kompleksų vystymas visame pasaulyje. Dėl šių priežasčių artimiausioje ateityje kils labai aktualios problemos: ypatingų statinių naudojimas po statinio gyvavimo laikotarpio, demontavimas ir rekonstrukcija. Šie klausimai turi būti išspręsti priklausomai nuo galiojančių standartų reikalavimų. Spręsdami tokius klausimus, patirtis naudojant tokio tipo statinius, panašių problemų sprendimų patirtis yra labai svarbi ir turi būti įvertinama pirmiausia [7, 47, 60]. Bet nuolatinių plonasienių statinių kvalifikuotų patikrinimų, ekspertizių (naujų statinių, pradedamų naudoti) išvadų duomenų kaupimas yra labai brangus.

Vienas iš minėtų statinių gali būti darbo tyrimo objektas, t.y. plonasienė talpykla, kuri realiai visada turi globalių bei lokalių nuokrypių nuo taisyklingos projektinio pavidalo [64, 66, 67]. Didėjant talpyklos tūriui šie nuokrypiai didesni ir dažnesni. Plonasienių konstrukcijų (talpyklų) geometriniai nuokrypiai gali būti nepavojingi, bet žinoti mechaninį būvį defekto vietoje yra labai svarbu ir tai pakankamai sudėtingas uždavinys. Praktikoje faktinio mechaninio būvio įvertinančio pasikeitusį konstrukcijos pavidalą nustatymui nedefektuotos konstrukcijos mechaninis būvis koreguojamas koeficientais [68, 70, 78, 79]. Inžinierius praktikas tokių metodikų algoritmus gali rasti techninėse rekomendacijose ir standartuose [17, 86].

Plieninės talpyklos sienelės mechaninis būvis labai jautrus vienetiniams ir grupės geometriniams nuokrypiams. Talpyklų esamos būklės tyrimo rezultatai liudija [48, 55], kad įvairių nuokrypių akumuliacija tampa tokių statinių avarijų priežastimi naudojant talpyklą 20–25 metus. Talpyklų naudojamo taisyklės reglamentuoja 25–30 metų jų saugų naudojamą. Naudojant tokius statinius pilnai išnaudojamos jų medžiagos mechaninės galimybės, todėl nuolat reikalinga jų naudojamo kontrolė ir tyrimai. Bet nepaisant

didelio matuojamų prietaisų ir skaičiuojamųjų metodikų progreso, tai lieka sudėtingu uždaviniu.

Įvertinant nuokrypio pavojingumo laipsnį labai svarbu modelyje atsižvelgti į teisingą (taisyklingą) jo padėtį. Tai ypač svarbu nustatant mechaninį būvį įdubos vietoje. Labai aktualus klausimas – skaitinio modelio nuokrypio atitikimas tikrajam įdubos pavidalui. Be to išankstinis įtempių reikšmės prognozavimas įdubos vietoje yra kokybiškai reikšmingas tyrimo žingsnis. Be aptartų įtakojančių sienelės mechaninį būvį veiksnių egzistuoja ir kiti nemažiau reikšmingi veiksniai: jų padėties keitimas, pakraščio efekto faktoriai ir t.t. Visi minėti klausimai vienodai svarbūs (Visos minėtos priežastys vienodai svarbios). Sprendžiant tokius uždavinius ar uždavinių grupes taikomi supaprastinimai, prielaidos ir atsižvelgiama į individualią situaciją [5, 11, 26].

Klasikinėje defektų įvertinimo teorijoje [5, 95] jie klasifikuojami į dvi grupes: į „aštrius“ defektus (plyšiai, įpjovos ir t.t.) ir „minkštus“ nuokrypius (įdubos, gofrai ir t.t.). Pirma defektų grupė – „aštrūs“ defektai, daug pavojingesni dėl didesnės irimo rizikos. „Minkšti“ nuokrypiai neištirti taip nuodugniai kaip „aštrūs“ defektai ir jų apribojimai siejami tik su jų geometriniais parametrais [104]. Be to neatsižvelgiama į nuokrypių padėtį, pavidalus, konstrukciją. Paminėtos priežastys rodo, kad „minkšti“ nuokrypiai nepakankamai išnagrinėti ir yra galimybė tobulinti įvertinimo metodus.

Talpyklų avarijų statistinėmis duomenimis, geometriniai vietiniai nuokrypiai įvertinami kaip antraeiliai veiksniai. Šie nuokrypiai yra pavojingesni ir turi kitą reikšmę, kai jie nagrinėjami atsižvelgiant į suvirinimo siūlių išdėstymą, blogą plieno kokybę ir t.t. [22, 81].

Viena iš galimybių nagrinėti vietinių geometrinių nuokrypių poveikį talpyklos sienelės mechaniniam būviui – pasinaudoti eksperimentiniu modeliu su atitinkamu geometriniu nuokrypiu. Analizuojamas modelio vietinis nuokrypio vietoje įtemptasis deformuotasis būvis. Remiantis tokiais tyrimais plonasienėms konstrukcijoms gaunami pakankamai tikslūs rezultatai. Lyginant su tikrosiomis talpyklomis sumažintų dydžių eksperimentiniai modeliai yra pigesni ir suteikia galimybę atlikti bandymus su skirtingais tyrimo objekto geometriniais parametrais keičiant lakšto sienelės storį, įdubos gylį, spindulį ir t.t. Įprastai baigiant montuoti talpyklas atliekamas jos bandymas. Šis

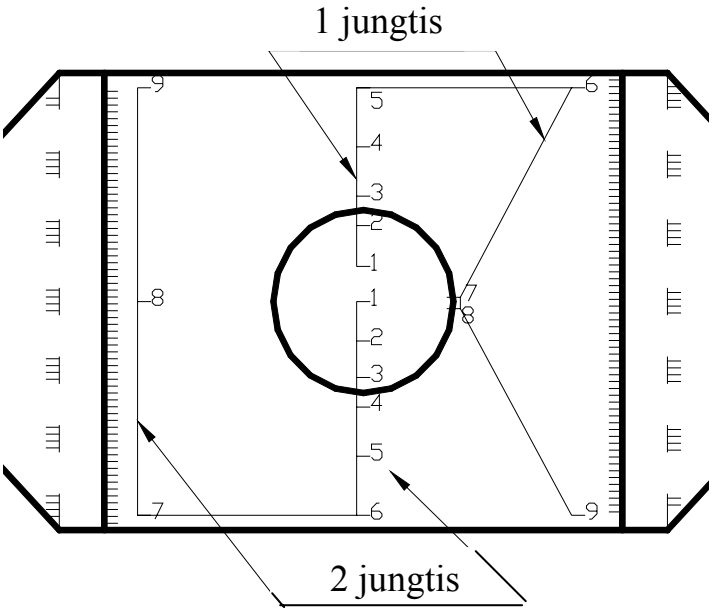
bandymas atliekamas nustatyti bendruosius talpyklų geometrinius ir kitus nuokrypius, įvertinti bendrą statinio tinkamumą naudojimui. Tam naudojami įvairių šalių standartų reglamentai apribojantys konstrukcijų nukrypimus, tačiau pagrįsti skirtingų mokslininkų atliktais tyrimais.

Tyrimo objekto skaitmeninis modelis naudojant skirtingus BEM kompiuterinius produktus [14, 63] ir jų nuolatinis tobulinimas suteikia galimybę analizuoti visos talpyklos bendrąjį ar jos vietinės srities įtemptąjį deformuotąjį būvį. Skaitinio modeliavimo BEM matematinis modelis suteikia plačias modeliavimo galimybes. Dėl šios priežasties jis yra labai populiarus. Be to BEM gaunami labai tikslūs rezultatai. Inžinerinės sistemos mechaninio būvio modeliavimui BEM naudoja klasikines teorijas ir jų prielaidas. Ši technologija labai aktuali ne tik naujų projektų įgyvendinimui, bet ir rekonstrukcijos ar remonto vykdymui. Objektų rekonstrukcijos ir remonto projektai reikalauja ypatingo įvertinimo ir skaitmeninių modelių adaptacijos esamai situacijai. BEM rezultatai gali prieštarauti esamiems galiojantiems standartų reikalavimams.

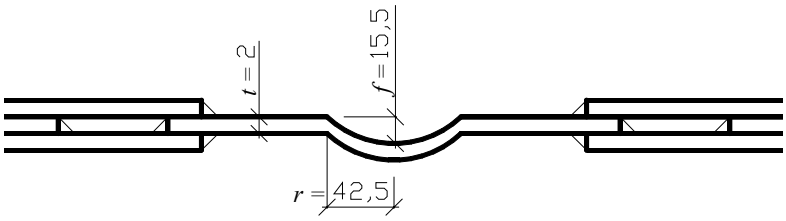
Analitiniai metodai [77, 86] siūlo objekto tyrimo uždavinį išspręsti naudojant klasikinius metodus taikomus inžinerinėje praktikoje. Vienas iš populiariausių taikomų metodų yra membraninė teorija. Bet šis metodas neduoda tikslių rezultatų. Dabartiniai galiojantys standartai [16, 17, 28, 86] rekomenduoja nagrinėti faktinę defektuotą formą įvertinant įtempių pasikeitimą įtempių samplaikos koeficientu. Naudojant analitinius skaičiavimo modelius į dalį faktorių neatsižvelgiama ir tai ne visada kompensuojama patikimumo koeficientais.

Tikslaus analitinio modelio pasiūlymas yra labai svarbus tyrimo objekto analizei. Gautų rezultatų kaupimas ir analizė reikšmingas tyrimo eigai. Tyrimo objekto problemos sprendimai skirtingais papildančiais vienas kitą metodais: analitiniais, BEM, laboratoriniais ar natūriniais eksperimentais, reikalingi gauti galutinius rezultatus.

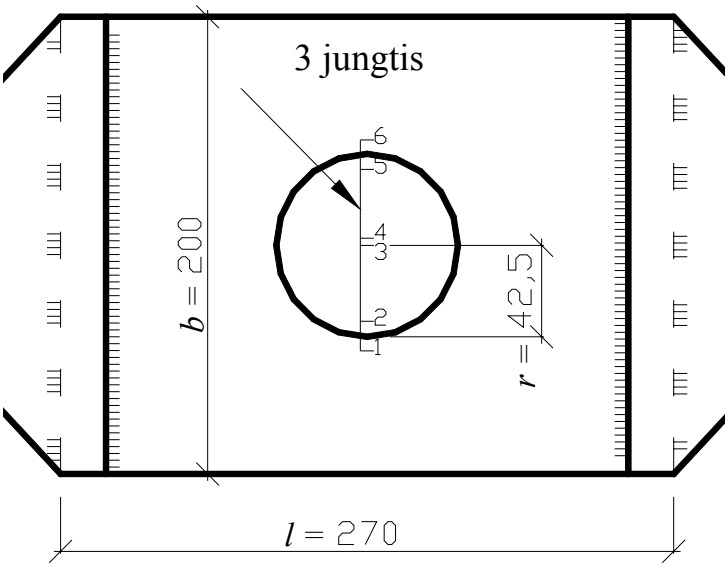
Praktinių tyrimų patirtis rodo, kad pakankamam rezultatų patikimumui pasiekti turi būti naudojami bent du skirtingi analizės metodai. Šio darbo problemai tirti pasirinktas aukščiau jau taikytas BEM metodas ir laboratorinis eksperimentas, kuris detaliai bus išnagrinėtas šiame skyriuje. Taip pat bus atliktas dviejų metodų rezultatų palyginimas.



a

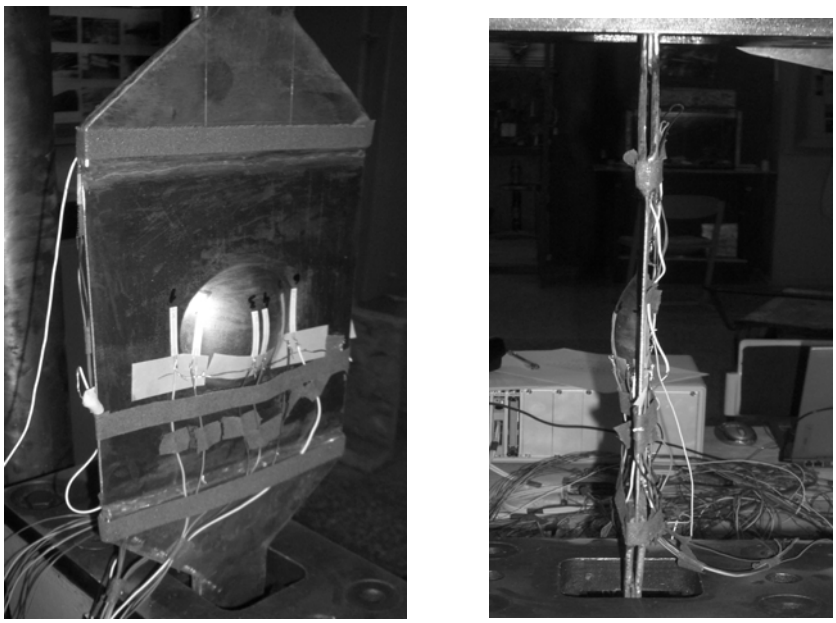


b



c

42 pav. Tenzojutiklių išdėstymas ant plieninės plokštelės su geometriniu nuokrypiu: vaizdas iš įdubos pusės (a); vaizdas iš plokštelės šono (b); vaizdas iš išgaubos pusės (c)



43 pav. Laboratorinis modelis: plieninė plokštelė su geometriniu nuokrypiu

4.2. Laboratorinis eksperimentas

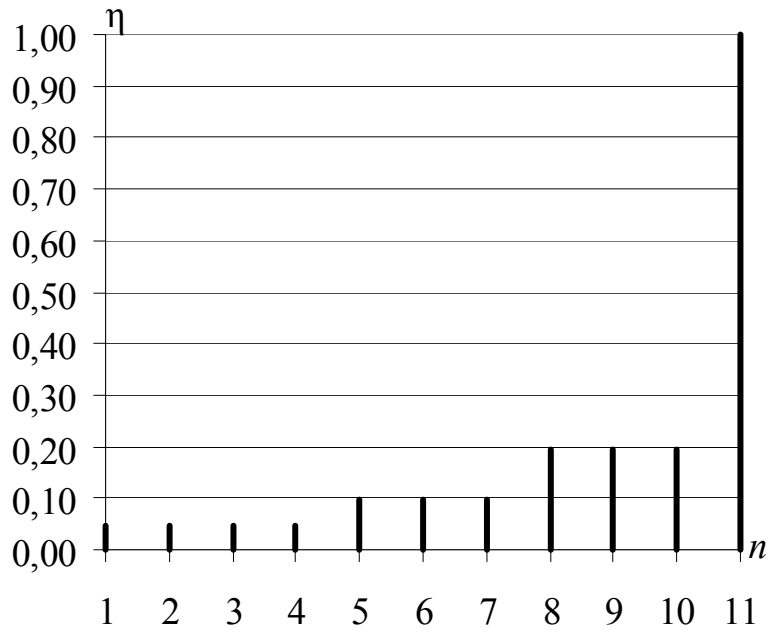
Supaprastintas ir labai plačiai naudojamas laboratorinis eksperimentas su plieninėmis plokštelėmis turinčiomis geometrinių nuokrypių. Šis metodas nustatyti įdubos poveikį įtempių pasiskirstymui ant talpyklos sienelės veikiant sandėliuojamo produkto slėgiui nėra pigus, bet žymiai supaprastina eksperimentinį modelį [22, 65, 81, 105]. Eksperimentinis modelis apibūdinamas tokiais parametrais: plokštelės plotis b = 200 mm, jos ilgis l = 270 mm ir storis t = 2 mm (42 pav.). Įdubos geometrija: defekto spindulys r = 42,5 mm, jo gylis f = 15,5 mm (42 pav.). Pusiau rutulinė įduba ant plieninės plokštelės paviršiaus buvo suformuota su pusiau rutuliniu puansonu (43 pav.). Santykinis spindulys ir gylis skaičiuojami atitinkamai taip:

$$\beta(r,t)=\frac{r}{t}, \tag{31}$$

$$\gamma(f,t)=\frac{f}{t}. \tag{32}$$

Taigi santykinis įdubos spindulys lygus $\beta = 21{,}25$, o santykinis įdubos gylis lygus $\gamma = 7{,}75$.

Eksperimento metu plieninė plokštelė buvo apkrauta traversų pagalba. Eksperimentinis modelis buvo bandomas iki irties apkraunant plokštelę pakopomis (laipsniškai). Apkrova buvo pridedama taip, kaip parodyta grafike (44 pav.). Grafike (44 pav.) *n* atitinka bandymų skaičių, o η – apkrovos faktorių, kuris yra lygus bandymo ir irities apkrovų užfiksuotų paskutiniame bandyme santykiui. Paskutiniame bandyme plokštelė buvo išbandyta iki irties. Didinant apkrovą apkrovos žingsnis buvo didinamas. Pirmuose keturiuose bandymuose apkrovos žingsnis yra lygus 0,007, sekančiuose trijuose bandymuose apkrovos žingsnis lygus 0,014, dar kituose trijuose – 0,028 ir paskutiniame bandyme – 0,034 (44 pav.).



44 pav. Apkrovimo schema bandymų metu

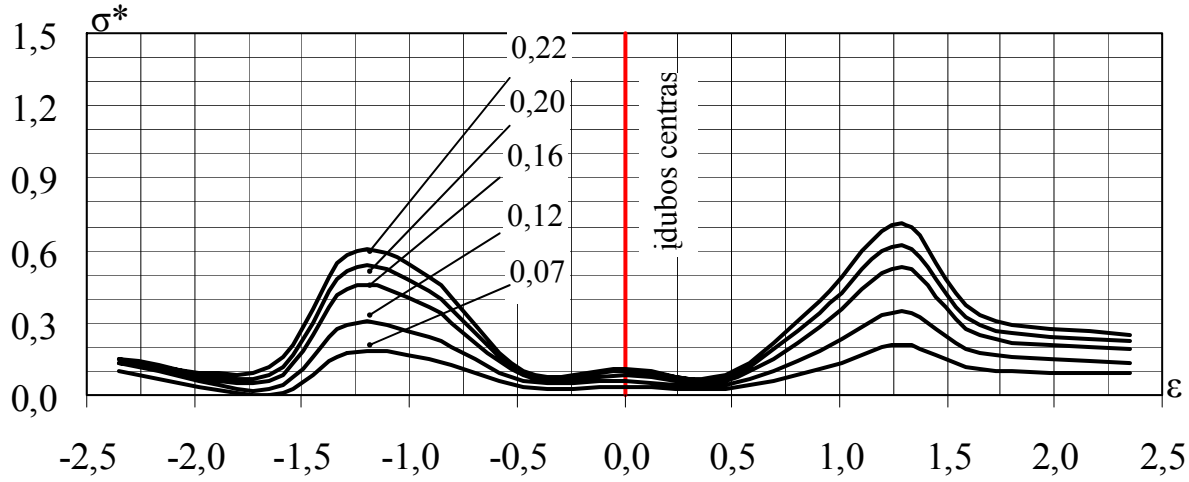
Tenzojutikliai buvo klijuojami iš abiejų nuokrypio pusių (421 pav.). Pirmos jungties penki tenzojutikliai ir antros jungties šeši tenzojutikliai, atitinkamai 1–5, 1–6, išdėstyti plokštelės viduriniame pjūvyje. Pirmos jungties du tenzojutikliai (7, 8) išdėstyti nuokrypio

apybraižoje. Antros jungties trys tenzojutikliai ir pirmos jungties du tenzojutikliai atitinkamai 7–9 ir 6, 9 išdėstyti šalia traversų. Trečios jungties visi tenzojutikliai išdėstyti iš išgaubos pusės viduriniame plokštelės pjūvyje (42 pav.). Įtampos matavimui kiekviename tenzojutiklyje eksperimento metu visos trys jungtys įjungiamos į skaitmeninį įrenginį „ALMEMO“ [34]. Kiekviename apkrovos žingsnyje nustatomas įtampos skirtumas tarp sąlyginio nulinio matavimo ir apkrovimo žingsnio rezultato. Įtampos matavimo rezultatai naudojami plokštelėje normalinių įtempių σ_z skaičiavimui pagal formulę:

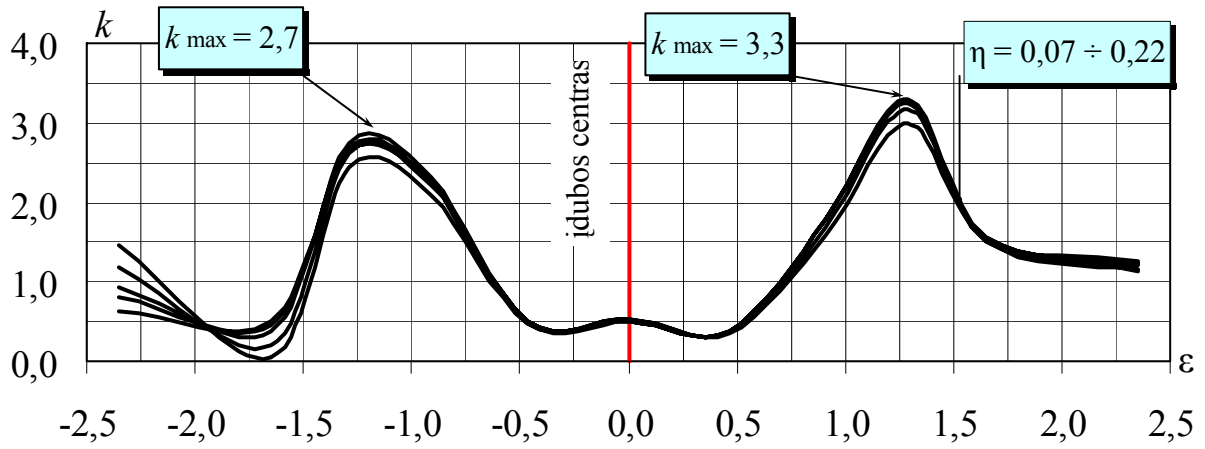
$$\sigma = \mathrm{E} \times \frac{4 \times x}{S \times U}, \tag{33}$$

čia E – tamprumo modulis nustatytas standartiniais tempimo bandymais; x – įtampos skirtumas tarp užfiksuotų parodymų skirtinguose apkrovos žingsniuose; S – tenzojutiklių jautrumo koeficientas; U – nuolatinė srovė palaikoma skaitmeniniu prietaisu [37].

Kiekviename apkrovos žingsnyje plokštelėje buvo skaičiuojami normaliniai įtempiai σ_z nuo veikiančios tame žingsnyje jėgos. Įtempių pasiskirstymas nuo vieno plokštelės krašto iki kito tiesiai per nuokrypio centrą buvo fiksuojamas pirmos ir antros jungčių tenzojutikliais, atitinkamai 1–5, 1–6 (45 pav.). Tenzojutiklių parodymai buvo analizuojami, kai apkrovos koeficientas η turėjo tokias reikšmes: 0,07, 0,12, 0,16, 0,20, 0,22. Diagramos (45 pav.) vertikalioje ašyje atidėti santykiniai išilginiai įtempiai σ^*. Diagramos horizontalioje ašyje pažymėti santykiniai atstumai ε tarp tenzojutiklių. Santykiniai plokštelės išilginiai įtempiai σ^* skaičiuojami kaip santykis tarp išilginių įtempių veikiant apkrovai η ir plokštelės irties įtempimų. Santykinis atstumas ε – tai yra santykis tarp atstumo nuo nuokrypio vidurinio taško iki tenzojutiklio ir nuokrypio spindulio. Iš gautų priklausomybių matyti (45 pav.), kad didėjant apkrovai didėja ir įtempių samplaikos koeficientas įdubos apybraižoje [51]. Įtempių samplaikos koeficiento diagrama (46 pav.) parodo, kad samplaikos koeficientas tamprioje stadijoje veikiant apkrovai nežymiai pasikeičia nuo $k = 2{,}5$ iki $k_{max} = 2{,}7$, kai apkrovos faktorius atitinkamai



45 pav. Itempių pasiskirstymas plokštelės viduriniame skerspjūvyje nuo vieno krašto iki kito per įdubos centrą

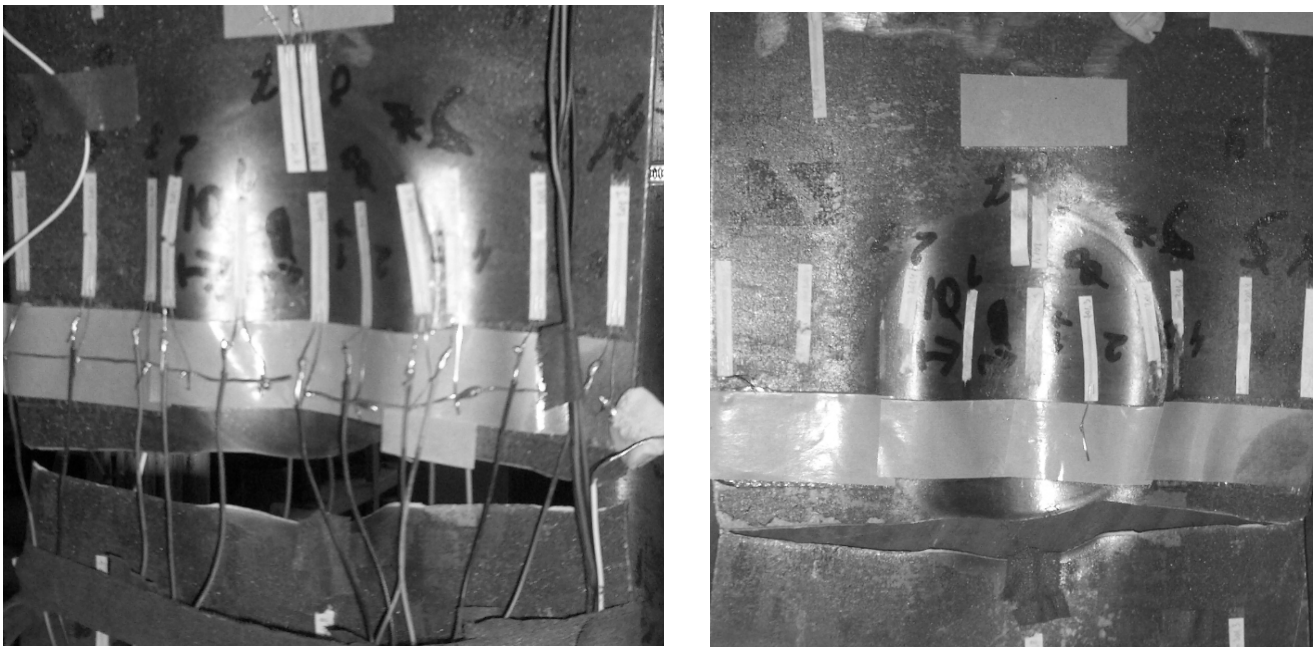


46 pav. Itempių samplaikos koeficiento pasiskirstymas plokštelės viduriniame skerspjūvyje nuo vieno krašto iki kito per įdubos centrą

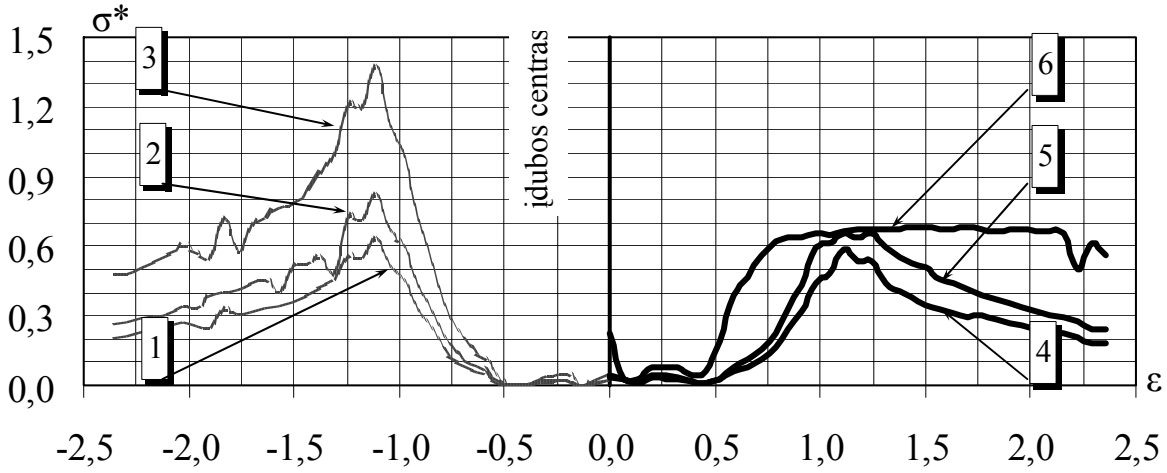
lygus 0,07 ir 0,12–0,22 iš vienos įdubos apybraižos pusės ir nuo $k = 3{,}0$ iki $k_{max} = 3{,}3$ atitinkamai esant apkrovos faktoriui 0,07 ir 0,12–0,22 iš kitos įdubos apybraižos pusės (46 pav.). Įtempių samplaikos koeficientas apskaičiuotas k kaip santykis tarp įtempių nuokrypio vietoje ir įtempių toje pačioje plokštelės vietoje be nuokrypio. Horizontalioje ašyje (46 pav.) atidėti santykiniai atstumai ε tarp tenzojutiklių.

Didinant apkrovą ($\eta > 0{,}22$) iš laboratorinio eksperimento (56 pav.) ir skaitmeninio eksperimento rezultatų (48 pav.) matyti, kad pasireiškia medžiagos plastinės savybės. Pirmiausia plokštelės medžiagos plastinės deformacijos pasireiškia nuokrypio

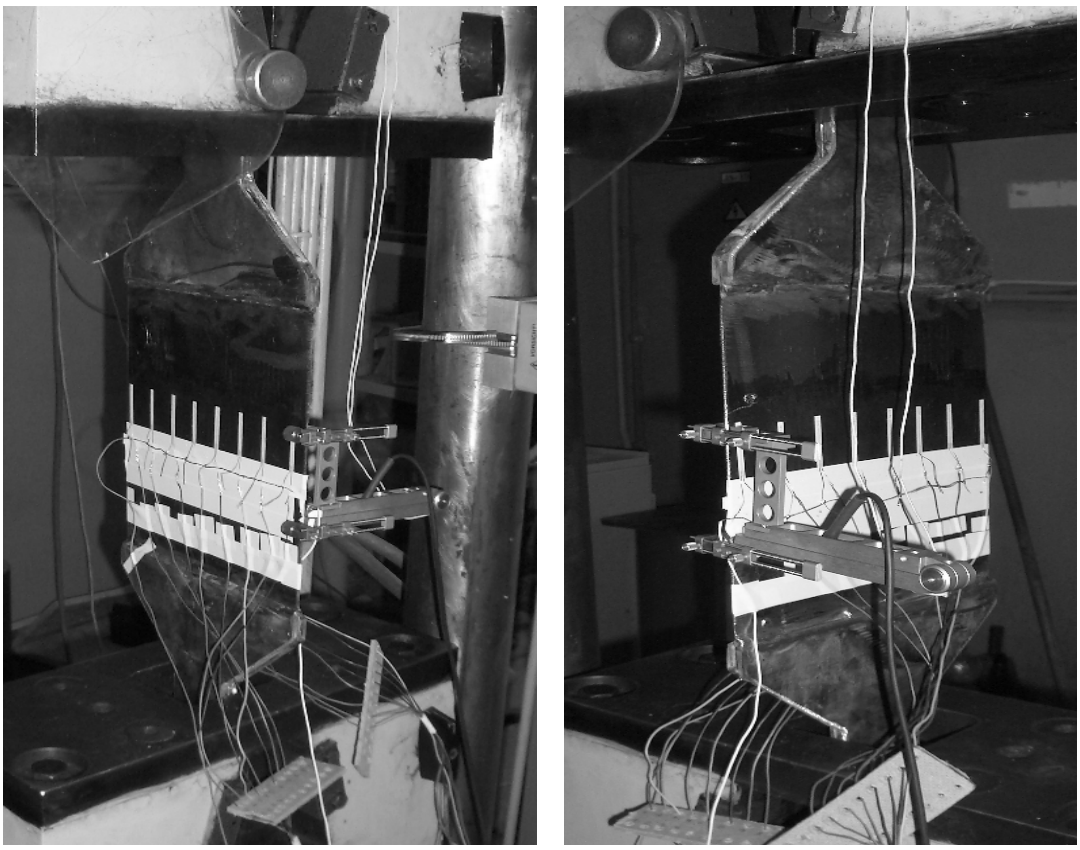
apybraižoje. Tolimesnis įtempių apskaičiavimas medžiagos plastinėje stadijoje pagal naudojamų tenzojutiklių parodymus netikslus. Galima tik bendro pobūdžio deformacijų analizė. Apkrovai pasiekus $\eta = 0{,}62$ reikšmes, tenzojutikliais fiksuojamas nuokrypio apybraižos ir centrinės srities deformacijų susilyginimas. Tolimesnis apkrovimas ir deformacijų analizė



47 pav. Plokštelės su geometriniu nuokrypiu (įduba) irties pavyzdys

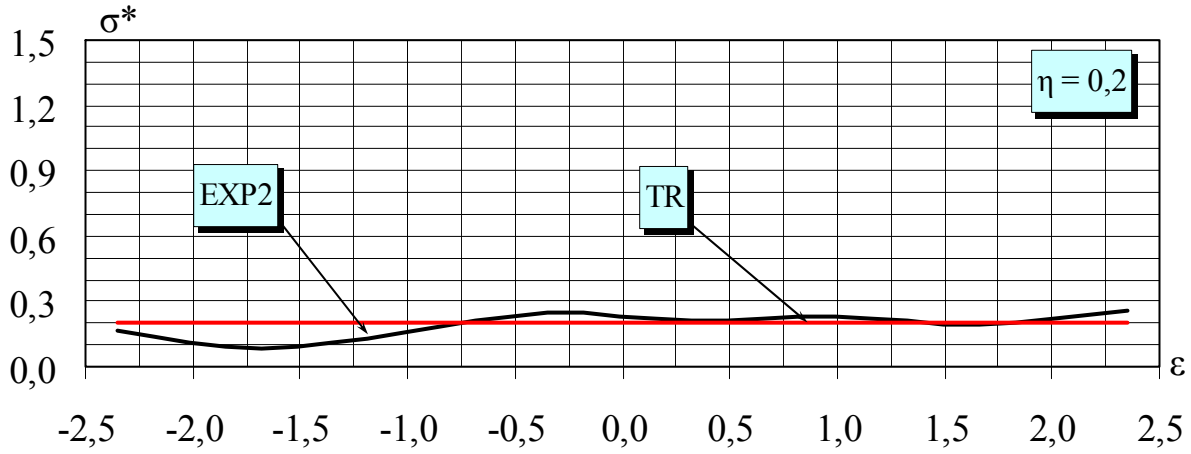


48 pav. Įtempių samplaikos koeficiento pasiskirstymas plokštelės viduriniame skerspjūvyje nuo vieno krašto iki kito per įdubos centrą, kai apkrovos koeficientas lygus 0,22 (kreivės 1, 4); 0,29 (kreivės 2, 5); 0,48 (kreivės 3, 6); tiesinio uždavinio skaičiavimo rezultatai (kreivės 1, 2, 3); netiesinio uždavinio skaičiavimo rezultatai (kreivės 4, 5, 6)



49 pav. Plieninės plokštelės be geometrinio nuokrypio eksperimentinis modelis

parodė didesnes deformacijas nuokrypio centrinėje dalyje nei apybraižoje. Pasiekus 145 kN apkrovas ($\eta = 1$) prasidėjo irimas nuo nuokrypio apybraižos link plokštelės kraštų (47 pav.).



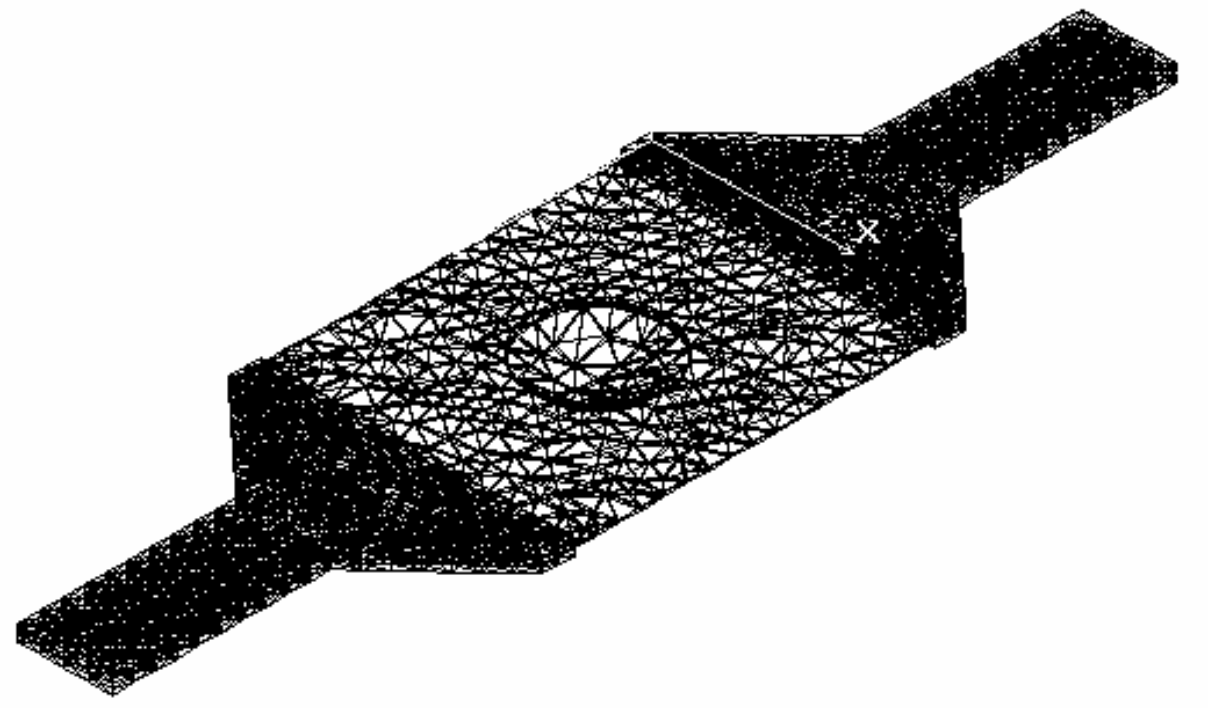
50 pav. Įtempių pasiskirstymas plokštelės be nuokrypio viduriniame pjūvyje nuo vieno krašto iki kito, kai apkrovos faktorius lygus 0,2: kreivė EXP2 − eksperimentiniai rezultatai; kreivė TR − analitiniai rezultatai

Papildomai buvo atliktas laboratorinis eksperimentas su plienine plokštele iš analogiško plieno, kaip bandyme su plokštele, turinčia geometrinį nuokrypį, patikrinti tenzojutiklių parodymus ir nustatyti traversų poveikį įtempių pasiskirstymui (49 pav.).

Eksperimento rezultatai parodyti diagramoje (50 pav.). Grafiko vertikalioje ašyje atidėti santykiniai išilginiai įtempiai σ* apskaičiuojami plokštelės viduriniame paviršiuje pagal santykį tarp matuojamų tenzojutiklių parodymų ir plieninės plokštelės stiprumo įtempių. Horizontalioje ašyje atidėti santykiniai atstumai ε apskaičiuojami pagal santykį tarp atstumų nuo plokštelės centro iki tenzojutiklio ir nuokrypio spindulio paimto iš pirmo bandymo (50 pav.).

4.3. Skaitinis eksperimentas baigtinių elementų metodu

Šiame tyrimo etape plokštelės su geometriniu nuokrypiu normalinių išilginių įtempių pasiskirstymas jos viduriniame paviršiuje nuo tempimo jėgos papildomai buvo analizuojamas BEM. Skaičiavimai buvo atlikti naudojant standartinę BEM programą COSMOS2M [34] (51 pav.).



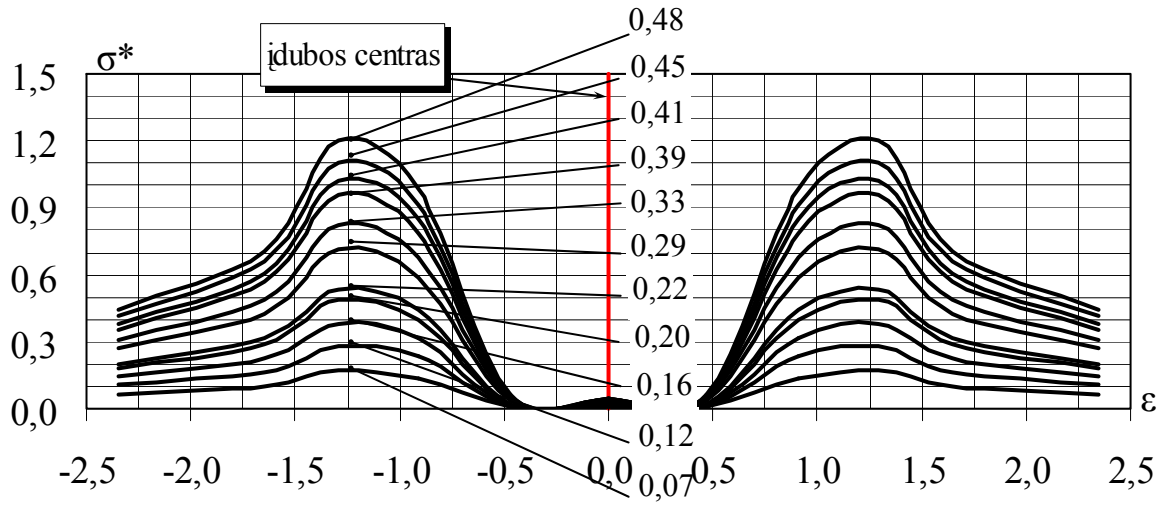
51 pav. Plieninės plokštelės su įduba skaitinis modelis

Skaitinio eksperimento modelio geometriniai parametrai visiškai atitinka laboratorinio modelio geometriją: plotis $b = 200$ mm, ilgis $l = 270$ mm ir storis $t = 2$ mm. Įdubos geometriniai parametrai: santykinis spindulys $\beta = 21{,}25$ ir santykinis gylis $\gamma = 7{,}75$.

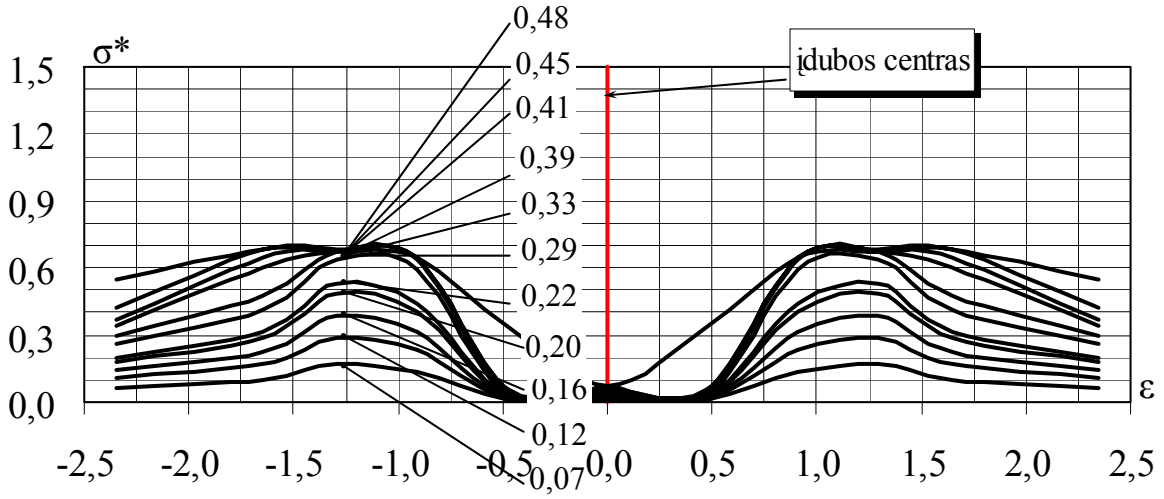
BEM skaičiavimuose buvo taikomi kevaliniai BE, turintys tris mazgus ir aštuoniolika laisvės laipsnių ir tūriniai BE, turintys keturis mazgus ir dvidešimt keturis laisvės laipsnius. BE tinklas buvo maksimaliai sutankintas. BE elemento dydis neviršijo vieno milimetro. Skaitinis modelis buvo apkrautas tolygiai išskirstyta apkrova analogiškai eksperimentui per traversą. BEM buvo atlikti tiesinio uždavinio skaičiavimai ir skaičiavimai įvertinantys deformacijų geometrinį netiesiškumą bei medžiagos fizinį netiesiškumą. Medžiagos fiziniam netiesiškumui įvertinti buvo naudojamas tampriosios plastiškosios stiprėjančiosios medžiagos modelis (21 pav.) [39]. Plokštelės medžiaga deformuojasi tampriai iki charakteringojo „$\sigma - \varepsilon$“ diagramos taško, kai normaliniai įtempimai lygūs $\sigma = 245$ MPa, santykinės deformacijos lygios $\varepsilon = 1{,}1 \cdot 10^{-3}$. Esant tolimesniam apkrovimui plokštelės plienas deformuojasi kaip tamprioji plastiškoji stiprėjančioji medžiaga iki $\sigma = 370$ MPa, $\varepsilon = 0{,}26$. Geometriniam ir fiziniam netiesiškumui įvertinti buvo taikomas Modifikuotas Newton-Raphson jėgų kontrolės metodas [14] (22 pav.).

Pirmiausia skaitmeninis modelis buvo modeliuojamas tūriniais BE. Analizuojant gautus rezultatus (52 pav.) normalinių išilginių įtempių pasiskirstymą plokštelės viduriniame paviršiuje nuokrypio srityje matyti įtempių koncentracija nuokrypio apybraižoje ir įtempių sumažėjimas įdubos vidurinėje srityje lyginant su įtempių vidutinėmis reikšmėmis [5, 8, 20, 102]. Pagal tiesinio uždavinio gautus rezultatus (52a pav.) matyti, kad įtempių koncentracija tolygiai auga proporcingai didėjančiai apkrovai nuokrypio apybraižoje ir fiksuojamas nuolatinis mažas įtempių lygis nuokrypio centre [2]. Kai apkrovos koeficientas keičiasi nuo 0,07 iki 0,48, įtempių samplaikos koeficiento reikšmė nekinta ir yra lygi $k = 2{,}5$ (53a pav.).

Toliau analizuojant pilnai netiesinio modelio skaičiavimo rezultatus matyti pilnas sutapimas su tiesinio uždavinio skaičiavimo rezultatais, kai apkrovos faktorius keičiasi



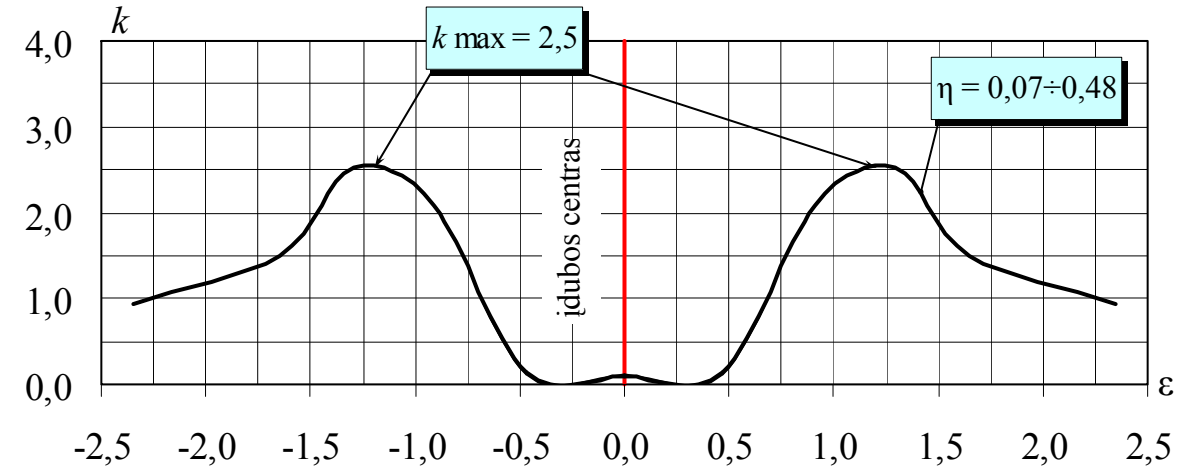
a



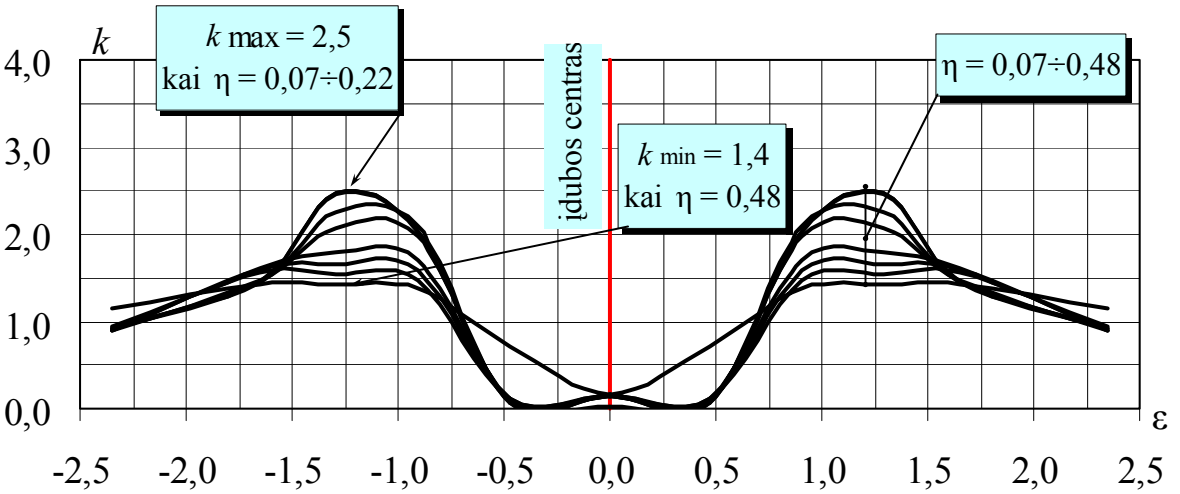
b

52 pav. Normalinių įtempių pasiskirstymas viduriniame plokštelės pjūvyje nuo vienos jos krašto iki kito per geometrinį nuokrypį (įdubą): tiesinio uždavinio skaičiavimo rezultatai (a); netiesinio uždavinio skaičiavimo rezultatai (b)

nuo 0,07 iki 0,22 (52, 53 pav.). Kai apkrovos koeficientas keičiasi nuo 0,07 iki 0,22, įtempiai įdubos pavojingiausioje vietoje, t.y. apybraižoje, neviršija plokštelės plieno takumo ribos (52b pav.). Tolimesnės apkrovos padidėjimas tampa deformacijų



a



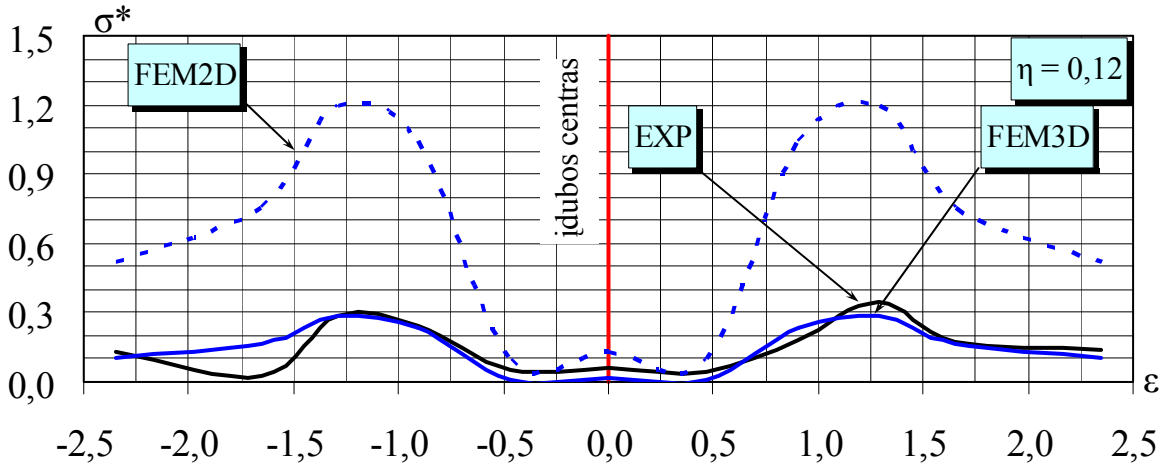
b

53 pav. Normalinių įtempių samplaikos koeficiento pasiskirstymas viduriniame plokštelės pjūvyje nuo vieno jo krašto iki kito per geometrinį nuokrypį (įdubą): tiesinio uždavinio skaičiavimo rezultatai (a); netiesinio uždavinio skaičiavimo rezultatai (b)

geometrinio ir plieno fizinio netiesiškumo priežastimi. Įtempiai koncentracijos vietoje nebeauga dėl deformacijų ir įtempių persiskirstymo [25]. Tiesinio ir netiesinio uždavinių skaičiavimo rezultatai didėjant apkrovai skyrėsi. (53 pav.). Apkrovos faktoriui pasiekus 0,45 įtempiai plokštelės viduriniame pjūvyje nuo plokštelės krašto iki įdubos apybraižos lygūs takumo įtempiams. Nuo apkrovos reikšmės 0,48 įtempiai nuokrypio vidurinėje

srityje pradeda didėti (53b pav.). Įtempių samplaikos koeficientas apybraižoje mažėja nuo $k = 2,5$, kai apkrovos koeficientas lygus 0,07–0,22 iki $k = 1,4$, kai $\eta = 0,48$ (53b pav.).

Taip pat buvo atlikti skaičiavimai BEM naudojant plokščius trikampius BE. Analizuojant gautus rezultatus akivaizdu, kad modeliavimui naudojant trikampius plokščius elementus gaunama žymiai didesnė samplaika nei taikant skaičiavimuose tūrinius BE arba lyginant su laboratorinių eksperimentų rezultatais (54 pav.). Labai svarbu



54 pav. Normalinių įtempių pasiskirstymas viduriniame plokštelės pjūvyje nuo vieno jo krašto iki kito per geometrinį nuokrypį (įdubą), kai apkrovos faktorius lygus 0,12. Kreivė EXP – eksperimentiniai rezultatai; kreivė FEM2D – skaitinio modeliavimo rezultatai atliekant netiesinius skaičiavimus ir naudojant 2D modelį; kreivė FEM3D – skaitinio modeliavimo rezultatai atliekant netiesinius skaičiavimus ir naudojant 3D modelį

pažymėti, kad BEM skaičiavimo rezultatai taikant 3D modelį visiškai sutampa su eksperimento rezultatais (54 pav.).

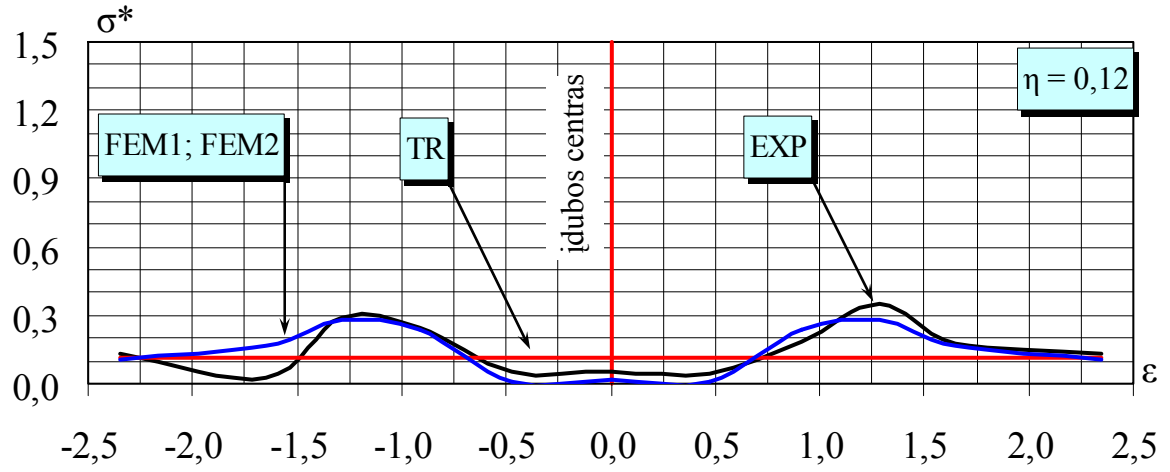
Pagal atliktą eksperimentą ir atliktus skaičiavimus galime daryti išvadas, kad tolimesnė plokštelės su įduba mechaninio būvio analizė turi būti atliekama taikant BEM naudojant tūrinius BE, kadangi gaunami tikslesni rezultatai. Analizuojant geometrinius nuokrypius turi būti taikomas netiesinis skaičiavimo uždavinis.

4.4. Laboratorinio ir skaitinio metodo rezultatų palyginimas

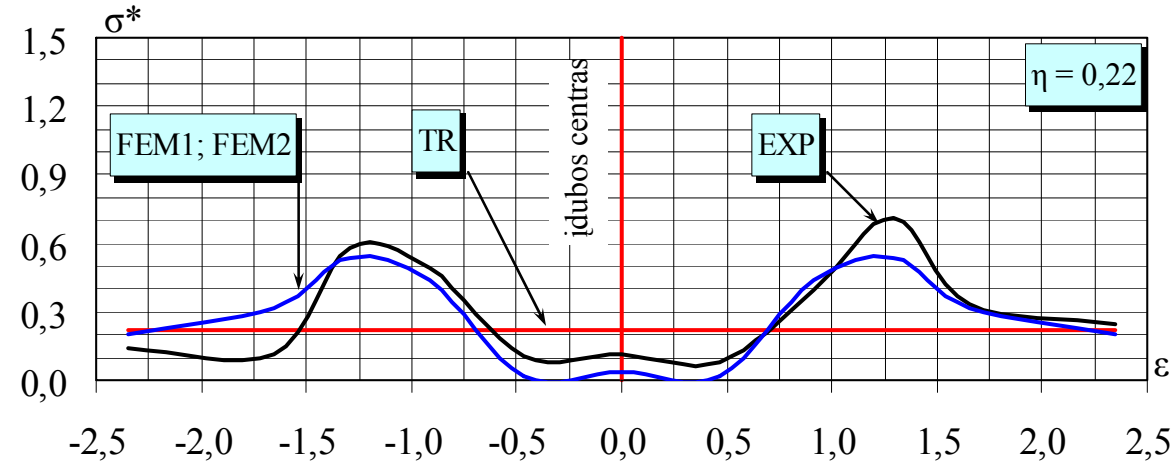
Modeliuojant galutinę išvadą dėl skaitinio modelio tipo taikymo plonos plokštelės su geometriniu nuokrypiu, reikėtų palyginti gautus laboratorinių bandymų ir skaitmeninio eksperimento rezultatus (55, 56 pav.). Pagal gautus rezultatus kiekviename apkrovimo žingsnyje yra nustatyta ekstreminė įtempių samplaikos reikšmė bei pavojingiausia įdubos sritis. Atsižvelgiant į paskutinio skyriaus išvadas palyginimai atliekami naudojant skaitmeninio modelio su tūriniais BE rezultatus.

Grafikuose (55, 56 pav.) parodytas normalinių įtempių viduriniame plokštelės skerspjūvyje per įdubos centrą pasiskirstymas, kai apkrovos koeficientas lygus 0,12 (55a pav.); 0,22 (55b pav.), 0,29 (55c pav.), 0,39 (56a pav.), 0,48 (56b pav.). Diagramose kreivės EXP, FEM2, punktyrinė linija FEM1 ir TR (55, 56 pav.) atitinkamai apibūdina tokius rezultatus: laboratorinių bandymų, skaitmeninio modelio skaičiavimo rezultatus įvertinant modelio deformacijų geometrinį ir medžiagos fizinį netiesiškumą, skaitmeninio modelio tiesinių skaičiavimų rezultatus ir analitinius plokštelės be nuokrypio normalinių įtempių skaičiavimo rezultatus.

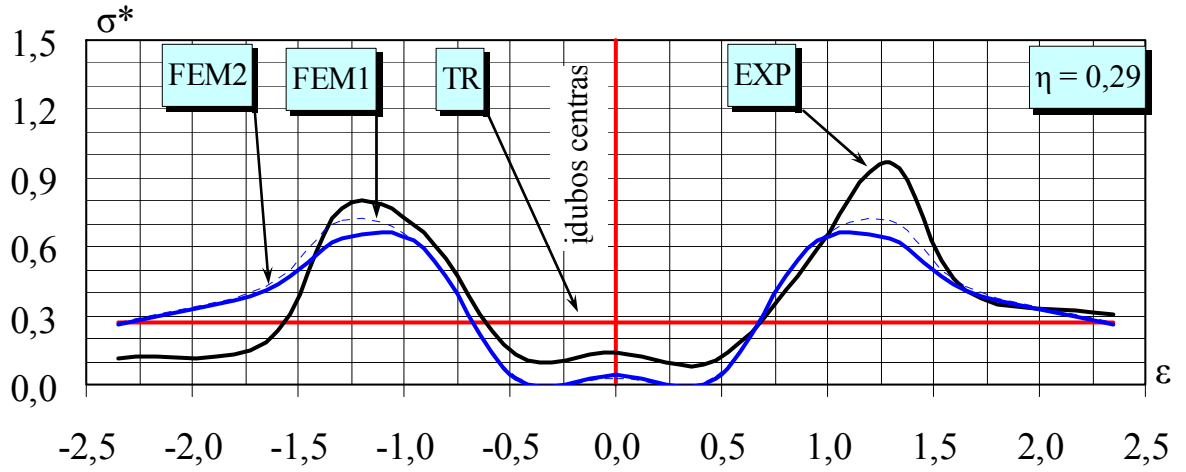
Pirmuose laboratorinių bandymų ir skaitmeninio eksperimento apkrovimo etapuose iki apkrovos faktoriaus 0,22, normaliniai įtempiai viduriniame plokštelės pjūvyje per įdubą pasiskirsto beveik vienodai. Plokštelės medžiagos įtempiai nuo veikiančios apkrovos neviršija medžiagos takumo ribos. Kai apkrovos faktorius lygus 0,12, maksimalūs įtempiai nuokrypio kairiame apybraižos taške bandymo metu visiškai sutampa su BEM skaičiavimo rezultatais (55a pav.). Lyginant bendrą normalinių įtempių pasiskirstymo dėsnį iki apkrovos faktoriaus 0,12, tiesinio ir netiesinio uždavinių skaičiavimo rezultatai ir laboratorinių bandymo rezultatai visiškai sutampa (55a, b pav.). Didinant apkrovą atsiranda skirtumas tarp laboratorinio bandymo rezultatų ir BEM skaičiavimo rezultatų taikant netiesinį modelį (55a, b pav.). Tai yra akivaizdu, kai apkrovos faktorius 0,29 (55c pav.). Plokštelės medžiagos mechaninis būvis pereina iš tamprios stadijos į tampriai



a



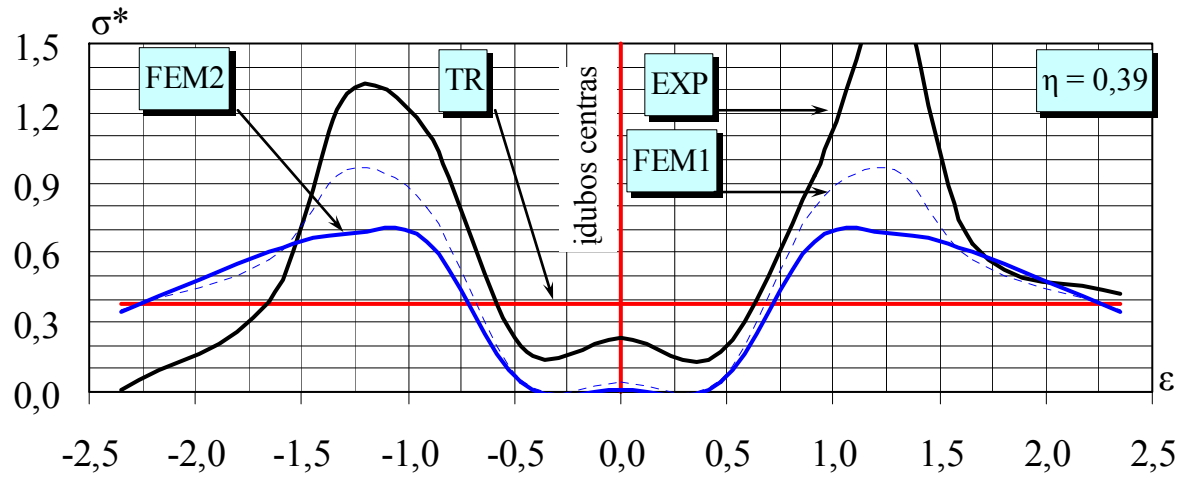
b



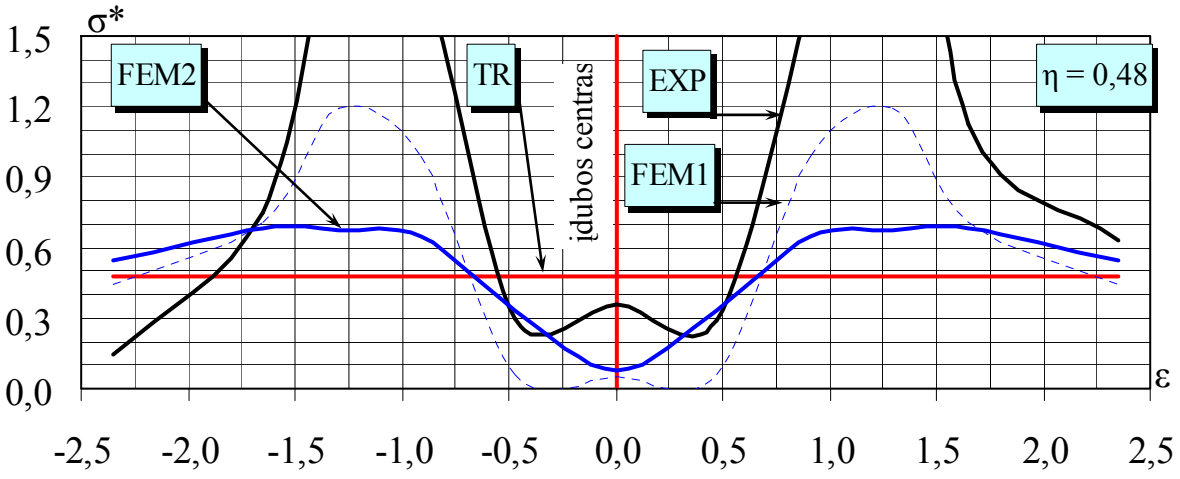
c

55 pav. Normalinių įtempių pasiskirstymas plokštelės viduriniame skerspjūvyje nuo vieno plokštelės krašto iki kito per įdubos centrą

plastinę stadiją. Reikėtų pažymėti, kad laboratorinių bandymų rezultatai labiau panašūs į BEM tiesinio skaičiavimo rezultatus nei lyginant su netiesinio uždavinio skaičiavimo rezultatais, kai apkrovos faktorius 0,29 (55c pav.). Tačiau didinant apkrovą rezultatų skirtumas tarp skirtingų metodikų didėja. Tolimesnis normalinių įtempių nustatymas tenzojutikliais tampa netikslus dėl jų medžiagos tampriųjų deformacijų. Analitinių normalinių įtempių skaičiavimo rezultatų kreivė analizuojant plokštelę be nuokrypio

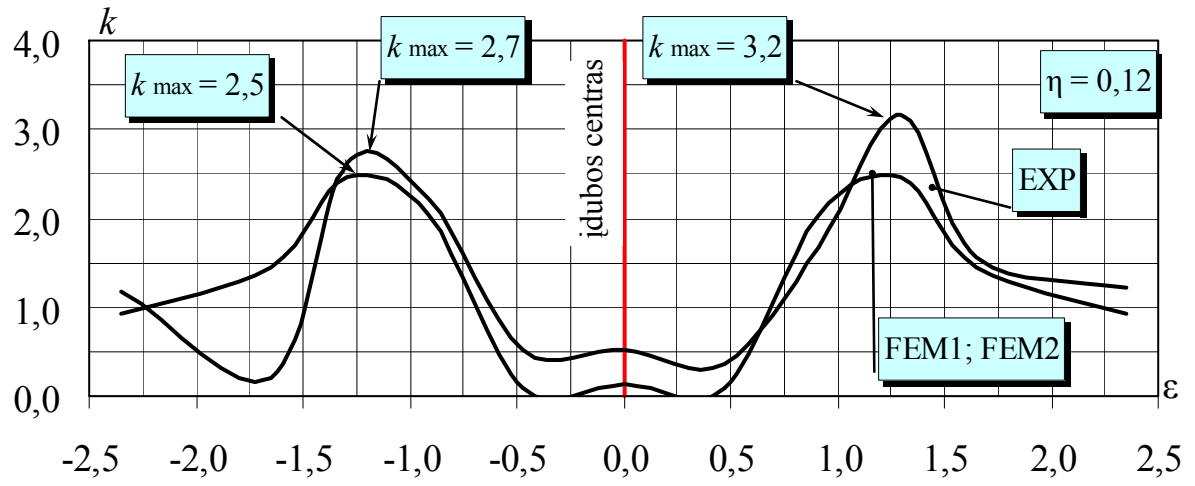


a

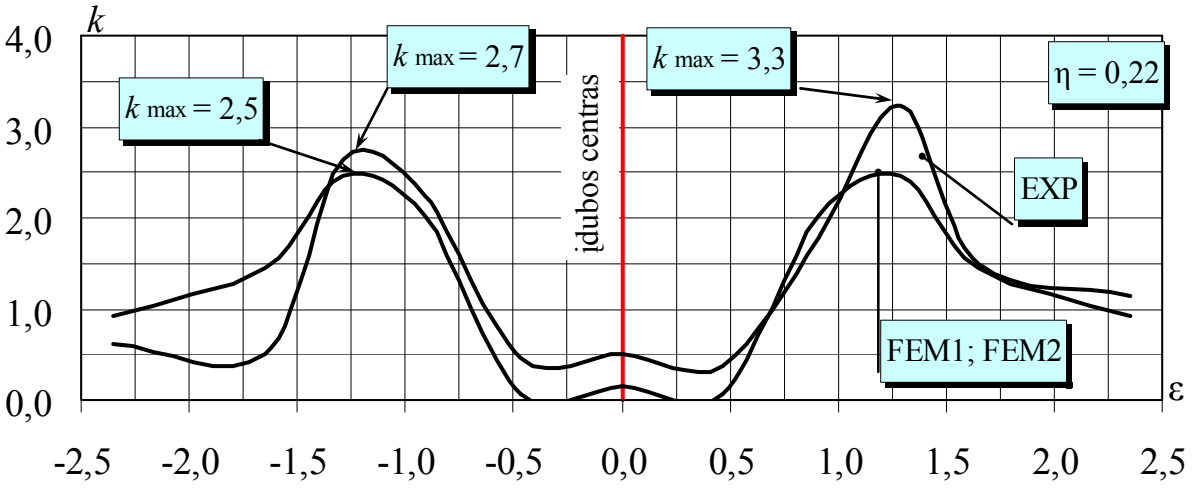


b

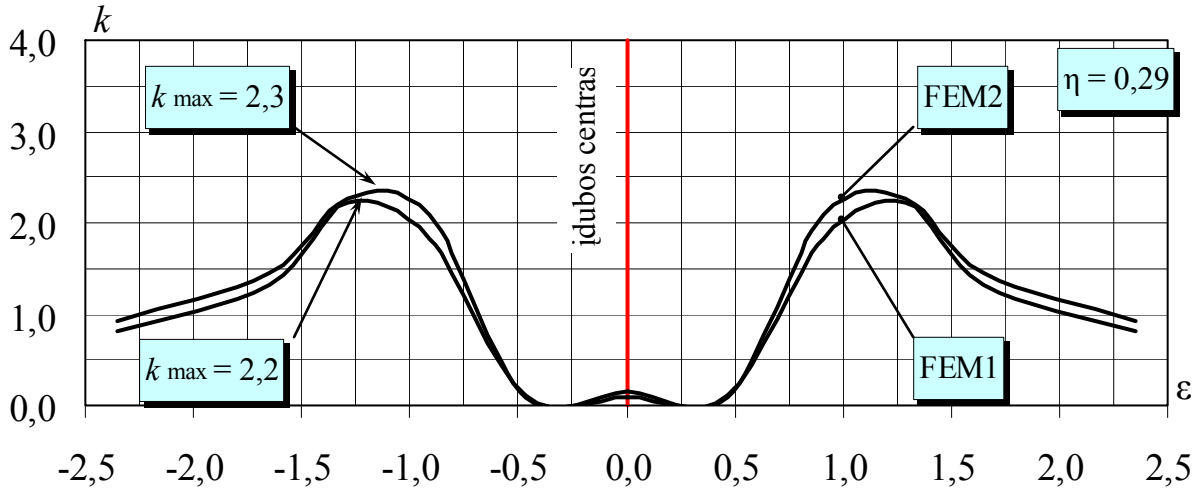
56 pav. Normalinių įtempių pasiskirstymas plokštelės viduriniame skerspjūvyje nuo vieno plokštelės krašto iki kito per įdubos centrą



a



b



c

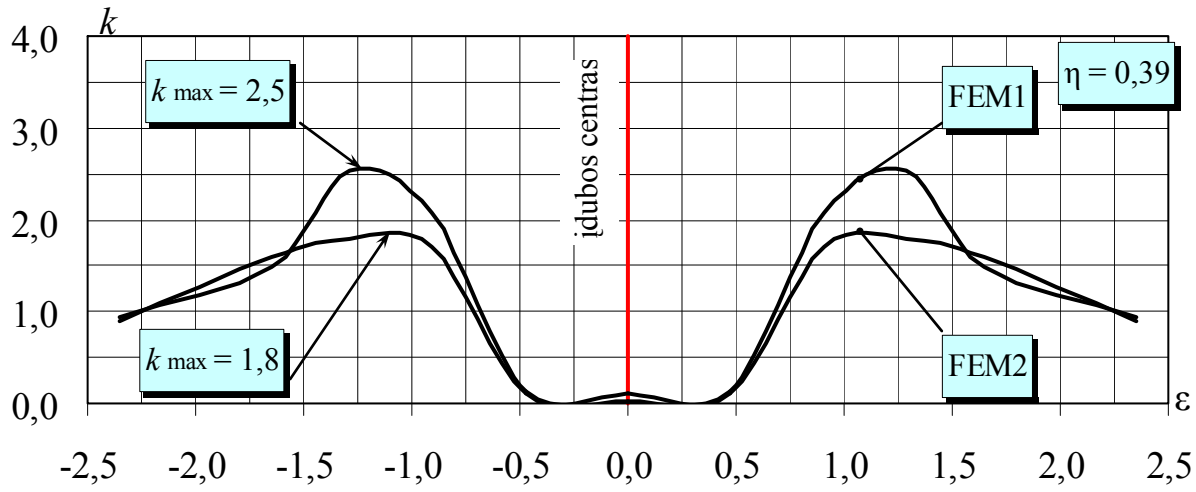
57 pav. Normalinių įtempių samplaikos koeficiento pasiskirstymas plokštelės viduriniame skerspjūvyje nuo vieno plokštelės krašto iki kito per įdubos centrą

dalina gautas normalinių įtempių pasiskirstymo priklausomybes analizuojant plokštelę su nuokrypiu į dvi dalis: samplaikos plotą ir plotą, kur įtempiai mažesni už vidutinius (55, 56 pav.). Toliau analizuojant normalinius įtempius tiesinio ir netiesinio uždavinio skaičiavimo rezultatus tempiamos plokštelės su nuokrypiu viduriniame jos skerspjūvyje matyti, kad didėjant apkrovai proporcingai didėja įtempiai nuokrypio apybraižoje analizuojant tiesinių skaičiavimų rezultatus. Įtempiai lieka pastovūs pagal netiesinių skaičiavimų rezultatus dėl nuokrypio deformacijų netiesiškumo ir medžiagos plastiškųjų savybių [11]. Plokštelės medžiagos mechaninis būvis tampriai plastinis. Pagal tiesinių skaičiavimų rezultatus, esant apkrovos lygiui 0,39–0,48 plokštelė turėtų pradėti irti nuo nuokrypio apybraižos. Tačiau tai neatitinka laboratorinių bandymų ir netiesinio modelio skaičiavimų rezultatus. Esant apkrovai 145 kN ($\eta = 1$) laboratorinis eksperimentinis modelis pradeda irti nuo nuokrypio apybraižos link plokštelės kraštų (47 pav.). Pagal gautus laboratorinio eksperimento ir skaitmeninio netiesinio modelio rezultatus didėjant apkrovai virš 0,39 įtempiai nuo nuokrypio apybraižos iki plokštelės krašto pasiskirsto tolygiau be aiškios samplaikos vietos. Nuo apkrovos 0,48 skirtumas tarp įtempių nuokrypio apybraižoje, jo centre ir plokštelės paviršiuje be nuokrypio mažėja. Esant apkrovai 0,62 įtempiai minėtuose taškuose susilygina. Toliau didėjant apkrovai įtempių ekstreminės reikšmės nustatomos centrinėje nuokrypio srityje. Kitoje nuokrypio ir plokštelės dalyje įtempiai lieka pastovūs. Plokštelės irties apkrova lygi 145 kN ($\eta = 1$).

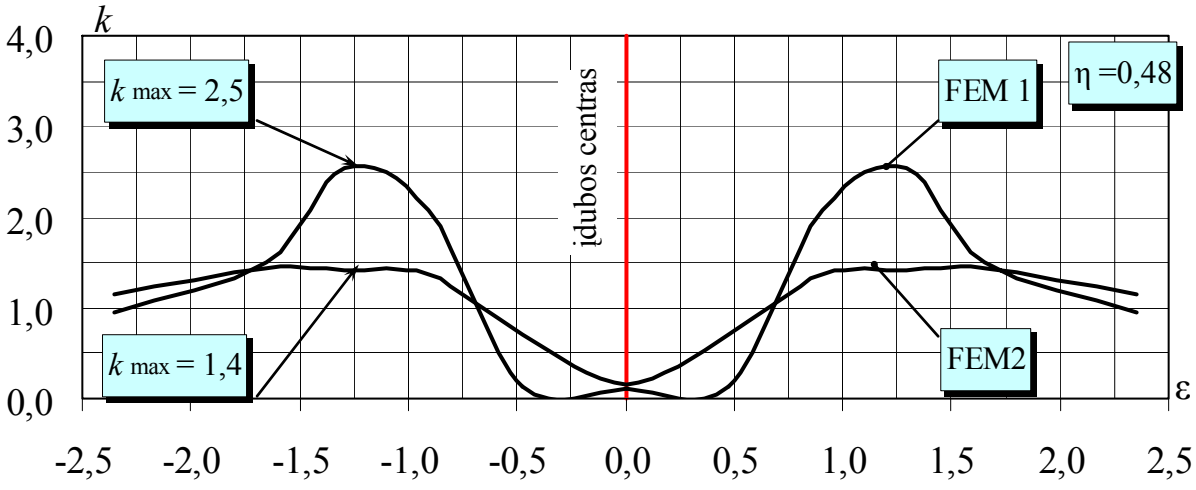
Toliau detaliau analizuosime įtempių samplaikos koeficiento pasiskirstymą plokštelės viduriniame pjūvyje nuo vieno jo krašto iki kito per nuokrypio centrą. Įtempių samplaikos koeficientas apskaičiuojamas santykiu tarp įtempių reikšmės plokštelėje su nuokrypiu ir įtempių reikšmės toje pačioje vietoje be nuokrypio.

Esant plokštelės apkrovimui iki 0,22 normalinių įtempių samplaikos koeficientas nekintamas dydis ir lygus: $k_{max} = 2{,}7–3{,}3$ − laboratorinių bandymų metu ir $k_{max} = 2{,}5$ − pagal BEM skaičiavimo rezultatus taikant tiesinį ir netiesinį modelį (57a, b pav.). Plokštelės medžiagos mechaninis būvis idealiai tamprus (57a, b pav.). Didinant apkrovą įtempių samplaikos koeficientas nesikeičia ir lieka pastovus iki irties atliekant tiesinį skaičiavimą (57, 58 pav.). Netiesinių skaičiavimų metu didinant apkrovą sekančiose

apkrovimo stadijose įtempių samplaikos koeficientas mažėja iki $k_{max} = 1,4$ esant apkrovai 0,48 ir išlieka pastovus iki irties (57, 58 pav.).



a



b

58 pav. Normalinių įtempių samplaikos koeficiento pasiskirstymas plokštelės viduriniame skerspjūvyje nuo vieno plokštelės krašto iki kito per įdubos centrą

Remiantis atliktais palyginimais galime daryti išvadas, kad tiriamo nuokrypio įtempių samplaikos koeficientas, kai plokštelės medžiaga deformuojasi tampriai, lygus $k_{max} = 3,2$ ir koeficiento reikšmė nepriklauso nuo skaičiavimo būdo. Esant didesniems apkrovimo lygiams įtempių samplaikos koeficientas mažėja iki $k_{min} = 1,4$ dėl plokštelės deformacijų netiesiškumo ir medžiagos tampriai plastinių deformacijų. Įtempių

samplaikos koeficientas iki irties lieka pastovus. Pavojingiausia nuokrypio vieta tamprioje stadijoje ir tampriai plastinėje stadijoje yra įdubos kontūras.

4.5. Ketvirtojo skyriaus įšvados

Remiantis atliktų tyrimų rezultatais galimos tokios išvados:

1. Atliekant plokštelės su geometriniu nuokrypiu mechaninio būvio tyrimus BEM turi būti taikomi tūriniai BE, tiksliau aprašantys įtemptąjį deformuotąjį būvį įdubos vietoje.
2. Netiesinio uždavinio skaičiavimai turi būti taikomi, kai įtempiai plokštelėje yra lygūs ar didesni nei medžiagos takumo ribos reikšmės.
3. Įtempių samplaikos koeficientas, kai plokštelės medžiaga deformuojasi tampriai, lygus k_{max} = 3,2 ir koeficiento reikšmė nepriklauso nuo skaičiavimo būdo.
4. Eksperimentinis įtempių samplaikos koeficientas mažėja esant plokštelės deformacijų geometriniam ir jos medžiagos fiziniam netiesiškumui nuo k_{max} = 3,2 iki k_{min} = 1,4.
5. Pavojingiausia nuokrypio vieta tamprioje ir tampriai plastinėje stadijose yra įdubos apybraiža.

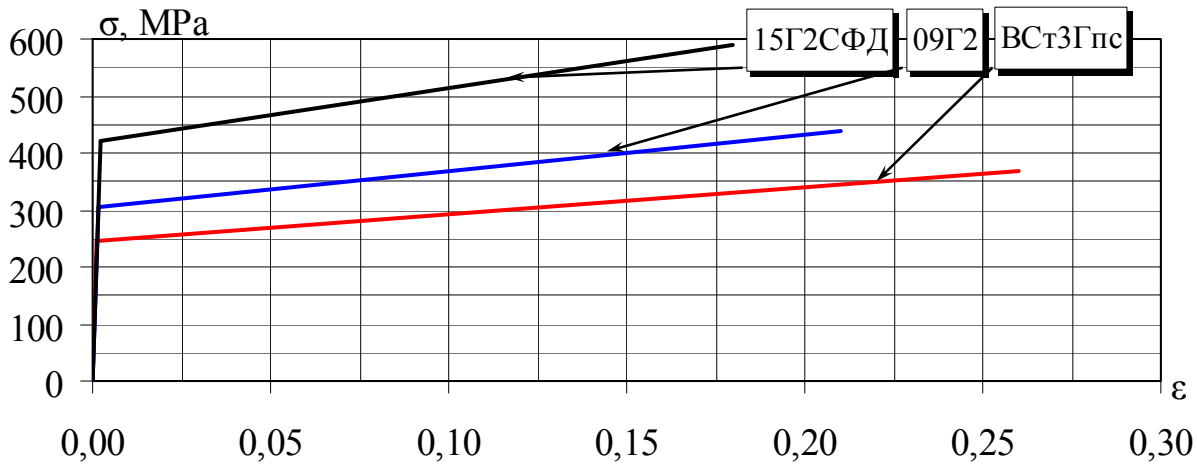
5. Talpyklos sienelės su geometriniu nuokrypiu baigtinių elementų metodo skaičiavimai įvertinant skirtingų statybinių plienų įtempių ir deformacijų dvitiesines diagramas. Apskaičiuotų įtempių samplaikos koeficientų regresinė analizė

Šiame skyriuje pateikti talpyklų sienelės su „minkštu“ nuokrypiu skaičiavimo rezultatai įvertinant skirtingų plienų įtempių ir deformacijų dvitiesines diagramas. Taip pat atlikta skaičiavimo rezultatų, įtempių samplaikos koeficientų reikšmių, regresinė analizė. Įtempių samplaikos koeficientus apskaičiuoti buvo taikoma standartinė BEM programa COSMOS/M. Duomenų statistinei analizei buvo taikoma programa „STATISTICA“. Skaičiavimuose atsižvelgiama į ketvirto ir penkto skyrių talpyklos sienelės su nuokrypiu netiesinių modelių skaičiavimo rekomendacijas.

Skaičiavimuose analizuojama talpykla su geometriniu pusiau rutuliniu nuokrypiu, kai talpyklos spindulys $R = 11{,}5$ m, aukštis $H = 12{,}0$ m, sienelės storis nuokrypio vietoje $t = 7$ mm, nuokrypio santykinis gylis $2 \le \gamma \le 16$, nuokrypio santykinis spindulys $1 \le \beta \le 5$. Analizuojamas pavojingiausias pusiau rutulinio nuokrypio viršutinis taškas „b“. BEM programoje buvo užduodamos ВСт3Гпс, 09Г2 ir 15Г2СФД plieno įtempių ir deformacijų dvitiesinės diagramos su būdingais rodikliais (10 lentelė), (59 pav.).

10 lentelė. Plieno įtempių ir deformacijų dvitiesinių diagramų būdingi rodikliai

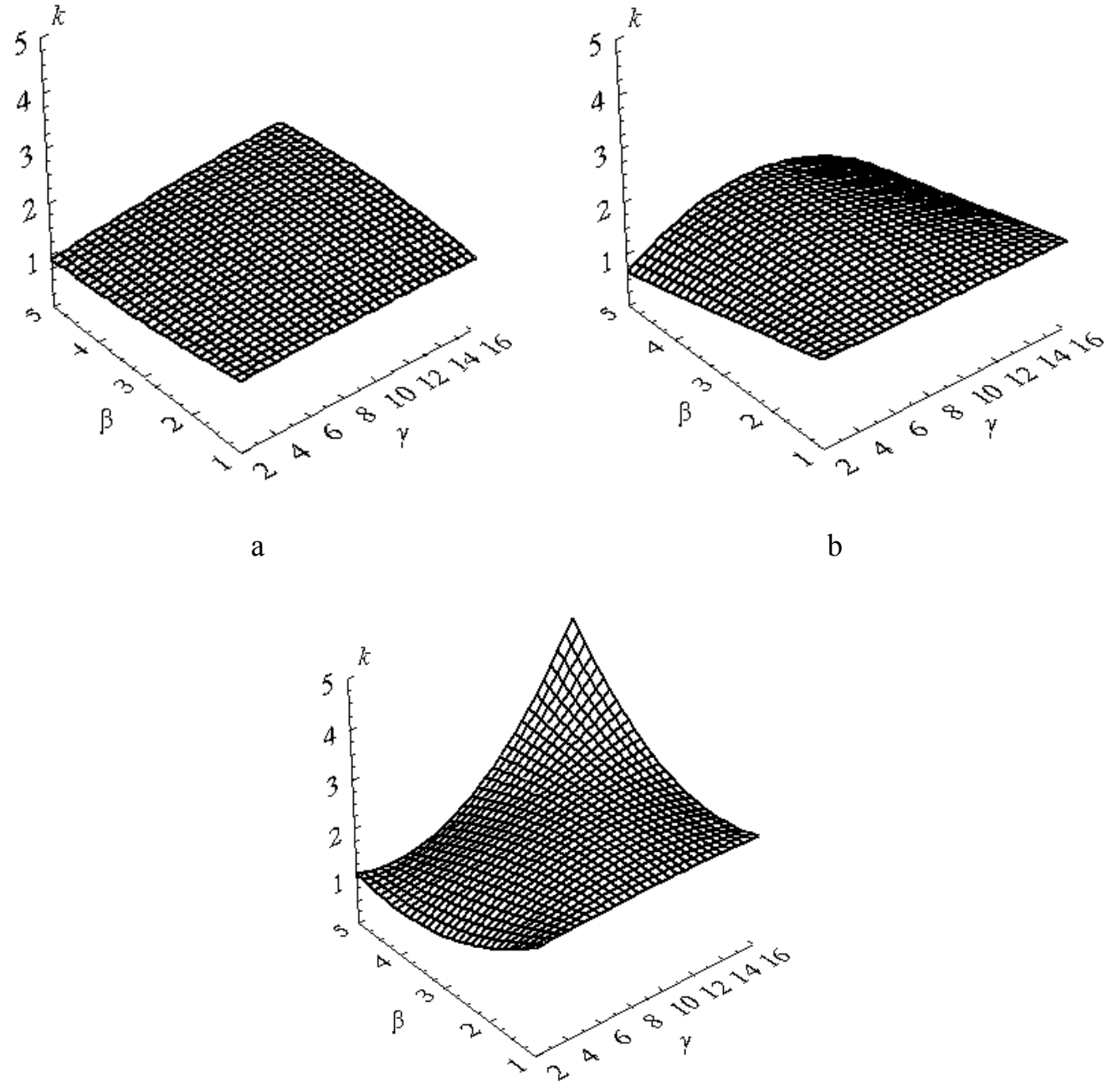
Plienas	**Stipris pagal takumo ribą $\sigma_{0,2}$, MPa**	**Santykinės deformacijos esant takumo ribai ε_y**	**Stipris pagal stiprumo ribą σ_u, MPa**	**Santykinės deformacijos irties metu, ε_u**	**Bandinio santykinis susiaurėjimas irties metu ψ, %**
ВСт3Гпс	245,0	0,00118	370	0,26	58,0
09Г2	305,0	0,00148	440	0,21	40,0
15Г2СФД	420,0	0,00203	590	0,18	37,0



59 pav. Tampriosios plastiškosios stiprėjančiosios medžiagos įtempių deformacijų diagrama, kai plienas ВСт3Гпс, 09Г2, 15Г2СФД

Skaičiavimo rezultatai, įtempių samplaikos koeficiento pasiskirstymas priklausomai nuo nuokrypio parametrų parodyti (60 pav.). Įtempių samplaikos koeficientų pasiskirstymo diagramos rodo, kad esant skirtingiems plienų mechaninėms savybėms koeficiento priklausomybė nuo nuokrypio parametrų skirtinga. Mažesnės klasės plienams, plienams su labiau išreikštoms plastinėms savybėmis, kai standartinio tempimo bandymo metu bandinio skerspjūvio susiaurėjimas sudaro apie $\psi = 60\ \%$, įtempių samplaikos koeficientas nežymiai priklauso nuo nuokrypio dydžių. Tuomet įtempių samplaikos koeficientas gali būti priimtas kaip nekintamas dydis ir visų vietinių nuokrypių atvejais lygus $k = 1{,}6$ (60a pav.). Įvertinant skaičiavimuose didesnės klasės plienus su labiau ribotoms plastinėms deformacijoms, kai standartinio tempimo bandymo metu bandinio skerspjūvio susiaurėjimas irties metu sudaro iki 40 %, įtempių samplaikos koeficientas turi aiškią priklausomybę nuo nuokrypių matmenų. Taigi paskutiniame atvejyje nuokrypio gylis ir spindulys negali būti atmesti. Esant plienams, kai bandinio susiaurėjimas irties metu sudaro $40\ \% \le \psi < 60\ \%$, įtempių samplaikos koeficientas didėja k didėjant įdubos gyliui nuo $\gamma = 2$ iki $\gamma = 10$. Toliau didėjant nuokrypio gyliui, $10 < \gamma$, įtempių samplaika mažėja. Didėjant nuokrypio spinduliui β, kaip ir plastingiems plienams, įtempių samplaika mažėja esant kiekvienam įdubos gyliui (60b pav.). Stipresniems plienams, kai $\psi < 40$, įtempių samplaikos koeficiento priklausomybė nuo įdubos gylio ir spindulio dar labiau

išryškėja ir įtempių koncentracija žymiai padidėja. Įdubos apybraižos viršutiniame taške įtempių samplaika ne mažiau pavojinga nei analizuojant „aštrius“ defektus, pvz., plyšius ir pan. Įtempių samplaikos koeficiento maksimali reikšmė $k = 4{,}5$, kai $\beta = 5, \gamma = 16$



a b

c

60 pav. Pusiau rutulinės įdubos veršutiniame apybraižos taške įtempių samplaikos koeficiento priklausomybė nuo defekto gylio γ ir spindulio β, kai plienas: ВСт3Гпс (a), 09Г2 (b), 15Г2СФД (c)

(60c pav.). Pateiktose įtempių samplaikos koeficientų diagramose (60 pav.) paviršiaus taškai apskaičiuoti taikant antro laipsnio polinomą (34) pagal gautus BEM rezultatus:

$$k=b_1+b_2\times\gamma+b_3\times\beta+b_4\gamma\beta+b_5\gamma^2+b_6\gamma^2\beta+b_7\beta^2+b_8\gamma\beta^2+b_9\gamma^2\beta^2, \qquad (34)$$

čia b_i – empiriniai koeficientai. Kai talpyklos sienutės plienas ВСт3Гпс, empiriniai koeficientai lygūs: b_1 = 1,639634; b_2 = -0,044860; b_3 = -0,351662; b_4 = 0,070349; b_5 = 0,000978; b_6= -0,002038; b_7 = 0,037028; b_8 = -0,009753; b_9 = 0,000325, kai sienutės plienas 09Г2 – b_1 = 2,210485; b_2 = -0,129926; b_3 = -0,532871; b_4 = 0,140519; b_5 = 0,007023; b_6 = 0,007593; b_7 = 0,022386; b_8 = 0,010593; b_9 = 0,000570; kai sienutės plienas 15Г2СФД – b_1 = 3,789377; b_2 = -0,352316; b_3 = -1,92810; b_4 = 0,471944; b_5 = 0,018287; b_6 = 0,024994; b_7 = 0,288727; b_8 = -0,088158; b_9 =0,005237. Polinominės funkcijos konstantos parinktos naudojant standartinę statistinę programą „STATISTICA“ taikant mažiausių kvadratų metodą. Rezultatų tikslumas sudaro 98,3% nuo BEM rezultatų.

Taip pat buvo atlikta visų gautų rezultatų regresinė analizė taikant mažiausių kvadratų metodą. Funkcija aprašanti BEM įtempių samplaikos koeficientų skaičiavimo rezultatus tokia:

$$k = b_1 + (b_2\gamma + b_3\beta + b_4\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_u} + b_5\gamma\beta\frac{\sigma_{0,2}}{\sigma_u})^{b_6}, \qquad (35)$$

čia γ – nuokrypio santykinis gylis; β – nuokrypio santykinis spindulys; $\sigma_{0,2}$ – plieno santykinė takumo riba; σ_B – plieno stiprumo riba; b_i – empiriniai koeficientai (b_1 = 1,308703; b_2 = -0,001217; b_3 = -0,012188; b_4 = 1,425072; b_5 = 0,001446; b_6 = 63,60652). Funkcijos rezultatų tikslumas sudaro 88,6 % nuo BEM rezultatų.

6. Pagrindiniai tyrimų rezultatai ir baigiamosios išvados

1. Aliktais tyrimais įrodyta, kad talpyklų geometrinius nuokrypius reglamentuojančiose standartuose pateikiami apribojimai turi būti tikslinami skirstant įdubas pagal nuokrypių išdėstymą, pavidalus, vietą, talpyklų konstrukcijas ir pan. Todėl juose siūlomos sienelės įdubų įvertinimo metodikos turi būti tobulinamos.
2. Sienelės įdubas siūloma klasifikuoti pagal pavidalus į tris grupes: pusiau rutulio, kūginius ir nupjautuosius kūginius nuokrypius.
3. Skaičiavimais nustatytas pavojingiausias įdubos pavidalas – nupjautasis kūginis nuokrypis.
4. Pasiūlyta talpyklos sienelės įdubos teorinių įtempių samplaikos koeficientų skaičiavimo metodika, įvertinanti tris galimu įdubų pavidalus, atsižvelgiant į talpyklos ir nuokrypių geometriją.
5. Darbe ištirtas talpyklos sienelės su įduba įtemptasis deformuotasis būvis:
   - nustatyti charakteringieji įdubų taškai: vidurinis taškas, viršutinis įdubos apybraižos taškas ir šoninis įdubos apybraižos taškas. Parodyti esminiai įtemptojo deformuotojo būvio skirtumai analizuojamuose taškuose;
   - nustatyta įdubos ekstreminio taško padėtis. Tai yra viršutinis įdubos apybraižos taškas.
6. Sukurta plieninės plokštės su įduba įtemptojo deformuotojo būvio analizės metodika, pagrįsta eksperimentiniu ir skaitiniu metodais.
7. Tyrimais nustatyta, kad maksimali plokštelės įdubos įtempių samplaikos koeficiento reikšmė $k_{max} = 3,2$, kai plokštelės medžiaga deformuojasi tampriai.
8. Tyrimais nustatyta, kad plokštelės įdubos eksperimentinis įtempių samplaikos koeficientas mažėja, įvertinant plieno tampriosios plastiškosios stiprėjančiosios medžiagos modelį ir plokštelės įdubos deformacijų netiesiškumą nuo $k_{max} = 3,2$ iki $k_{min} = 1,4$.
9. Nustatyta, kad pavojingiausia plokštelės įdubos vieta yra įdubos apybraiža.
10. Nustatyta plokštelės su įduba deformacijos seka iki jos irties.

11. Laboratorijoje atlikto plonos plokštelės eksperimentinio tyrimo rezultatai patvirtino talpyklos sienelės su įduba skaitinio modelio tinkamumą.
12. Sukurta talpyklos sienelės pusiau rutulio formos įdubos įtempių samplaikos koeficientų skaičiavimo metodika, įvertinanti skirtingų plienų tampriosios plastiškosios stiprėjančiosios medžiagos modelius ir sienelės deformacijų netiesiškumą.
13. Sukurta talpyklos sienelės segmento su įduba skaičiavimo metodika, įvertinanti nuokrypių geometriją ir tikrąjį mechaninį būvį.
14. Sukurtas praktinis įdubos pavojingumo vertinimo metodas naudojant įtempių samplaikos koeficientus.

LITERATŪROS SĄRAŠAS

1. Aliphanov, L. A.; Moskvichev, V. V. The Mode of Deformation of Storage Tanks with Shape Defects. *Computation Technology*, Vol 7, 2002, p. 16–22.
2. American National Standard, ANSI/API STD. 620: Design and Construction of Large, Welded, Low-Pressure Stirage Tanks. Eighth Edition, 1990. 90 p.
3. American National Standard, ANSI/API STD. 650: Welded Steel Tanks for Oil Storage, Final draft, 1993. 182 p.
4. ASME B31.8 and ASME B31.8a: Gas Transmission and Distribution Piping System, 1991. 89 p.
5. Atkočiūnas, J.; Nagevičius, J. Tamprumo teorijos pagrindai. Vadovėlis. Vilnius: Technika, 2004. 528 p.
6. Barauskas, R.; Belevičius, R.; Kačianauskas, R. Baigtinių elementų metodo pagrindai. Vadovėlis. Vilnius: Technika, 2004. 612 p.
7. Bannikov, D.; Kazakevitch, M. Design problems of steel bunkers. In: Proceedings of the XIIth International Conference Theoretical Foundations of Civil Engineering. Ed. By Szczesniak, OW PW, Warsaw, 2004, p. 559–564.
8. Bielewicz, E. and Gorski, J. Reliability of imperfect structure (simple non-linear models). *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol VIII, No 2. Vilnius: Technika, 2002, p. 83–87.
9. Broek, D. The Practical Use of Fracture Mechanics. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1989. 522 p.
10. BS 2654: 1989. British Standard Specification for Manufacture of vertical steel welded non-refrigerated storage tanks with butt-welded shells for the petroeum industry.British Standards Institution, 1989. 90 p.
11. Chaboche, J. L. Equations for Cyclic Plasticity and Cyclic Viscoplasticity, International Journal of Plasticity, Vol 7, 1989, p. 247–302.
12. Chaboche, J. L. On Some Modifications of Kinematic Hardening to Improve the Description of ratcheting Effects, *International Journal of Plasticity*, Vol. 7, 1991, p. 661–678.

13. Cosham, A. and Hopkins, P. The effect of dents in pipelines-guidance in the pipeline defect assessment manual. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol 81, 2004, p. 127–139.
14. COSMOSM. User's Guide. 2002. 1289 p.
15. Daniel, C. B. A numerical study on the lateral indentation of continuously supported tubes. *Journal of Constructional Steel Research*. No 60, 2004, p. 1177–1192.
16. European Recommendations For Structural Stability. ECCS-Technical Committee 8, Technical Working Group 8.4: Buckling of steel shells, stability of shells, 4th Edition, 1988. 82 p.
17. European Standard, ENV 1993-1-6 (Eurocode 3): Design of steel structures. Part 1–6: General rules. Supplementary rules for the shell structures, Final draft 1999. 82 p.
18. Farkas, J.; Jarmai, K. Optimum design of a welded stringer-stiffened cylindrical steel shell loaded by bending. In: Proceedings of the International Conference Eurosteel, Vol A, 2005, p. 1.3-15–1.3-22.
19. Gavrylenko, G.; Matsner, V. Stability and carrying capacity stiffened shells having axisymmetrical dents. In: Proceedings of the XIIth International Conference Theoretical Foundations of Civil Engineering. Ed. By Szczesniak, OW PW, Warsaw, 2004, p. 629–636.
20. German Design Code, DIN 18800: Steel structures. Buckling failure of the shell. (Stahlbauten. Stabilitätsfalle, Schalenbeulen), Vol 4, 1990. 248 p.
21. Gettel, M.; Schneider, W. Equivalent geometric imperfections for the numerical buckling strength verification of steel shell structures subject to shear. In: Proceedings of the International Conference Eurosteel, Vol A, 2005, p. 1.3-7–1.3-14.
22. Gorochov, Y.; Muschanov, V.; Kulik, A. and Tsyplukhin, A. Vertical cylindrical tank with angular geometrical imperfection. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol 11, No 3. Vilnius: Technika, 2005, p. 175–183.
23. Greiner, R. and Derler, P. Effect of Imperfections on Wind-Loaded Cylindrical

Shells. *Thin-Walled Structure*, No 23, 1995, p. 271–281.

24. Hornung, U. and Saal, H. Buckling loads of tank shells with imperfections. *International Journal of Non-linear Mechanics*, No 37, 2002, p. 605–621.
25. Hutchincon J. W., Tennison R. S., Muggeridge D. B. Effect of a local axisymmetric imperfection on the bucking behavior of a circular cylindrical shell under axial compression. *AIAA journal*, Vol. 9, No. 1, 1971, p. 48–52.
26. Kačianauskas, R. The semi-analytical finite elements and their application to modelling of cylindrical shells. Statyba - *Civil Engineering Строительство*, Vol 1, No 9. Vilnius: Technika, 1997, p. 39–48.
27. LST L ENV 1991-4, Eurokodas 1. Projektavimo pagrindai ir poveikiai konstrukcijoms. 4 dalis. Silosų ir rezervuarų poveikiai. Vilnius: LSD, 2000. 49 p.
28. LST L ENV 1993-1-6. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-6 dalis. Bendrosios taisyklės. Kevalinių konstrukcijų papildomos taisyklės. Vilnius: LSD, 2002. 82 p.
29. LST L ENV 1993-4-1, Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 1-4 dalis. Silosai, rezervuarai ir vamzdynai. Silosai. Vilnius: LSD, 2002. 98 p.
30. LST L ENV 1993-4-2, Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 4–2 dalis. Silosai, rezervuarai ir vamzdynai. Rezervuarai. Vilnius: LSD, 2002. 49 p.
31. LST L ENV 1993-4-3, Eurokodas 3. Plieninių konstrukcijų projektavimas. 4-3 dalis. Silosai, rezervuarai ir vamzdynai. Vamzdynai. Vilnius: LSD, 2002. 31 p.
32. LST L ENV 1998-4, Eurokodas 8. Atsparių žemės drebėjimui konstrukcijų projektavimas. 4 dalis. Silosai, rezervuarai ir vamzdynai. Vilnius: LSD, 2002. 65 p.
33. LST EN 10002-1, EN 10002-1:2001. Metalai. Tempimo bandymas. 1 dalis. Bandymo metodas aplinkos temperatūroje. Vilnius: LSD, 2003. 56 p.
34. Operating instructions. ALMEMO 5590-2. 1997. 11 p.
35. Operating instructions. DIGICON 2000, Microprocessor Controller. 2000. 27 p.
36. Operating instructions. PROTEUS, Material-Testing Software for Building Industries under Windows 95/98/NT/2000/XP for Cement, Mortar, Concrete and other Building Materials. 1999. 74 p.
37. Pircher, M.; Berry, P. A.; Ding, X. and Bridge, R. Q. The shape of circumferential

weld-induced imperfections in thin-walled steel silos and tanks. *Thin-Walled Structure*, No 39, 2001, p. 999–1014.

38. Pircher, M.; Bridge, R. The influence of circumferential weld-induced imperfections on the buckling of silos and tanks. *Journal of Constructional Steel Research*, No 57, 2001, p. 569–580.
39. Saide, P. Theoretical Manual for COSMOS/M. – Santa Monica, California: Structural Research and Analysis Corporation, 1993. 160 p.
40. Samsam Shariat, B. A.; Javaheri, R.; Eslami, M. R. Buckling of imperfect functionally graded plates under in-plane compressive loading. *Thin-Walled Structures*, Vol 43. Amsterdam: Elsevier, 2005, p. 1020–1036.
41. Schneider, W.; Timmel, I.; Karsten, H. The conception of quasi-collapse-affine imperfections: A new approach to unfavourable imperfections of thin-walled shell structures. *Thin-Walled Structures*, Vol 43. Amsterdam: Elsevier, 2005, p. 1202–1224.
42. STR 2.05.04:2003. Poveikiai ir apkrovos. Vilnius: Aplinkos ministerija, 2003. 108 p.
43. ST 2152006.02: 2000. Statybos taisyklės. Specialūs montavimo darbai. Vilnius: Montuotojas, 2000. 254 p.
44. Teng, J. G; Lin, X. Fabrication of small models of large cylinders with extensive welding for buckling experiments. *Thin-Walled Structures*, Vol 43. Amsterdam: Elsevier, 2005, p. 1091–1114.
45. Vanlaere, W.; Lagae, G.; Impe, R V.; Buffel, P. Stringer stiffened cylinders on local supports. In: Proceedings of the International Conference Eurosteel, Vol A, 2005, p. 1.3-1–1.3-6.
46. Winterstetter, Th. A. and Schmidt, H. Stability of circular cylindrical steel shells under combined loading. *Thin-walled Structure*, No 40, 2002, p. 893–909.
47. Zhao, Y.; Teng, J. G. Buckling experiments on steel silo transition junctions I: Experimental results. *Journal of constructional Steel Research*, Vol 60, 2004, p. 1783–1801.

48. Алифанов, Л. А. Анализ опасности дефектов формы вертикальных цилиндрических резервуаров. Тр. I Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата, № 5. Якутск: ЯФ СО РАН, 2002, с. 70–73.
49. Алифанов, Л. А.; Лепихин, А. М. Влияние местных прогибов окрайков днищ вертикальных цилиндрических резервуаров на искажение их геометрической формы. Труды научных мероприятий „Природно-техногенная безопасность Сибири“, № 2. Красноярск: КГТУ, 2001, с. 139–141.
50. Алифанов, Л. А.; Москвичев, В. В. Использование критерия Вилкоксона для анализа статистических данных по локальным несовершенствам формы стенок нефтехранилищ. *Вестник КрасГАСА*, № 5. Красноярск: КрасГАСА, 2002, с. 56–62.
51. Алифанов, Л. А.; Засухин С. А. К вопросу о напряженно-деформированном состоянии в зоне вмятин, расположенных на стенках вертикальных цилиндрических резервуаров. Тез. докл. XX региональной науч.-тех. конф. „Проблемы архитектуры и строительства“. Красноярск: КрасГАСА, 2002, с. 50–52.
52. Алифанов, Л. А.; Матюшенко, В. А. К вопросу о причинах, вызывающих деформацию стенок вертикальных цилиндрических резервуаров. Тез. докл. краевой межвуз. науч. конф. „Интеллект – 2002“. Красноярск: 2002, с. 180–181.
53. Алифанов, Л. А.; Лепихин, А. М.; Воротилин, Ю. П.; Загорский, И. А. Моделирование напряженно-деформированного состояния аварийного резервуара РВС5000. Транспортные средства Сибири: Межвуз. сб. науч. тр. с междунар. Участием, № 7. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2001, с. 395–398.
54. Алифанов, Л. А.; Москвичев, В. В. Моделирование напряженно-деформированного состояния и определение остаточного ресурса резервуара РВС-20000 с деформированной стенкой. Транспортные средства Сибири: Межвуз. сб. науч. тр. с междунар. Участием, Вып. 8 Красноярск: ИПЦ КГТУ. 2002, с. 205–209.

55. Алифанов, Л. А. Нормирование дефектов формы и ресурса вертикальных цилиндрических резервуаров. Красноярская Архитектурно-Строительная Академия, диссертация на соискание ученой степени к.т.н., 2004. 165 p.
56. Алифанов, Л. А.; Воротилин, Ю. П.; Загорский, И. А.; Лепихин, А. М. Оценка распределения величин, характеризующих неравномерную осадку вертикальных цилиндрических резервуаров. Труды научных мероприятий „Природно-техногенная безопасность Сибири“, № 2. Красноярск: КГТУ, 2001, с. 133–139.
57. Алифанов, Л. А.; Лепихин, А. М. Оценка распределений, связанных с локальными дефектами формы стальных резервуаров. Тезисы докладов V Всерос. научной конф., посвящ. памяти генеральн. конструктора ракетно-космич. систем, проводимой в составе 1-го Международного Сибирского Авиакосмического салона „САКС-2001“. 1-4 дек., 2001, г. Красноярск/САА. Красноярск: 2001, с. 174–175.
58. Алифанов, Л. А. Ресурс вертикальных цилиндрических резервуаров с локальными дефектами формы. Достижения науки и техники – развитию сибирских регионов: Материалы Всероссийской научно-практической конференции, № 1. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003, с. 145–146.
59. Алифанов, Л. А.; Засухин, С. А.; Матюшенко, В. А. Численный эксперимент по исследованию статического напряженного состояния резервуаров с вмятинами. Тез. докл. краевой межвуз. науч. конф. „Интеллект – 2002“. Красноярск. 2002, с. 178–180.
60. Аль, М. А. Динамика стальных вертикальных цилиндрических резервуаров при сейсмических воздействиях с учетом локальных геометрических несовершенств их курпусов. Московский Государственный Строительных Университет, автореферат дисертации на соискание ученой степени к.т.н., 1994. 17 p.
61. Баранчук, Д. Подключение трубопроводов к стенке резервуара. *Монтажные и Специальные Работы в Строительстве*, № 1, 2001, с. 19–22.

62. Барзилович, Д. В.; Радыш, Ю. В.; Киреев, А. С. Совершенствование диагностики и прогнозирования надежности нефтерезервуаров. *Монтажные и Специальные Работы в Строительстве*, № 1, 2001, с. 23–26.
63. Басов, К. А. ANSYS в примерах и задачах. Москва: КомпьютерПресс, 2002. 224 с.
64. Беляев, Б. Ф.; Галканов, В. А.; Кулахметьев Р. Р. Назначение проектной толщины основных элементов металлоконструкций резервуаров для нефти и нефтепродуктов. *Промышленное и Гражданское Строительство*, № 5, 1999, с. 25–27.
65. Бордубанов, В. Г. Оценка несущей способности цилиндрических сосудов давления с поверхностными дефектами при однократном статическом нагружении. Kaunas: Каунаский Технологический Унивеститет, 1986. 20 с.
66. Грудев, И. Д. Нелинейный краевой эффект в вертикальном цилиндрическом резервуаре. *Промышленное и Гражданское Строительство*, № 5, 1999, с. 23–24.
67. Документ по стандартизации металлических конструкций, СТО 0030-2004: Резервуары вертикальные цилиндрические стальные для нефти и нефтепродуктов. Правила технического диагностирования, ремонта и реконструкции. Москва: 2004. 43 с.
68. Зайнуллин, Р. Х. Безопасная эксплуатация цилиндрических сосудов с дефектами типа „вмятина“. Казань: Казанский Государственный технологический университет, 2000. 17 р.
69. Зюлко, Е.; Ковальски, Д. Ремонт стального резервуара в трудных локальных условиях, № 7-8, 1998, с. 26–28.
70. Иванов, С. Н.; Голубева, Н. В.; Родионов, Н. В.; Плаксин, Ю. В. Влияние технологических несовершенств на безопастную эксплуатацию резервуаров. *Промышленное и Гражданское Строительство*, No 5, 1998, с. 27–28.
71. Кандаков, Г. П.; Кузнецов, В. В.; Лукиенко, М. И. Анализ причин аварий вертикальных цилиндрических резервуаров. *Трубопроводный Транспорт*, № 5, 1994, с. 15–16.

72. Катанов, А. А.; Майлер, А. З.; Поповский Б. В. Техническое обследование нефтерезервуаров и компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния дефектов конструкций, № 7–8, 1998, с. 22–25.
73. Копысицкая, Л. Н.; Лихман, В. В.; Муратов В. М. Инженерный метод расчета напряженно-деформированного состояния сварных цилиндрических резервуаров с уводом кромок. *Химическое и Нефтяное Машиностроение*, № 10, 1989, с. 15–18.
74. Лащенко, М. Н.; Аварии металлических конструкций зданий и сооружений. Ленинград: Стройиздат, 1969. 184 с.
75. Лессинг, Е. Н.; Лилеев, А. Ф.; Соколов, А. Г. Листовые металлические конструкции. Москва: Литература по строительству, 1970. 488 с.
76. Лихман, В. В.; Копысицкая, Л. Н.; Муратов, В. М. Концентрация напряжений в резервуарах с локальными несовершенствами формы. *Химическое и Нефтяное Машиностроение*, № 6, 1992, p. 22–24.
77. Лихман, В. В.; Копысицкая, Л. Н.; Муратов, В. М. Прочность сварных резервуаров с несовершенствами формы при малоцикловом нагружении. *Проблемы Прочности*, № 11–12, 1995, с. 130–136.
78. Лялин, К. В. Некоторые аспекты совершенствования конструкции и технологии сборки и сварки цилиндрических резервуаров. *Монтажные и Специальные Работы в Строительстве*, № 7, 1997, с. 10–12.
79. Маньшин, Н. Н. Проектирование резервуаров больших объемов. VIII Украинская научно-техническая конференция «Металлические конструкции: взгляд в прошлое и будущее». Киев, Окт. 18–22, 2003. Доклады конференции. 2004, p. 74–80.
80. Мухин, В. Н.; Эльманович, В И. Расчетная и экспериментальная оценка влияния локальных вмятин на прочность корпусов сосудов и аппаратов. *Химическое и Нефтяное Машиностроение*, № 6, 1991, с. 24–26.
81. Махутов, Н. А.; Скакунов, М. Г.; Чупилко, С. И.; Черняков, С. В. Оценка прочности и ресурса элемента сферического резервуара при циклическом

нагружении. *Проблемы Машиностроения и Автоматизации*, № 41, 1991, с. 61–68.

82. Морозов, М. Применение программы NozzlePro для расчета аппаратов и трубопроводов. САПР и графики, май, 2004, с. 79–85.
83. Проблемы разрушения, ресурса и безопастности систем. Сборник научных трудов. Красноярск: Ассоциация КОДАС-СибЭРА, 1997. 520 с.
84. Поповский, Б. В. Резервуаростроение начала XXI века. *Монтажные и Специальные Работы в Строительстве*, № 1, 2001, с. 11–19.
85. Поповский, Б. В.; Джур, Ю. Ф. Этапы решения задачи сборки вертикальных стыков стенок резервуаров. Монтажные и специальные работы в строительстве, № 10, 2000, с. 4–7.
86. РД-08-95-95: Положение о системе технического диагностирования сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов, окончательный проект, 1995. 35 с.
87. Рекомендации по определению коэффициентов концентрации напряжений и деформаций для сварных соединений листовых строительных металлоконструкций. Москва: ЦНИИПСК, 1980. 16 с.
88. СНиП III-18-75. Правила производства и приемки работ. Металлические конструкции. Москва: Стройиздат, 1976. 157 с.
89. СНиП II-23-81*. Нормы проектирования. Стальные конструкции. Москва: Центральный институт типового проектирования, 1990. 98 с.
90. СНиП 3.03.01-87. Нормы проектирования. Несущие и ограждающие конструкции. Москва: Государственный строительный комитет, 1988. 90 с.
91. Сорокина, В. Г.; Гервасьева, М. А. Стали и сплавы. Москва: Интермет инжиниринг, 2001. 608 с.
92. Тарасенко, А. А.; Николаев, Н. В.; Хоперский, Г. Г.; Овчар, З. Н.; Саяпин, М. В. Исследование влияния приемораздаточных патрубков на напряженно-дефформированное состояние стенки вертикальных цилиндрических резервуаров. *Нефть и Газ*, № 1, 1998, с. 80–85.

93. Тарасенко, А. А.; Пимнев, А. Л. Оценка минимальной толщины стенки при диагностике резервуаров в США и России. *Нефть и Газ*, № 2, 2001, с. 78–82.
94. Тарасенко, А. А.; Саяпин, М. В. Результаты статистической обработки измерений неравномерных осадок наружного контура днища вертикальных стальных резервуаров. *Нефть и Газ*, № 1, 1999, с. 52–56.
95. Тимошенко, С. П.; Войновский-Кригер, С. Пластинки и оболочки. Москва: Физматгиз, 1963. 636 с.
96. Физдель, И. А. Дефекты и методы их устранения в конструкциях и сооружениях. Москва: Стройиздат, 1970. 176 с.
97. Хоперский, Г. Г.; Овчар, З. Н.; Тарасенко, А. А.; Николаев, Н. В. Определение неравномерной составляющей осадки резервуаров, вызывающей неосесимметричную деформацию. *Нефть и Газ*, № 5, 1997, с. 80–85.
98. Хоперский, Г. Г.; Саяпин, М. В.; Тарасенко, А. А.; Николаев, Н. В. Принцип независимости действия сил при расчете напряженно-деформированного состояния стенки резервуаров. *Нефть и Газ*, № 1, 1998, с. 80–85.
99. Швырков, С. А.; Семиков, В. Л.; Швырков, А. Н. Анализ статистических данных разрушений резервуаров. Научно-теоретические и инженерно-технические разработки, No 5, 1996, с. 39–50.
100. Якубовский, В. В.; Мельник, С. А. Эксплуатационная нагруженность и малоцикловая долговечность сварных соединений крупногабаритных резервуаров для нефтепродуктов. *Автоматическая Сварка*, № 5, 1991, с. 6–11.

Autoriaus publikacijų disertacijos tema sąrašas

101. Aliphanov, L. A.; Romanenko, K.; Moskvichev, V. V.; Lepikhin, A. M.; Samofalov, M. Analysis of geometrical shape defects of a steel cylindrical tank wall by numerical and analytical methods. In: Abstracts of the 8th International Conference „Modern Building Materials, Structures and Techniques“. Vilnius: Technika, 2004, p. 287–288.

102. Aliphanov, L. A.; Romanenko, K.; Moskvichev, V. V.; Lepikhin, A. M. and Samofalov, M. Analysis of geometrical shape defects of a steel cylindrical tank wall by numerical and analytical methods. In: Proc of the 8th International Conference „Modern Building Materials, Structures and Techniques“. Selected papers. Ed by E. K. Zavadskas, P. Vainiūnas and F. M. Mazzolani. Vilnius: Technika, 2004, p. 334–342.
103. Aliphanov, L. A.; Romanenko, K.; Samofalov, M. FEM application in geometrically non-linear analysis of local shape defects on steel cylindrical tank walls. In: International conf „17th Nordic Seminar on Computational Mechanics“. Stockholm, Oct 15–16, 2004. Proc of conference. Stockholm: 2004, p. 90–93.
104. Rasiulis, K.; Samofalov, M.; Šapalas, A. Application of the non-linear fe models to estimate effect of soft defects on thin walls of steel cylindrical tanks. *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol XII, No 2. Vilnius: Technika, 2006, p. 169–179.
105. Rasiulis, K.; Samofalov, M.; Šapalas, A. Stress and strain state investigation of soft defects on thin steel plate using experimental and numerical methods. Mechanika, Vol 59, No 3. Kaunas: Technologija, 2006, p. 5–13.
106. Rasiulis, K.; Samofalov, M.; Šapalas, A. Stress strain state investigation of soft defects on the thin steel plate by using experimental method. Proceedings of the 11th international conference „Mechanika 2006“. Kaunas: Technologija, 2006, p. 283–288.
107. Rasiulis K.; Šapalas A.; Vadlūga R.; Samofalov M. Stress/strain state investigations for extreme points of thin wall cylindrical tanks. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol 62. 2006 m, p. 1232–1237.
108. Romanenko, K.; Samofalov, M.; Šapalas, A.; Aliphanov, L.A. Linear and physical non-linear stress state analysis of local shape defects on steel cylindrical tank walls by the finite element method. *Mechanika*, Vol 46, No 2. Kaunas: Technologija, 2004, p. 5–13.
109. Romanenko, K.; Šapalas, A.; Kvedaras, A. K.; Samofalov, M. Physical and

geometrical non-linearity in stress/strain state FE analysis of thin walled structures. In: International conference „17th Nordic Seminar on Computational Mechanics“. Stockholm, Oct 15–16, 2004. Proc of conference. Stockholm: 2004, p. 179–182.

110. Romanenko, K. Plieninių ritinio pavidalo talpyklų sienutės geometrinių defektų analizė skaitiniais ir analitiniais metodais. 7-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos, „Lietuva be mokslo-Lietuva be ateities“ įvykusios Vilniuje 2004m. kovo 25–26d., medžiaga. Vilnius: Technika, 2004, p. 301–307.
111. Romanenko, K.; Samofalov, M.; Šapalas, A.; Aliphanov L. A. Plieninių ritinio pavidalo talpyklų sienutės vietinių defektų mechaninio būvio tiesinė ir fiziškai netiesinė analizė baigtinių elementų metodu. Tarptautinės konferencijos „Mechanika-2004“ pranešimų medžiaga. Kaunas: Technologija, 2004, p. 56–61.
112. Romanenko, K.; Samofalov M. Plonasienių indų vietinių minkštųjų defektų analizė ir vertinimas. 10-osios tarptautinės konferencijos „Mechanika“ medžiaga. Kaunas: Technologija, 2005, p. 17–23.
113. Romanenko, K.; Samofalov, M. Ritinio pavidalo plieninės talpyklos mechaninio būvio ties liukais skaitinis modeliavimas. Tarptautinės konferencijos „Mechanika-2003“ pranešimų medžiaga. Kaunas: Technologija, 2003, p. 339–344.
114. Алифанов, Л. А.; Лепихин, А. М.; Москвичев, В. В.; Романенко К. Обоснование допусков на глубину вмятин на стенках вертикальных стальных резервуаров. VII Всероссийская научная конференция „Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф“. Красноярск, Окт. 13–17, 2003. Доклады конференции. 2003, p. 11–19.

A priedas. PLIENINIŲ ANTŽEMINIŲ RITININIŲ STAČIŲJŲ TALPYKLŲ SIENELĖS VIETINIŲ GEOMETRINIŲ NUOKRYPIŲ ĮTEMPIŲ SAMPLAIKOS KOEFICIENTO SKAIČIUOSENA

1. Pradiniai duomenys:

Talpyklos geometrinis aukštis, m: $H = 12,0$

Talpyklos naudingas aukštis, m: $h = 11,7$

Talpyklos spindulys, m: $R = 11,5$

Talpyklos sienelės storis nuokrypio vietoje, m: $t = 0,009$

Produkto tūrinis svoris, kN/m^3: $\rho = 8,0$

Atstumas nuo talpyklos apačios iki nagrinėjamojo taško, m: $x = 1,0$

Nuokrypio pavidalas: pusiau rutulinis

Nuokrypio gylis, m: $f = 0,021$

Nuokrypio spindulys, m: $r = 0,851$

Sienelės plieno takumo charakteringoji riba, kai plieno markė 09Г2, MPa:

f_y=305

Sienelės plieno stiprumo charakteringoji riba, kai plieno markė 09Г2 MPa:

f_u=440

Medžiagos dalinis koeficientas pagal takumo ribą: γ_{My}=1,5

Medžiagos dalinis koeficientas pagal stiprumo ribą: γ_{Mu}=2,6

Talpyklos sienelės darbo sąlygų koeficientas: γ_c=0,8

Produkto dalinis patikimumo koeficientas: γ_q=1,3

2. Medžiagos stiprio pagal takumo ribą skaičiuojamoji reikšmė:

$$f_{y,d} = \frac{f_y}{\gamma_{My}} = 203,3 \text{ MPa}.$$

3. Medžiagos stiprio pagal stiprumo ribą skaičiuojamoji reikšmė:

$$f_{u,d} = \frac{f_u}{\gamma_{Mu}} = 169,2 \text{ MPa}.$$

4. Nuokrypio santykinis spindulys skaičiuojamas pagal formulę:

$$\beta(r, R, t) = \frac{r}{\sqrt{R\,t}} = 2{,}6\,.$$

5. Nuokrypio santykinis gylis skaičiuojamas pagal formulę:

$$\gamma(f, t) = \frac{f}{t} = 2{,}3\,.$$

6. Sienelės žiediniai įtempiai be nuokrypio poveikio:

$$\sigma_{y,d} = \frac{\gamma_q \rho(h-x)R}{\gamma_c t} = 177{,}7 \text{ Mpa.}$$

7. Teorinis įtempių samplaikos koeficientas pavojingiausiame nuokrypios apybraižos taške (7 lentelė):

$$K_b(\beta, \gamma) = 3{,}1\,.$$

8. Sienelės žiedinių įtempių didėjimas dėl geometrinio nuokrypio pusiau ritininio pavidalo įdubos poveikio:

$$\sigma_y^t = K_b \times \sigma_{y,d} = 550{,}5 \text{ Mpa.}$$

9. Tikrinama sąlyga:

   jei $\sigma_y^t > f_{min,d}$ $\Rightarrow$ žiediniai įtempiai perskaičiuojami įvertinant tikrąjį įtempių samplaikos koeficientą pagal (35) formulę;

   jei $\sigma_y^t < f_{min,d}$ $\Rightarrow$ sienelė su nuokrypiu gali būti naudojama be remonto ir eksploatacinių ribojimų.

10. Tikrasis įtempių samplaikos koeficientas pavojingiausiame nuokrypio apybraižos taške skaičiuojamas pagal formulę:

$$k_b = b_1 + (b_2\gamma + b_3\beta + b_4\frac{f_y}{f_d} + b_5\gamma\beta\frac{f_y}{f_d})^{b_6} = 1{,}4\,.$$

11. Sienelėje žiediniai įtempiai įvertinant sienelės su nuokrypiu deformacijų netiesiškumą ir medžiagos fizinį netiesiškumą:

$$\sigma_y^f = k_b \times \sigma_{y,d} = 248{,}8 \text{ MPa.}$$

12. Tikrinama sąlyga:

jei $\sigma_y^f < f_{min,d} \Rightarrow$ įtempiai neviršija leistinų įtempių apskaičiuojamas talpyklos sienelės resursas;

jei $\sigma_y^f > f_{min,d} \Rightarrow$ įtempiai viršija leistinų įtempių reikalingas statinio defektuotos dalies remontas.

B priedas. TALPYKLOS SIENELĖS FRAGMENTO SU NUOKRYPIU BEM PROGRAMOS COSMOS2M TEKSTINIOS BYLOS PAVYZDYS (TAMPRUSIS SKAIČIAVIMAS)

PARASSING,F,REAL,0.021	PARASSING,T1,REAL,0.007
PARASSING,BE1,REAL,0.004	PARASSING,T2,REAL,0.007
PARASSING,BE2,REAL,0.100	PARASSING,T3,REAL,0.007
PARASSING,BE3,REAL,0.015	PARASSING,T4,REAL,0.007
PARASSING,BE4,REAL,0.020	PARASSING,T5,REAL,0.007
PARASSING,L1,REAL,0.283	PARASSING,P1,REAL,120
PARASSING,L2,REAL,0.283	PARASSING,P2,REAL,113
PARASSIGN,L3,REAL,0.283	PARASSING,P3,REAL,98
PARASSIGN,L4,REAL,0.283	PARASSING,P4,REAL,75
PARASSING,L5,REAL,0.1	PARASSING,K1,REAL,15
PARASSING,L6,REAL,0.1	PARASSING,K2,REAL,15
PARASSING,L7,REAL,0.1	PT,1,0,0,0
PARASSING,L8,REAL,0.1	PTGEN,1,1,1,1,0,R1,0,0
PARASSING,L9,REAL,(L1)/2	PTGEN,1,2,2,1,0,R2,0,0
PARASSING,L10,REAL,(L2)/2	PTGEN,1,3,3,1,0,R3,0,0
PARASSING,L11,REAL,(L3)/2	CRLINE,1,2,3
PARASSING,L12,REAL,(L4)/2	CRLINE,2,3,4
PARASSING,L13,REAL,(L1)-(0.1)	PLANE,Y,0,1
PARASSING,L14,REAL,(L2)-(0.1)	SFSWEEP,1,2,1,Y,K1,1
PARASSING,L15,REAL,(L3)-(0.1)	SFSWEEP,3,6,3,Y,K2,1
PARASSING,L16,REAL,(L4)-(0.1)	SFEXTR,5,10,5,Y,H1
PARASSING,L17,REAL,(L1)+(0.03)	SFEXTR,13,16,3,Y,H2
PARASSING,L18,REAL,(L2)+(0.03)	SFEXTR,18,21,3,Y,H3
PARASSING,L19,REAL,(L3)+(0.03)	PTGEN,1,1,1,1,0,0,H1,0
PARASSING,L20,REAL,(L4)+(0.03)	CSYS,3,0,20,12,13
PARASSING,L21,REAL,(L1)+(0.06)	PTGEN,1,12,12,1,0,2,0,0
PARASSING,L22,REAL,(L2)+(0.06)	PTGEN,1,21,21,1,0,0,L1,0
PARASSING,L23,REAL,(L3)+(0.06)	PTGEN,1,21,21,1,0,0,-L2,0
PARASSING,L24,REAL,(L4)+(0.06)	PTGEN,1,21,21,1,0,0,0,L4
PARASSIGN,R1,REAL,11.4	PTGEN,1,21,21,1,0,0,0,-L3
PARASSIGN,R2,REAL,0.3	PLANE,X,0,1
PARASSIGN,R3,REAL,0.1	CRARCCPT,28,23,24,21
PARASSIGN,H1,REAL,1.5	CRARCCPT,29,24,22,21
PARASSIGN,H2,REAL,1.5	CRARCCPT,30,22,25,21
PARASSIGN,H3,REAL,1.5	CRARCCPT,31,25,23,21

CRGEN,1,28,31,1,0,-4,0,0	PTGEN,1,37,37,1,0,0,0,-L6
CRLINE,36,23,26	PTGEN,1,37,37,1,0,0,L7,0
CRLINE,37,25,29	PTGEN,1,37,37,1,0,0,-L8,0
CRLINE,38,22,28	PLANE,X,0,1
CRLINE,39,24,27	CRARCCPT,58,41,38,37
SF4CR,11,28,36,32,39,0	CRARCCPT,59,38,40,37
SF4CR,12,39,33,38,29,0	CRARCCPT,60,40,39,37
SF4CR,13,38,30,37,34,0	CRARCCPT,61,39,41,37
SF4CR,14,37,31,36,35,0	CRGEN,1,58,61,1,0,-1,0,0
ACTSET,CS,0	CRLINE,66,43,38
CRINTSS,7,11,11,1,0.001	CRLINE,67,44,40
CRINTSS,8,12,12,1,0.001	CRLINE,68,45,39
CRINTSS,6,13,13,1,0.001	CRLINE,69,42,41
CRINTSS,5,14,14,1,0.001	SF4CR,15,66,63,67,59,0
ACTKEEP,CR,1	SF4CR,16,67,60,68,64,0
ACTKEEP,SF,1	SF4CR,17,68,61,69,65,0
ACTKEEP,CR,0	SF4CR,18,66,58,69,62,0
SFDEL,11,14,1	CRINTSS,12,15,15,1,0.001
ACTSET,CS,3	CRINTSS,13,16,16,1,0.02
PTGEN,1,12,12,1,0,-F,0,0	CRINTSS,14,17,17,1,0.001
PLANE,Z,0,1	CRINTSS,11,18,18,1,0.001
CRARC3PT,44,32,30,34	SFDEL,15,18,1
CRPTBRK,44,34,0	PTGEN,1,37,37,1,0,0,0,L9
CSYS,4,1,1,2,5	PTGEN,1,37,37,1,0,0,0,-L10
ACTSET,CS,3	PTGEN,1,37,37,1,0,0,L11,0
PLANE,Y,0,1	PTGEN,1,37,37,1,0,0,-L12,0
CRARC3PT,46,33,31,34	CRARCCPT,74,53,50,37
CRPTBRK,46,34,0	CRARCCPT,75,50,52,37
SF3CR,11,45,47,40,0	CRARCCPT,76,52,51,37
SF3CR,12,44,41,47,0	CRARCCPT,77,51,53,37
SF3CR,13,42,44,46,0	CRGEN,1,74,77,1,0,-1,0,0
SF3CR,14,43,46,45,0	CRLINE,82,55,50
SFREORNT,11,14,1	CRLINE,83,56,52
CRPTBRK,13,30,1	CRLINE,84,57,51
CRPTBRK,20,31,1	CRLINE,85,54,53
CRPTBRK,16,32,1	SF4CR,15,82,79,83,75,0
CRPTBRK,15,33,1	SF4CR,16,76,84,80,83,0
ACTSET,CS,3	SF4CR,17,84,77,85,81,0
PTGEN,1,12,12,1,0,0.5,0,0	SF4CR,18,78,82,74,85,0
PTGEN,1,37,37,1,0,0,0,L5	CRINTSS,12,15,15,1,0.001

CRINTSS,13,16,16,1,0.001	SF4CR,16,114,106,115,110,0
CRINTSS,14,17,17,1,0.001	SF4CR,17,115,107,116,111,0
CRINTSS,11,18,18,1,0.001	SF4CR,18,113,108,116,112,0
SFDEL,15,18,1	CRINTSS,8,15,15,1,0.001
PTGEN,1,37,37,1,0,0,0,L13	CRINTSS,6,16,16,1,0.001
PTGEN,1,37,37,1,0,0,0,-L14	CRINTSS,5,17,17,1,0.001
PTGEN,1,37,37,1,0,0,L15,0	CRINTSS,7,18,18,1,0.001
PTGEN,1,37,37,1,0,0,-L16,0	SFDEL,15,18,1
CRARCCPT,90,65,62,37	PTGEN,1,37,37,1,0,0,0,L21
CRARCCPT,91,62,64,37	PTGEN,1,37,37,1,0,0,0,-L22
CRARCCPT,92,64,63,37	PTGEN,1,37,37,1,0,0,L23,0
CRARCCPT,93,63,65,37	PTGEN,1,37,37,1,0,0,-L24,0
CRGEN,1,90,93,1,0,-1,0,0	CRARCCPT,121,86,88,37
CRLINE,98,62,67	CRARCCPT,122,88,87,37
CRLINE,99,68,64	CRARCCPT,123,87,89,37
CRLINE,100,63,69	CRARCCPT,124,89,86,37
CRLINE,101,65,66	CRGEN,1,121,124,1,0,-2,0,0
SF4CR,15,95,99,91,98,0	CRLINE,129,90,86
SF4CR,16,99,92,100,96,0	CRLINE,130,91,88
SF4CR,17,100,93,101,97,0	CRLINE,131,92,87
SF4CR,18,98,90,101,94,0	CRLINE,132,93,89
CRINTSS,12,15,15,1,0.001	SF4CR,15,129,125,130,121,0
CRINTSS,13,16,16,1,0.001	SF4CR,16,130,122,131,126,0
CRINTSS,14,17,17,1,0.001	SF4CR,17,131,123,132,127,0
CRINTSS,11,18,18,1,0.001	SF4CR,18,132,128,129,124,0
SFDEL,15,18,1	CRINTSS,8,15,15,1,0.001
PTGEN,1,37,37,1,0,0,0,L17	CRINTSS,6,16,16,1,0.001
PTGEN,1,37,37,1,0,0,0,-L18	CRINTSS,5,17,17,1,0.001
PTGEN,1,37,37,1,0,0,L19,0	CRINTSS,7,18,18,1,0.001
PTGEN,1,37,37,1,0,0,-L20,0	SFDEL,15,18,1
CRARCCPT,105,74,76,37	CRPTBRK,45,61,1
CRARCCPT,106,76,75,37	CRPTBRK,50,97,0
CRARCCPT,107,75,77,37	CRPTBRK,46,60,1
CRARCCPT,108,77,74,37	CRPTBRK,56,96,0
CRGEN,1,105,108,1,0,-1,0,0	CRPTBRK,47,58,1
CRLINE,113,78,74	CRPTBRK,53,31,0
CRLINE,114,79,76	CRPTBRK,53,94,0
CRLINE,115,80,75	CRPTBRK,55,95,0
CRLINE,116,81,77	CRPTBRK,44,59,1
SF4CR,15,113,109,114,105,0	SF3CR,15,143,86,148,0

SF4CR,16,144,41,147,86,0	MA_CRSF,26,40,BE1,BE2
SF4CR,17,53,133,55,41,0	RCONST,1,4,1,6,T4,0,0,0,0,0
SF3CR,18,87,141,148,0	MA_SF,9,10,1,0,BE2,0
SF4CR,19,42,140,87,147,0	ACTSET,SEL,1
SF4CR,20,55,134,142,42,0	ACTSET,CS,4
SF3CR,21,88,138,141,0	ACTSET,CS,4
SF4CR,22,43,137,88,140,0	SELPIC,CR,1,2,14,19,24,27,22,17,11,8,0
SF4CR,23,135,139,43,142,0	ACTSET,SEL,1
SF3CR,24,138,89,143,0	DCR,1,SY,0,CRMAX,1,
SF4CR,25,137,40,144,89,0	ACTSET,SEL,2
SF4CR,26,139,136,53,40,0	SELPIC,CR,23,26,0
CT,1,0,BE2,5,50,19,18,145,136,0	ACTSET,SEL,2
CT,2,0,BE2,5,146,133,145,21,22,0,1	DCR,1,SZ,0,CRMAX,1,
CT,3,0,BE2,5,5,14,50,135,56,0,1	ACTSET,SEL,3
CT,4,0,BE2,5,10,56,134,146,17,0,1	SELPIC,CR,4,9,0
RG,1,1,1,7	ACTSET,SEL,3
RG,2,1,2,8	DCR,1,SX,0,CRMAX,1,
RG,3,1,3,5	ACTSET,SEL,4
RG,4,1,4,6	PSF,1,-P1,3,2,-P1,-P1,3
EGROUP,1,SHELL3T,0,0,0,0,0,0,0,0	PRG,1,113,4,1,0,1
MPROP,1,DENS,8.250	PSF,15,P2,26,1,P2,P2,1
MPROP,1,EX,206000000	PSF,9,P3,10,1,P3,P4,1
MPROP,1,NUXY,0.3	ACTSET,SEL,4
RCONST,1,1,1,6,T1,0,10000,0,0,0	SELPIC,CR,43,40,41,42,0
MA_SF,1,4,1,0,BE2,0	SELPIC,PT,30,31,32,33,0
RCONST,1,2,1,6,T2,0,0,0,0,0	ACTSET,SEL,4
MA_RG,3,4,1,3,1,0	ACTSET,SEL,4
MA_PTSF,21,34,BE1,BE3	ACTSET,SEL,5
MA_CRSF,23,43,BE1,BE2	ACTKEEP,PT,1
MA_CRSF,22,43,BE1,BE3	ACTKEEP,CR,1
MA_PTSF,18,34,BE1,BE3	SFDEL,17,17,1
MA_CRSF,19,42,BE1,BE3	SFDEL,20,26,3
MA_CRSF,20,42,BE1,BE2	CRPTBRK,53,82,0
RCONST,1,3,1,6,T3,0,0,0,0,0	CRPTBRK,55,83,0
MA_RG,1,2,1,3,1,0	CRPTBRK,142,84,0
MA_PTSF,24,34,BE1,BE3	CRPTBRK,139,85,0
MA_PTSF,15,34,BE1,BE3	SF4CR,26,154,120,151,40,0
MA_CRSF,16,41,BE1,BE3	SF4CR,27,139,136,53,120,0
MA_CRSF,17,41,BE1,BE2	SF4CR,28,41,151,117,152,0
MA_CRSF,25,40,BE1,BE3	SF4CR,29,117,53,133,55,0

SF4CR,30,134,142,118,55,0
SF4CR,31,118,153,42,152,0
SF4CR,32,119,154,43,153,0
SF4CR,33,135,139,119,142,0
ACTSET,RC,2
MA_CRSF,31,42,BE1,BE4
MA_CRSF,30,118,BE4,BE2
MA_CRSF,32,43,BE1,BE4
MA_CRSF,33,119,BE4,BE2
ACTSET,RC,3
MA_CRSF,28,41,BE1,BE4
MA_CRSF,29,117,BE4,BE2
MA_CRSF,26,40,BE1,BE4
MA_CRSF,27,120,BE4,BE2
PSF,26,P2,33,1,P2,P2,1
ACTSET,SEL,4
NMERGE,1,11286,1,0.0001,0,1,0
NCOMPRESS,1,11251
ECOMPRESS,1,19614
A_STATIC,N,0,0,1E-006,1E+010,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
R_STA

C priedas. TALPYKLOS SIENELĖS FRAGMENTO SU NUOKRYPIU BEM PROGRAMOS COSMOS2M TEKSTINIOS BYLOS PAVYZDYS (GEOMETRIŠKAI IR FIZIŠKAI NETIESINIS SKAIČIAVIMAS)

PARASSING,F,REAL,0.021	CRLINE,38,22,28
PARASSING,BE1,REAL,0.004	CRLINE,39,24,27
PARASSING,BE2,REAL,0.100	SF4CR,11,28,36,32,39,0
PARASSING,BE3,REAL,0.015	SF4CR,12,39,33,38,29,0
PARASSING,BE4,REAL,0.020	SF4CR,13,38,30,37,34,0
PARASSING,L1,REAL,0.283	SF4CR,14,37,31,36,35,0
PARASSING,L2,REAL,0.283	ACTSET,CS,0
PARASSIGN,L3,REAL,0.283	CRINTSS,7,11,11,1,0.001
PARASSIGN,L4,REAL,0.283	CRINTSS,8,12,12,1,0.001
PARASSING,L5,REAL,0.2	CRINTSS,6,13,13,1,0.001
PARASSING,L6,REAL,0.2	CRINTSS,5,14,14,1,0.001
PARASSING,L7,REAL,0.2	ACTKEEP,CR,1
PARASSING,L8,REAL,0.2	ACTKEEP,SF,1
PARASSING,L9,REAL,(L1)/2	ACTKEEP,CR,0
PARASSING,L10,REAL,(L2)/2	SFDEL,11,14,1
PARASSING,L11,REAL,(L3)/2	ACTSET,CS,3
PARASSING,L12,REAL,(L4)/2	PTGEN,1,12,12,1,0,-F,0,0
PARASSING,L13,REAL,(L1)-(0.2)	PLANE,Z,0,1
PARASSING,L14,REAL,(L2)-(0.2)	CRARC3PT,44,32,30,34
PARASSING,L15,REAL,(L3)-(0.2)	CRPTBRK,44,34,0
PARASSING,L16,REAL,(L4)-(0.2)	CSYS,4,1,1,2,5
PARASSING,L17,REAL,(L1)+(0.2)	ACTSET,CS,3
PARASSING,L18,REAL,(L2)+(0.2)	PLANE,Y,0,1
PARASSING,L19,REAL,(L3)+(0.2)	CRARC3PT,46,33,31,34
PARASSING,L20,REAL,(L4)+(0.2)	CRPTBRK,46,34,0
PARASSING,L21,REAL,(L1)+(0.4)	SF3CR,11,45,47,40,0
PARASSING,L22,REAL,(L2)+(0.4)	SF3CR,12,44,41,47,0
PARASSING,L23,REAL,(L3)+(0.4)	SF3CR,13,42,44,46,0
PARASSING,L24,REAL,(L4)+(0.4)	SF3CR,14,43,46,45,0
PARASSIGN,R1,REAL,11.4	SFREORNT,11,14,1
PARASSIGN,R2,REAL,0.3	CRPTBRK,13,30,1
PARASSIGN,R3,REAL,0.1	CRPTBRK,20,31,1
PARASSIGN,H1,REAL,1.5	CRPTBRK,16,32,1
PARASSIGN,H2,REAL,1.5	CRPTBRK,15,33,1

ACTSET,CS,3	SF4CR,18,78,82,74,85,0
PTGEN,1,12,12,1,0,0.5,0,0	CRINTSS,12,15,15,1,0.001
PTGEN,1,37,37,1,0,0,0,L5	CRINTSS,13,16,16,1,0.001
PTGEN,1,37,37,1,0,0,0,-L6	CRINTSS,14,17,17,1,0.001
PTGEN,1,37,37,1,0,0,L7,0	CRINTSS,11,18,18,1,0.001
PTGEN,1,37,37,1,0,0,-L8,0	SFDEL,15,18,1
PLANE,X,0,1	PTGEN,1,37,37,1,0,0,0,L13
CRARCCPT,58,41,38,37	PTGEN,1,37,37,1,0,0,0,-L14
CRARCCPT,59,38,40,37	PTGEN,1,37,37,1,0,0,L15,0
CRARCCPT,60,40,39,37	PTGEN,1,37,37,1,0,0,-L16,0
CRARCCPT,61,39,41,37	CRARCCPT,90,65,62,37
CRGEN,1,58,61,1,0,-1,0,0	CRARCCPT,91,62,64,37
CRLINE,66,43,38	CRARCCPT,92,64,63,37
CRLINE,67,44,40	CRARCCPT,93,63,65,37
CRLINE,68,45,39	CRGEN,1,90,93,1,0,-1,0,0
CRLINE,69,42,41	CRLINE,98,62,67
SF4CR,15,66,63,67,59,0	CRLINE,99,68,64
SF4CR,16,67,60,68,64,0	CRLINE,100,63,69
SF4CR,17,68,61,69,65,0	CRLINE,101,65,66
SF4CR,18,66,58,69,62,0	SF4CR,15,95,99,91,98,0
CRINTSS,12,15,15,1,0.001	SF4CR,16,99,92,100,96,0
CRINTSS,13,16,16,1,0.02	SF4CR,17,100,93,101,97,0
CRINTSS,14,17,17,1,0.001	SF4CR,18,98,90,101,94,0
CRINTSS,11,18,18,1,0.001	CRINTSS,12,15,15,1,0.001
SFDEL,15,18,1	CRINTSS,13,16,16,1,0.001
PTGEN,1,37,37,1,0,0,0,L9	CRINTSS,14,17,17,1,0.001
PTGEN,1,37,37,1,0,0,0,-L10	CRINTSS,11,18,18,1,0.001
PTGEN,1,37,37,1,0,0,L11,0	SFDEL,15,18,1
PTGEN,1,37,37,1,0,0,-L12,0	PTGEN,1,37,37,1,0,0,0,L17
CRARCCPT,74,53,50,37	PTGEN,1,37,37,1,0,0,0,-L18
CRARCCPT,75,50,52,37	PTGEN,1,37,37,1,0,0,L19,0
CRARCCPT,76,52,51,37	PTGEN,1,37,37,1,0,0,-L20,0
CRARCCPT,77,51,53,37	CRARCCPT,105,74,76,37
CRGEN,1,74,77,1,0,-1,0,0	CRARCCPT,106,76,75,37
CRLINE,82,55,50	CRARCCPT,107,75,77,37
CRLINE,83,56,52	CRARCCPT,108,77,74,37
CRLINE,84,57,51	CRGEN,1,105,108,1,0,-1,0,0
CRLINE,85,54,53	CRLINE,113,78,74
SF4CR,15,82,79,83,75,0	CRLINE,114,79,76
SF4CR,16,76,84,80,83,0	CRLINE,115,80,75
SF4CR,17,84,77,85,81,0	CRLINE,116,81,77

SF4CR,15,113,109,114,105,0	SF4CR,16,144,41,147,86,0
SF4CR,16,114,106,115,110,0	SF4CR,17,53,133,55,41,0
SF4CR,17,115,107,116,111,0	SF3CR,18,87,141,148,0
SF4CR,18,113,108,116,112,0	SF4CR,19,42,140,87,147,0
CRINTSS,8,15,15,1,0.001	SF4CR,20,55,134,142,42,0
CRINTSS,6,16,16,1,0.001	SF3CR,21,88,138,141,0
CRINTSS,5,17,17,1,0.001	SF4CR,22,43,137,88,140,0
CRINTSS,7,18,18,1,0.001	SF4CR,23,135,139,43,142,0
SFDEL,15,18,1	SF3CR,24,138,89,143,0
PTGEN,1,37,37,1,0,0,0,L21	SF4CR,25,137,40,144,89,0
PTGEN,1,37,37,1,0,0,0,-L22	SF4CR,26,139,136,53,40,0
PTGEN,1,37,37,1,0,0,L23,0	CT,1,0,BE2,5,50,19,18,145,136,0
PTGEN,1,37,37,1,0,0,-L24,0	CT,2,0,BE2,5,146,133,145,21,22,0,1
CRARCCPT,121,86,88,37	CT,3,0,BE2,5,5,14,50,135,56,0,1
CRARCCPT,122,88,87,37	CT,4,0,BE2,5,10,56,134,146,17,0,1
CRARCCPT,123,87,89,37	RG,1,1,1,7
CRARCCPT,124,89,86,37	RG,2,1,2,8
CRGEN,1,121,124,1,0,-2,0,0	RG,3,1,3,5
CRLINE,129,90,86	RG,4,1,4,6
CRLINE,130,91,88	EGROUP,1,SHELL3T,0,0,0,0,4,1,0,0
CRLINE,131,92,87	MPROP,1,DENS,8.250
CRLINE,132,93,89	MPC,1,0,1,0.001626213,335000,3.5,480000
SF4CR,15,129,125,130,121,0	MPROP,1,NUXY,0.3
SF4CR,16,130,122,131,126,0	RCONST,1,1,1,6,T1,0,10000,0,0,0
SF4CR,17,131,123,132,127,0	MA_SF,1,4,1,0,BE2,0
SF4CR,18,132,128,129,124,0	RCONST,1,2,1,6,T2,0,0,0,0,0
CRINTSS,8,15,15,1,0.001	MA_RG,3,4,1,3,1,0
CRINTSS,6,16,16,1,0.001	MA_PTSF,21,34,BE1,BE3
CRINTSS,5,17,17,1,0.001	MA_CRSF,23,43,BE1,BE2
CRINTSS,7,18,18,1,0.001	MA_CRSF,22,43,BE1,BE3
SFDEL,15,18,1	MA_PTSF,18,34,BE1,BE3
CRPTBRK,45,61,1	MA_CRSF,19,42,BE1,BE3
CRPTBRK,50,97,0	MA_CRSF,20,42,BE1,BE2
CRPTBRK,46,60,1	RCONST,1,3,1,6,T3,0,0,0,0,0
CRPTBRK,56,96,0	MA_RG,1,2,1,3,1,0
CRPTBRK,47,58,1	MA_PTSF,24,34,BE1,BE3
CRPTBRK,53,31,0	MA_PTSF,15,34,BE1,BE3
CRPTBRK,53,94,0	MA_CRSF,16,41,BE1,BE3
CRPTBRK,55,95,0	MA_CRSF,17,41,BE1,BE2
CRPTBRK,44,59,1	MA_CRSF,25,40,BE1,BE3
SF3CR,15,143,86,148,0	MA_CRSF,26,40,BE1,BE2

RCONST,1,4,1,6,T4,0,0,0,0,0	ACTSET,RC,2
MA_SF,9,10,1,0,BE2,0	MA_CRSF,31,42,BE1,BE4
ACTSET,SEL,1	MA_CRSF,30,118,BE4,BE2
ACTSET,CS,4	MA_CRSF,32,43,BE1,BE4
ACTSET,CS,4	MA_CRSF,33,119,BE4,BE2
SELPIC,CR,1,2,14,19,24,27,22,17,11,8,0	ACTSET,RC,3
ACTSET,SEL,1	MA_CRSF,28,41,BE1,BE4
DCR,1,SY,0,CRMAX,1,	MA_CRSF,29,117,BE4,BE2
ACTSET,SEL,2	MA_CRSF,26,40,BE1,BE4
SELPIC,CR,23,26,0	MA_CRSF,27,120,BE4,BE2
ACTSET,SEL,2	PSF,26,P2,33,1,P2,P2,1
DCR,1,SZ,0,CRMAX,1,	ACTSET,SEL,4
ACTSET,SEL,3	TIMES,0,1,0.1
SELPIC,CR,4,9,0	CURDEF,TIME,1,1,0,0,1,1
ACTSET,SEL,3	A_NONLINEAR,S,1,1,20,0.001,0,N,0,0,1E+010,0.001,0.01,0,1,0,0
DCR,1,SX,0,CRMAX,1,	NL_AUTOSTEP,1,1E-0019,1,100
ACTSET,SEL,4	RESTART,1
PSF,1,-P1,3,2,-P1,-P1,3	NMERGE,1,19702,1,0.0001,0,1,0
PRG,1,113,4,1,0,1	NCOMPRESS,1,19702
PSF,15,P2,26,1,P2,P2,1	ECOMPRESS,1,35894
PSF,9,P3,10,1,P3,P4,1	A_NONLINEAR,S,1,1,20,0.001,0,N,0,0,1E+010,0.001,0.01,0,1,0,0
ACTSET,SEL,4	R_NONLINEAR
SELPIC,CR,43,40,41,42,0	
SELPIC,PT,30,31,32,33,0	
ACTSET,SEL,4	
ACTSET,SEL,4	
ACTSET,SEL,5	
ACTKEEP,PT,1	
ACTKEEP,CR,1	
SFDEL,17,17,1	
SFDEL,20,26,3	
CRPTBRK,53,82,0	
CRPTBRK,55,83,0	
CRPTBRK,142,84,0	
CRPTBRK,139,85,0	
SF4CR,26,154,120,151,40,0	
SF4CR,30,134,142,118,55,0	
SF4CR,31,118,153,42,152,0	
SF4CR,32,119,154,43,153,0	
SF4CR,33,135,139,119,142,0	

D priedas. PLONOS PLIENINĖS PLOKŠTELĖS PAVIRŠIAUS „MINKŠTOJO“ NUOKRYPIO ĮTEMPIŲ IR DEFORMACIJŲ EKSPERIMENTINIŲ TYRIMŲ REZULTATAI

Eil. Nr.	Apkrova *F*, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Pirmos jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai.					
				Pirmas tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	273170	0	0	0,00E+00	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	273149	22	22	7,87E-07	0,16	0,6
3	2,00	0,01	0,53	273149	0	22	7,87E-07	0,16	0,3
4	3,00	0,02	2,80	273095	54	75	2,75E-06	0,57	0,2
5	4,00	0,03	7,21	272966	129	205	7,48E-06	1,54	0,2
6	5,11	0,03	12,68	272675	291	495	1,81E-05	3,73	0,3
7	6,66	0,05	17,79	272427	248	743	2,71E-05	5,59	0,3
8	7,02	0,05	21,40	272244	183	926	3,38E-05	6,97	0,3

Eil. Nr.	Apkrova *F*, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto, σ_{nom}, MPa	Pirmos jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai.					
				Antras tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	35046	0	0	0,00E+00	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	34992	54	54	1,97E-06	0,41	1,4
3	2,00	0,01	0,53	34949	43	97	3,54E-06	0,73	1,4
4	3,00	0,02	2,80	34647	302	398	1,46E-05	3,00	1,1
5	4,00	0,03	7,21	34022	625	1023	3,74E-05	7,70	1,1
6	5,11	0,03	12,68	32342	1680	2703	9,87E-05	20,34	1,6
7	6,66	0,05	17,79	31481	862	3565	1,30E-04	26,83	1,5
8	7,02	0,05	21,40	30748	732	4297	1,57E-04	32,34	1,5

Eil. Nr.	Apkrova *F*, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Pirmos jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai.					
				Trečias tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	59300	0	0	0,00E+00	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	59246	54	54	1,97E-06	0,41	1,4
3	2,00	0,01	0,53	59192	54	108	3,93E-06	0,81	1,5
4	3,00	0,02	2,80	58815	377	485	1,77E-05	3,65	1,3
5	4,00	0,03	7,21	58104	711	1195	4,37E-05	9,00	1,2
6	5,11	0,03	12,68	56456	1648	2843	1,04E-04	21,40	1,7
7	6,66	0,05	17,79	55487	969	3813	1,39E-04	28,69	1,6
8	7,02	0,05	21,40	54647	840	4653	1,70E-04	35,01	1,6

Eil. Nr.	Apkrova *F*, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Pirmos jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai.					
				Ketvirtas tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	77189	0	0	0	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	77199	-11	-11	-3,93E-07	0,08	0,3
3	2,00	0,01	0,53	77199	0	-11	-3,93E-07	0,08	0,2
4	3,00	0,02	2,80	77199	0	-11	-3,93E-07	0,08	0,0
5	4,00	0,03	7,21	77199	0	-11	-3,93E-07	0,08	0,0
6	5,11	0,03	12,68	77286	-86	-97	-3,54E-06	0,73	0,1
7	6,66	0,05	17,79	77286	0	-97	-3,54E-06	0,73	0,0
8	7,02	0,05	21,40	77253	32	-65	-2,36E-06	0,49	0,0

Eil. Nr.	Apkrova *F*, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Pirmos jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai.					
				Penktas tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	29090	0	0	0	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	29133	-43	-43	-1,57E-06	0,32	1,1
3	2,00	0,01	0,53	29165	-32	-75	-2,75E-06	0,57	1,1
4	3,00	0,02	2,80	29445	-280	-355	-1,30E-05	2,67	1,0
5	4,00	0,03	7,21	29876	-431	-786	-2,87E-05	5,92	0,8
6	5,11	0,03	12,68	30942	-1066	-1852	-6,77E-05	13,94	1,1
7	6,66	0,05	17,79	31610	-668	-2520	-9,21E-05	18,96	1,1
8	7,02	0,05	21,40	32095	-485	-3005	-1,10E-04	22,61	1,1

Eil. Nr.	Apkrova *F*, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Pirmos jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai.					
				Šeštas tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	58933	0	0	0,00E+00	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	58912	22	22	7,87E-07	0,16	0,6
3	2,00	0,01	0,53	58901	11	32	1,18E-06	0,24	0,5
4	3,00	0,02	2,80	58664	237	269	9,84E-06	2,03	0,7
5	4,00	0,03	7,21	58190	474	743	2,71E-05	5,59	0,8
6	5,11	0,03	12,68	60194	-2003	-1260	-4,60E-05	9,48	0,7
7	6,66	0,05	17,79	58610	1583	323	1,18E-05	2,43	0,1
8	7,02	0,05	21,40	58072	539	862	3,15E-05	6,48	0,3

Eil. Nr.	Apkrova *F*, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Pirmos jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai.					
				Septyntas tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	10253	0	0	0,00E+00	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	10285	-32	-32	-1,18E-06	0,24	0,9
3	2,00	0,01	0,53	10318	-32	-65	-2,36E-06	0,49	0,9
4	3,00	0,02	2,80	10490	-172	-237	-8,66E-06	1,78	0,6
5	4,00	0,03	7,21	10695	-205	-442	-1,61E-05	3,32	0,5
6	5,11	0,03	12,68	12073	-1379	-1820	-6,65E-05	13,70	1,1
7	6,66	0,05	17,79	12386	-312	-2132	-7,79E-05	16,05	0,9
8	7,02	0,05	21,40	12784	-398	-2531	-9,25E-05	19,05	0,9

Eil. Nr.	Apkrova, *F*, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Pirmos jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai.					
				Aštuntas tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	41680	0	0	0,00E+00	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	41701	-22	-22	-7,87E-07	0,16	0,6
3	2,00	0,01	0,53	41723	-22	-43	-1,57E-06	0,32	0,6
4	3,00	0,02	2,80	41874	-151	-194	-7,08E-06	1,46	0,5
5	4,00	0,03	7,21	42025	-151	-345	-1,26E-05	2,59	0,4
6	5,11	0,03	12,68	43220	-1195	-1540	-5,63E-05	11,59	0,9
7	6,66	0,05	17,79	43435	-215	-1756	-6,41E-05	13,21	0,7
8	7,02	0,05	21,40	43769	-334	-2089	-7,63E-05	15,72	0,7

Eil. Nr.	Apkrova *F*, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Pirmos jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai.					
				Devyntas tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	41949	0	0	0,00E+00	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	41960	-11	-11	-3,93E-07	0,08	0,3
3	2,00	0,01	0,53	41981	-22	-32	-1,18E-06	0,24	0,5
4	3,00	0,02	2,80	41992	-11	-43	-1,57E-06	0,32	0,1
5	4,00	0,03	7,21	41906	86	43	1,57E-06	0,32	0,0
6	5,11	0,03	12,68	45159	-3253	-3209	-1,17E-04	24,15	1,9
7	6,66	0,05	17,79	44146	1012	-2197	-8,03E-05	16,53	0,9
8	7,02	0,05	21,40	44060	86	-2111	-7,71E-05	15,88	0,7

Eil. Nr.	Apkrova *F*, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Antros jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai.					
				Pirmas tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	19548	0	0	0,00E+00	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	19526	22	22	7,87E-07	0,16	0,6
3	2,00	0,01	0,53	19515	11	32	1,18E-06	0,24	0,5
4	3,00	0,02	2,80	19418	97	129	4,72E-06	0,97	0,3
5	4,00	0,03	7,21	19257	162	291	1,06E-05	2,19	0,3
6	5,11	0,03	12,68	18988	269	560	2,05E-05	4,21	0,3
7	6,66	0,05	17,79	18740	248	808	2,95E-05	6,08	0,3
8	7,02	0,05	21,40	18567	172	980	3,58E-05	7,38	0,3

Eil. Nr.	Apkrova *F*, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Antros jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai.					
				Antras tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	21314	0	0	0,00E+00	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	21292	22	22	7,87E-07	0,16	0,6
3	2,00	0,01	0,53	21292	0	22	7,87E-07	0,16	0,3
4	3,00	0,02	2,80	21238	54	75	2,75E-06	0,57	0,2
5	4,00	0,03	7,21	21131	108	183	6,69E-06	1,38	0,2
6	5,11	0,03	12,68	20894	237	420	1,53E-05	3,16	0,2
7	6,66	0,05	17,79	20732	162	582	2,12E-05	4,38	0,2
8	7,02	0,05	21,40	20603	129	711	2,60E-05	5,35	0,3

Eil. Nr.	Apkrova *F*, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Antros jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai.					
				Trečias tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	14744	0	0	0,00E+00	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	14701	43	43	1,57E-06	0,32	1,1
3	2,00	0,01	0,53	14658	43	86	3,15E-06	0,65	1,2
4	3,00	0,02	2,80	14346	312	398	1,46E-05	3,00	1,1
5	4,00	0,03	7,21	13699	646	1045	3,82E-05	7,86	1,1
6	5,11	0,03	12,68	12504	1195	2240	8,18E-05	16,86	1,3
7	6,66	0,05	17,79	11815	689	2929	1,07E-04	22,04	1,2
8	7,02	0,05	21,40	11255	560	3489	1,27E-04	26,26	1,2

Eil. Nr.	Apkrova *F*, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Antros jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai.					
				Ketvirtas tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	-11147	0	0	0,00E+00	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	-11244	97	97	3,54E-06	0,73	2,6
3	2,00	0,01	0,53	-11319	75	172	6,29E-06	1,30	2,5
4	3,00	0,02	2,80	-11879	560	732	2,68E-05	5,51	2,0
5	4,00	0,03	7,21	-13096	1217	1949	7,12E-05	14,67	2,0
6	5,11	0,03	12,68	-15315	2219	4168	1,52E-04	31,36	2,5
7	6,66	0,05	17,79	-16640	1325	5493	2,01E-04	41,33	2,3
8	7,02	0,05	21,40	-17717	1077	6570	2,40E-04	49,44	2,3

Eil. Nr.	Apkrova, *F*, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Antros jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai.					
				Penktas tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	33872	0	0	0,00E+00	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	33829	43	43	1,57E-06	0,32	1,14
3	2,00	0,01	0,53	33785	43	86	3,15E-06	0,65	1,23
4	3,00	0,02	2,80	33452	334	420	1,53E-05	3,16	1,13
5	4,00	0,03	7,21	32676	775	1195	4,37E-05	9,00	1,25
6	5,11	0,03	12,68	31696	980	2176	7,95E-05	16,37	1,29
7	6,66	0,05	17,79	30964	732	2908	1,06E-04	21,88	1,23
8	7,02	0,05	21,40	30404	560	3468	1,27E-04	26,10	1,22

Eil. Nr.	Apkrova *F*, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Antros jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai.					
				Šeštas tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	35552	0	0	0,00E+00	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	35519	32	32	1,18E-06	0,24	0,9
3	2,00	0,01	0,53	35487	32	65	2,36E-06	0,49	0,9
4	3,00	0,02	2,80	35164	323	388	1,42E-05	2,92	1,0
5	4,00	0,03	7,21	34421	743	1131	4,13E-05	8,51	1,2
6	5,11	0,03	12,68	34033	388	1519	5,55E-05	11,43	0,9
7	6,66	0,05	17,79	33344	689	2208	8,07E-05	16,61	0,9
8	7,02	0,05	21,40	32870	474	2682	9,80E-05	20,18	0,9

Eil. Nr.	Apkrova, *F*, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Antros jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai.					
				Septyntas tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	20603	0	0	0,00E+00	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	20560	43	43	1,57E-06	0,32	1,1
3	2,00	0,01	0,53	20528	32	75	2,75E-06	0,57	1,1
4	3,00	0,02	2,80	20269	258	334	1,22E-05	2,51	0,9
5	4,00	0,03	7,21	19612	657	991	3,62E-05	7,46	1,0
6	5,11	0,03	12,68	14572	5040	6031	2,20E-04	45,39	3,6
7	6,66	0,05	17,79	15800	-1228	4803	1,75E-04	36,15	2,0
8	7,02	0,05	21,40	15617	183	4987	1,82E-04	37,52	1,8

Eil. Nr.	Apkrova F, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Antros jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai.					
				Aštuntas tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	11	0	0	0,00E+00	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	-22	32	32	1,18E-06	0,24	0,9
3	2,00	0,01	0,53	-43	22	54	1,97E-06	0,41	0,8
4	3,00	0,02	2,80	-237	194	248	9,05E-06	1,86	0,7
5	4,00	0,03	7,21	-732	495	743	2,71E-05	5,59	0,8
6	5,11	0,03	12,68	-4383	3651	4394	1,61E-04	33,07	2,6
7	6,66	0,05	17,79	-3220	-1163	3231	1,18E-04	24,31	1,4
8	7,02	0,05	21,40	-3296	75	3306	1,21E-04	24,88	1,2

Eil. Nr.	Apkrova F, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Antros jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai.					
				Devyntas tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	15843	0	0	0,00E+00	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	15789	54	54	1,97E-06	0,41	1,4
3	2,00	0,01	0,53	15746	43	97	3,54E-06	0,73	1,4
4	3,00	0,02	2,80	15369	377	474	1,73E-05	3,57	1,3
5	4,00	0,03	7,21	14410	959	1432	5,23E-05	10,78	1,5
6	5,11	0,03	12,68	10178	4233	5665	2,07E-04	42,63	3,4
7	6,66	0,05	17,79	11244	-1066	4599	1,68E-04	34,61	1,9
8	7,02	0,05	21,40	10910	334	4933	1,80E-04	37,12	1,7

Eil. Nr.	Apkrova F, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Trečios jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai					
				Pirmas tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	86160	0	0	0,00E+00	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	86106	54	54	1,97E-06	0,41	1,4
3	2,00	0,01	0,53	86063	43	97	3,54E-06	0,73	1,4
4	3,00	0,02	2,80	85729	334	431	1,57E-05	3,24	1,2
5	4,00	0,03	7,21	84868	862	1292	4,72E-05	9,73	1,3
6	5,11	0,03	12,68	84092	775	2068	7,55E-05	15,56	1,2
7	6,66	0,05	17,79	83618	474	2542	9,28E-05	19,13	1,1
8	7,02	0,05	21,40	82541	1077	3619	1,32E-04	27,23	1,3

Eil. Nr.	Apkrova F, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Trečios jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai					
				Antras tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	-218254	0	0	0,00E+00	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	-218243	-11	-11	-3,93E-07	0,08	0,3
3	2,00	0,01	0,53	-218243	0	-11	-3,93E-07	0,08	0,2
4	3,00	0,02	2,80	-218254	11	0	0,00E+00	0,00	0,0
5	4,00	0,03	7,21	-218200	-54	-54	-1,97E-06	0,41	0,1
6	5,11	0,03	12,68	-218179	-22	-75	-2,75E-06	0,57	0,0
7	6,66	0,05	17,79	-218179	0	-75	-2,75E-06	0,57	0,0
8	7,02	0,05	21,40	-218093	-86	-162	-5,90E-06	1,22	0,1

Eil. Nr.	Apkrova F, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Trečios jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai					
				Trečias tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	92439	0	0	0,00E+00	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	92439	0	0	0,00E+00	0,00	0,0
3	2,00	0,01	0,53	92439	0	0	0,00E+00	0,00	0,0
4	3,00	0,02	2,80	92504	-65	-65	-2,36E-06	0,49	0,2
5	4,00	0,03	7,21	92654	-151	-215	-7,87E-06	1,62	0,2
6	5,11	0,03	12,68	92880	-226	-442	-1,61E-05	3,32	0,3
7	6,66	0,05	17,79	92880	0	-442	-1,61E-05	3,32	0,2
8	7,02	0,05	21,40	92999	-118	-560	-2,05E-05	4,21	0,2

Eil. Nr.	Apkrova F, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Trečios jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai					
				Ketvirtas tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	92848	0	0	0,00E+00	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	92848	0	0	0,00E+00	0,00	0,0
3	2,00	0,01	0,53	92848	0	0	0,00E+00	0,00	0,0
4	3,00	0,02	2,80	92913	-65	-65	-2,36E-06	0,49	0,2
5	4,00	0,03	7,21	93064	-151	-215	-7,87E-06	1,62	0,2
6	5,11	0,03	12,68	93333	-269	-485	-1,77E-05	3,65	0,3
7	6,66	0,05	17,79	93344	-11	-495	-1,81E-05	3,73	0,2
8	7,02	0,05	21,40	93462	-118	-614	-2,24E-05	4,62	0,2

Eil. Nr.	Apkrova F, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Trečios jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai					
				Penktas tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	63058	0	0	0,00E+00	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	63048	11	11	3,93E-07	0,08	0,3
3	2,00	0,01	0,53	63048	0	11	3,93E-07	0,08	0,2
4	3,00	0,02	2,80	63058	-11	0	0,00E+00	0,00	0,0
5	4,00	0,03	7,21	63048	11	11	3,93E-07	0,08	0,0
6	5,11	0,03	12,68	62940	108	118	4,33E-06	0,89	0,1
7	6,66	0,05	17,79	62994	-54	65	2,36E-06	0,49	0,0
8	7,02	0,05	21,40	63058	-65	0	0,00E+00	0,00	0,0

Eil. Nr.	Apkrova F, kN	Apkrovos koef. η	Įtempiai pl. vietoje be defekto σ_{nom}, MPa	Trečios jungties tenzojutiklių parodymų rezultatai					
				Penktas tenzojutiklis					
				Tenzojutiklių rodmenys, mV×10^4			Santykinė defomacija ε	Įtempiai σ, MPa	Samplaikos koef. k
				x	Δx	∑Δx			
1	0,00	0,00	0,00	80635	0	0	0,00E+00	0,00	
2	1,00	0,01	0,28	80592	43	43	1,57E-06	0,32	1,1
3	2,00	0,01	0,53	80549	43	86	3,15E-06	0,65	1,2
4	3,00	0,02	2,80	80204	345	431	1,57E-05	3,24	1,2
5	4,00	0,03	7,21	79386	819	1249	4,56E-05	9,40	1,3
6	5,11	0,03	12,68	78503	883	2132	7,79E-05	16,05	1,3
7	6,66	0,05	17,79	78093	409	2542	9,28E-05	19,13	1,1
8	7,02	0,05	21,40	77221	872	3414	1,25E-04	25,69	1,2