

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS**  
**TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

**Saulius Kononovas**

**HORIZONTALAUS TIPO SLĖGINĖS TALPYKLOS STIPRUMO  
TYRIMAS TAIKANT BAIGTINIŲ ELEMENTŲ METODĄ**

Magistro baigiamasis darbas

**Šiauliai, 2014**

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS**  
**TECHNOLOGIJOS FAKULTETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

**HORIZONTALAUS TIPO SLĖGINĖS TALPYKLOS STIPRUMO  
TYRIMAS TAIKANT BAIGTINIŲ ELEMENTŲ METODĄ**

Magistro baigiamasis darbas

**Autorius – Saulius Kononovas (MM-12 gr.)**

**Vadovas – doc. dr. Sergėjus Rimovskis**

**Recenzentas – prof. habil. dr. Jonas Bareišis**

**Katedros vedėjas – doc. dr. Artūras Sabaliauskas**

**Šiauliai, 2014**

TVIRTINU

Mechanikos inžinerijos katedros  
vedėjas

2013 m. vasario mėn. 4 d.

## MAGISTRO DARBO UŽDUOTIS

Išduota magistrantui (-ei) Sauliui Kononovui

Darbo tema: Horizontalaus tipo slėginės talpyklos stiprumo tyrimas taikant baigtinių elementų metodą

Patvirtinta 2014 m. balandžio mėn. 2 d. fakulteto dekanų potvarkiu Nr. TGMDP-04.

### 1. Darbo tikslas

Atlikti slėginės talpyklos stiprumo tyrimą, įvertinant naujas eksploatacines sąlygas ir darbo režimus (veikiant savajam svoriui, hidrostatiniam ir vidiniam slėgiui). Tyrimams taikyti skaitinius metodus.

### 2. Darbo struktūra

1. Slėginių indų projektavimas. Reikalavimai ir metodikos.
2. Duomanų, reikalingų analizei rinkimas ir įvertinimas.
3. Talpyklos stiprumo tyrimas ir rezultatų analizė.

Darbo pateikimo terminas 2014 m. birželio mėn. 9 d.

Užduotį gavau Saulius Kononovas  
(magistranto vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_ 2013-02-04  
(parašas, data)

Vadovas Sergėjus Rimovskis  
(pareigos, vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_ 2013-02-04  
(parašas, data)

## TURUNYS

LENTELIŲ SĄRAŠAS .....	7
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS .....	8
ĮVADAS .....	9
1. SLĖGINIŲ INDŲ TIPAI IR JŲ PROJEKTAVIMĄ REGLAMENTUOJANČIŲ TEISĖS AKTŲ APŽVALGA .....	11
1.1. Slėginių indų tipai.....	11
1.2. Slėginių indų projektavimo ypatumai.....	12
1.3. Pagrindinių standartų ir normatyvinės dokumentacijos apžvalga .....	13
2. PAGRINDINIAI DUOMENYS APIE TALPYKLĄ .....	15
2.1. Talpyklos paskirtis ir pagrindiniai techniniai duomenys.....	15
2.2. Likutinio metalo storio tyrimas .....	16
2.2.1. Metalo storio nustatymas ultragarsiniu metodu .....	16
2.2.2. Talpos likutinio metalo storio tyrimas .....	17
2.3. Plieno 3 mechaninių savybių tyrimo metodika ir rezultatai .....	18
2.3.1. Tempimo bandymų metodika ir rezultatai .....	18
2.3.2. Plieno 3 takumo stiprio ir tempiamojo stiprio, esant +150 °C temperatūrai, apskaičiavimas.....	21
3. TALPYKLOS STIPRUMO ANALIZĖ .....	24
3.1. Stiprumo kriterijai ir sąlygos .....	24
3.1.1. Konstrukcijų patikimumo skaičiavimo metodai .....	25
3.1.2. Talpyklos metalo leistinų įtempių nustatymas.....	26
3.1.3. Plonasienių indų įtempių analizė ir stiprumo sąlygos.....	27
3.2. BEM taikymas talpyklos stiprumui tirti .....	29
3.2.1. Talpyklos modelio sudarymas .....	32
3.2.2. Ryšių ir veikiančių apkrovų įvertinimas .....	34
3.2.3. Stiprumo skaičiavimo rezultatai.....	37
IŠVADOS.....	44
LITERARŪRA.....	45
PRIEDAI .....	46

**ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS**  
**TECHNOLOGIJOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS**  
**MECHANIKOS INŽINERIJOS KATEDRA**

**Saulius Kononovas. HORIZONTALAUS TIPO SLĖGINĖS TALPYKLOS STIPRUMO TYRIMAS TAIKANT BAIGTINIŲ ELEMENTŲ METODĄ / vadovas doc.dr. S. Rimovskis.**

**SANTRAUKA**

Slėginiams indams ir įrangai keliami griežti stiprumo ir patikimumo reikalavimai, kurie reglamentuojami tarptautinių ir vietinių standartų. Keičiant slėginio indo eksploataavimo sąlygas ir parametrus, būtina atlikti jo stiprumo įvertinimą. Tiriamoje talpykloje numatyta laikyti emulsinį kurą, esant atitinkamo dydžio vidiniam slėgiui. Tyrimas atliekamas naudojant baigtinių elementų metodo programinį paketą SolidWorks Simulation, kuris leidžia modeliuoti talpyklą kevaliniais elementais ir įvertinti skirtingų apkrovimo būdų įtaką bendram konstrukcijos įtempių būviui. Tyrimas parodė, kad pavojingiausiose vietose įtempiai neviršija reglamentuojamų leidžiamų įtempių reikšmių ir talpykla yra tinkama, esant naujoms eksploataavimo sąlygoms.

***Reikšminiai žodžiai:*** slėginė talpykla, stiprumas, BEM

**ŠIAULIAI UNIVERSITY**  
**FACULTY OF TECHNOLOGY AND NATURE SCIENCE**  
**DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING**

**Marius Šimulis.** Title. STRENGTH ANALYSIS OF HORIZONTAL PRESSURE VESSEL USING THE FINITE ELEMENT METHOD/ research advisor assoc. prof. dr. S. Rimovskis.

**SUMMARY**

The requirements of strength and reliability for pressure vessel and equipment are defined by international and local standards and codes. In case of change of working condition and parameters, it is necessary to define the strength of the structure. The vessel under consideration is projected to contain emulsified fuel under internal pressure. The finite element software package SolidWorks Simulation is used for research. It allows to model the pressure vessel by shell elements. The combined classes of stress due to a combination of loads are defined. The research shows that the stress intensity in the areas of maximum identified stresses does not exceed the allowable stress and the pressure vessel is proper for operation.

***Keywords:*** pressure vessel, strength, FEM

## **LENTELIŲ SĄRAŠAS**

2.1 lentelė. Talpyklos metalo cheminė sudėtis .....	15
2.2 lentelė. Talpyklos techniniai parametrai.....	15
2.3 lentelė. Tempimo-lenkimo bandymo mašinos МИРИ-500K techniniai duomenys .....	20
2.4 lentelė. Išpjovos Nr.1 bandinių tempimo bandymų rezultatai.....	21
2.5 lentelė. Išpjovos Nr.2 bandinių tempimo bandymų rezultatai.....	21
3.1 lentelė. Gauta modelio baigtinių elementų tinklelio duomenys .....	35
3.2 lentelė. Nustatytų ir leidžiamų įtempių palyginimas .....	43

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

<b>1.1 pav.</b> Dažniausiai pramonėje naudojamos slėginės įrangos tipai .....	11
<b>2.1 pav.</b> Metalų ultragarsinis storių matavimo prietaisas.....	16
<b>2.2 pav.</b> Talpyklos korpuso storių matavimo schema .....	17
<b>2.3 pav.</b> Talpos korpuso mėginių išpjovimo vietos .....	19
<b>2.4 pav.</b> Bandinių forma tempimo bandymui .....	19
<b>2.5 pav.</b> Tempimo-lenkimo bandymų mašina МИРИ-500К .....	20
<b>3.1 pav.</b> Stiprumo teorijų palyginimas dviašio įtempių būvio atveju [17].....	28
<b>3.2 pav.</b> Įtempių pasiskirstymas plonasieniame elemente .....	28
<b>3.3 pav.</b> Baigtinių elementų pavyzdžiai .....	30
<b>3.4 pav.</b> Membraninių ir lenkiamųjų įtempių pasiskirstymas plokštelės pjūvyje.....	32
<b>3.5 pav.</b> Talpyklos modelis SolidWorks aplinkoje .....	33
<b>3.6 pav.</b> Talpyklos modelį sudarančių elementų storiai.....	34
<b>3.7 pav.</b> Diskretizuoto baigtiniais elementais modelio vaizdas .....	35
<b>3.8 pav.</b> Užduotų kraštinių sąlygų vaizdas.....	36
<b>3.9 pav.</b> Slėgių pasiskirstymas į talpyklos sienelės.....	36
<b>3.10 pav.</b> Įtempių pasiskirstymo vaizdai, talpyklą veikiant savajam svoriui.....	38
<b>3.11 pav.</b> Įtempių pasiskirstymo vaizdai, talpyklą veikiant hidrostatiniam slėgiui .....	39
<b>3.12 pav.</b> Įtempių pasiskirstymo vaizdai, talpyklą veikiant vidiniam slėgiui .....	40
<b>3.13 pav.</b> Įtempių pasiskirstymo vaizdai, talpyklą veikiant savajam svoriui ir hidrostatiniam slėgiui .....	41
<b>3.14 pav.</b> Įtempių pasiskirstymo vaizdai, talpyklą veikiant savajam svoriui, hidrostatiniam ir vidiniam slėgiui .....	42



## ĮVADAS

Naftos ir dujų pramonės bei energetikos įmonių technologiniuose procesuose yra naudojama daug įvairios paskirties ir įvairių konstrukcijų slėginių indų, apie kurių paskirtį, konstravimo ir gamybos ypatumus aprašyta knygoje [1].

Slėginis indas – tai hermetiškai uždaryta talpykla, kurioje vyksta cheminiai, šiluminiai, kiti technologiniai procesai arba laikomos bei vežiojamos tokiosios medžiagos (dujos, skysčiai ir garai be priemaišų arba jų mišinys). Eksploatavimo metu, slėginio indo viduje ir išorėje slėgis būna skirtingas. Gamybiniuose procesuose dažniausiai naudojami indai, kurių viduje slėgis didesnis. Slėginis indas gali būti sudarytas iš daugiau nei vienos sekcijos (kamos), jo ribose yra įėjimo ir išėjimo atvamzdžiai iki jungties, skirti indui prie kito įrenginio prijungti. Prie šių įrengimų priskiriamos įvairios talpos, šilumokaičiai, reaktoriai, kolonos ir kita slėginė įranga (vamzdynai, pagalbinių saugos ir slėginiai įtaisai) [2].

Slėginių indų vystymosi pradžia galima laikyti XVIII a. pabaigą - XIX a. pradžią, kuomet pramonėje buvo pradėtas plačiai naudoti garas. Pirmieji slėginių indų pavyzdžiai buvo garo mašinos, lokomotyvai ir panašūs įrengimai. Jau tada žmonės susidurdavo su įvairiomis šios įrangos eksploatacijos problemomis. Įrengimai susidėvėdavo, gesdavo, įvykdavo įvairios avarijos, kurių metu buvo žalojami žmonės. Slėginė įranga vaikiama ilgalaikių kintamų apkrovų, todėl buvo pastebėta, kad viena iš šios įrangos elementų gedimų priežasčių – medžiagų nuovargis. Veikiant tokio tipo apkrovoms, neišvengiama defektų atsiradimo elementų paviršiuose, kas sumažina įrangos darbo resursą [3]. Daugeliu atveju gedimus dėl nuovargio lemia tiek projektavimo, tiek ir eksploatacijos klaidos.

Norėdami apsaugoti technologinius įrenginius nuo avarijų, įvairiose šalyse pamažu pradėtos kurti slėginės įrangos projektavimo ir naudojimo metodikos ir instrukcijos, kurios buvo sukurtos po ilgų metų stebėjimų, patirties kaupimo, avarijų ir gedimų priežasčių analizės.

XIX a. išryškėjusi medžiagų nuovargio problema aktuali ir šiomis dienomis. Ypač tai pastebima naftos perdirbimo pramonėje ir energetikoje. Ilgą laiką veikiami aukštų temperatūrų ir įtempių slėginės įrangos elementų medžiagose vyksta struktūriniai pokyčiai, todėl keičiasi metalo mechaninės savybės bei atsiranda įtrūkimai ir papildomos deformacijos, dėl ko įrenginiuose laikomos tokiosios medžiagos gali patekti į aplinką, sukelti apsinuodijimą, gaisrą ar net sproginimą. Dėl šių priežasčių slėginė įranga yra priskiriama potencialiai pavojingų įrenginių kategorijai. Tai reiškia, kad šio tipo įrangos patikimumas, ilgaamžiškumas yra griežtai reglamentuojamas, o darbo parametrų pakeitimas negali būti atliekamas, detaliam neištyrus

įrenginių darbo sąlygų, medžiagos savybių ir neatlikus visų būtinų stiprumo skaičiavimų ir bandymų.

Darbe apžvelgiami slėgines įrangos tipai, jos projektavimo bei eksploatavimo standartai, kurių metodinius nurodymus vykdant atliekama slėginės talpyklos stiprumo analizė, įvertinant naujas eksploatavimo sąlygas.

### **Tyrimo objektas**

Mazuto talpykla pagaminta iš įvairaus storio Plieno 3 (Ст3) lakštų, kurioje numatoma laikyti emulsuotą kurą, esant darbiniam pastoviam slėgiui 0,4 MPa.

### **Tyrimo tikslas**

Atlikti talpyklos stiprumo ir patikimumo tyrimą, įvertinant naujas eksploatavimo sąlygas ir darbo režimus. Tyrimams taikyti skaitinius metodus.

### **Tyrimo uždaviniai**

1. Išnagrinėti slėginių indų projektavimui ir eksploatacijai skirtus standartus, metodikas ir kitą specializuotą literatūrą;
2. Atlikti talpyklos lakštinės medžiagos (Plieno 3) mechaninių savybių tyrimą, įvertinant darbinę temperatūrą 150 °C.
3. Vadovaujantis standartų metodiniais nurodymais analitiškai apskaičiuoti talpos plieno takumo stiprį ir tempiamąjį stiprį, esant 150 °C temperatūrai;
4. Remiantis deformuojamų kūnų skaitinės mechanikos metodais atlikti talpyklos korpuso stiprumo tyrimą.
5. Atlikti gautų tyrimų rezultatų lyginamąją analizę ir pateikti išvadą apie talpyklos tinkamumą naujoms eksploatavimo sąlygoms.

### **Tyrimo metodika**

Magistro darbo tyrimai paremti skaitiniais deformuojamų kūnų mechanikos metodais. Tiriamas eksploatuotos mazuto talpyklos korpuso ir jo elementų stiprumas ir patikimumas. Taikomas programa SolidWorks Simulation.

### **Praktinė darbo reikšmė.**

Tyrimo rezultatai leidžia įvertinti eksploatuotos talpyklos stiprumą ir patikimumą, ją pritaikant emulsuotam kurui laikyti, esant nustatyto dydžio vidiniam slėgiui.

# 1. SLĖGINIŲ INDŲ TIPAI IR JŲ PROJEKTAVIMĄ REGLAMENTUOJANČIŲ TEISĖS AKTŲ APŽVALGA

## 1.1. Slėginių indų tipai

Šių laikų technologijos leidžia pagaminti pačios įvairiausios formos bei dydžių slėginę įrangą, tačiau dažniausiai naudojamos paprastos geometrinės formos arba jų derinių elementai. Įprasta pramonėje naudojamo slėginių indų forma – rutulys, cilindras, kūgis (žr. 1.1 pav.).



1.1 pav. Dažniausiai pramonėje naudojamos slėginės įrangos tipai

Stiprumo atžvilgiu, optimaliausia slėginio indo forma yra rutulys. Tačiau tokios formos indą sunkiau pagaminti, todėl jie yra brangesni ir rečiau naudojami. Labiausiai paplitę vertikalūs arba horizontalūs cilindriniai su pusrutulio ar elipsės formos galais.

Slėginiai indai skirstomi į plonasienius ir storasienius, stacionarius ir transportuojamus, talpyklas, cisternas, balionus ir kt. Prie slėginių indų jungiami kiti slėginiai įrenginiai (vamzdynai, pagalbinais saugos ir pagalbinais slėginiai įtaisai) [4]. Pagrindiniai slėginių indų ir slėginės įrangos parametrai, kuriems gaminyje yra suprojektuotas yra:

- didžiausias leidžiamasis slėgis  $p_s$ ;
- didžiausia/mažiausia leidžiamoji temperatūra  $t_s$ ;
- tūris  $V$ .

Indas projektuojamas atsižvelgiant į tai, kokios medžiagos jame bus laikomos, jų chemine ir fizikine savybe, darbinę temperatūrą ir slėgį, taip pat į tai, kokioje aplinkoje jis bus eksploatuojamas. Pagal laikomas medžiagas slėginiai indai skirstomi į skirtus laikyti dujoms, suskystintosioms dujoms, ištirpintoms suslėgiant dujoms, garams, taip pat skysčiams, kurių garų slėgis, esant didžiausiai leidžiamajai temperatūrai, yra 0,5 baro didesnis negu normalus

atmosferos slėgis ir skysčiams, kurių garų slėgis, esant didžiausiai leidžiamajai temperatūrai, yra didesnis negu normalus atmosferos slėgis ne daugiau kaip 0,5 baro [4]. Į atskirą grupę išskiriami kūrenami arba kitaip šildomi indai, galintys pernelyg įšilti bei skirti garui ir perkaitintam vandeniui ruošti, esant aukštesnei kaip 110 °C temperatūrai.

Takiosios medžiagos, kurios laikomos slėginiuose įrenginiuose, skirstomos į dvi grupes. *I grupę* sudaro takiosios medžiagos, kurios laikomos sprogstamosiomis, ypač degiomis, labai degiomis, degiomis (jeigu didžiausia leidžiamoji temperatūra viršija pliūpsnio temperatūrą), labai nuodingomis, nuodingomis, oksiduojančiomis. *II grupę* sudaro visos kitos takiosios medžiagos.

## 1.2. Slėginių indų projektavimo ypatumai

Pavojai, kurie galimi slėginio indo ir įrangos eksploatavimo metu, verčia taikyti patikimus projektavimo ir saugos užtikrinimo metodus, kurie garantuoja pakankamą saugą visais galimais gedimų atvejais. Projektuojant atsižvelgiama į visus svarbius veiksnius, užtikrinančius, kad slėginiai įrenginiai nekeltų pavojaus per visą numatomą jų naudojimo laiką. Taikomi išsamūs įtempių ar deformacijų būvio įvertinimo metodai, atitinkami atsargos koeficientai. Apskaičiuotas indo storis turi taip pat užtikrinti tinkamą konstrukcinį stabilumą.

Reglamentas [4] numato, kad slėginiai įrenginiai turi būti suprojektuoti apkrovoms, atitinkančioms jų numatomą panaudojimą ir kitas nesunkiai numatomas įrenginių veikimo sąlygas. Privaloma atsižvelgti į šiuos veiksnius:

- vidinį/išorinį slėgį;
- aplinkos ir veikimo temperatūras;
- statinį slėgį ir medžiagos masę, kai įrenginiai veikia ir yra bandomi;
- transporto judėjimo, vėjo ir žemės drebėjimo sukeliamas apkrovas;
- reaktyviausias jėgas ir reaktyviuosius momentus, kuriuos sukelia atramos, tvirtinimai, vamzdiniai, kt.;
- koroziją ir eroziją, medžiagų nuovargį, kt.;

Skaičiuotiniai slėgiai neturi būti mažesni nei didžiausias leidžiamasis slėgis, turi būti atsižvelgiama į takiųjų medžiagų statinį ir dinaminį slėgius bei nepatvarių takiųjų medžiagų skaidymąsi.

Pagrindinės medžiagos savybės, į kurias atsižvelgiama, yra tokios:

- takumo stipris, 0,2 % arba 1,0 % nustatyto stiprumo, kaip priimtinausia esant skaičiuotinajai temperatūrai;
- tempiamasis stipris;

- valkšnumo riba;
- duomenys apie medžiagų nuovargį;
- Jungo modulis (tamprumo modulis);
- atitinkamas plastinės deformacijos dydis;

Medžiagos iš kurių gaminama slėginė įranga turi būti pakankamai tšsios, patvarios, atsparios cheminiam slėginiame įrenginyje esančių takiųjų medžiagų poveikiui. Projektuojant reikia atsižvelgti į visus pagrįstai numatomus irimo procesus (pvz., koroziją, valkšnumą, medžiagų nuovargį), vykstančius naudojant įrenginį.

Slėginiuose įrenginiuose turi būti montuojami tinkami saugos įtaisai (slėgį ribojantys įtaisai, temperatūros reguliavimo įtaisai, kt.).

Statinės apkrovos metu, slėginės įrangos elementuose leidžiamieji įtempiai dažniausiai lyginami su medžiagos takumo stiprio ar tempiamojo stiprio vertėmis, esant skaičiuotinajai temperatūrai. Atsargo koeficiento parinkimas priklauso nuo medžiagos savybių. Jungčių koeficientai priklauso nuo tikrinamųjų bandymų rezultatų, jų reikšmės – 0,7-1.

### **1.3. Pagrindinių standartų ir normatyvinės dokumentacijos apžvalga**

Pramonėje ir energetikoje naudojama slėginė įranga priklauso potencialiai pavojingų įrengimų grupei, todėl šios įrangos gamyba, montavimas, eksploatacija ir remontas yra įstatymais ir standartais reglamentuojama sritis. Standartų reikalavimus ir jų taikymo ypatumus būtina žinoti slėginę įrangą projektuojant ar šiuos įrenginius modernizuojant.

Daugelis Lietuvos įmonėse naudojamų slėginių indų yra pagaminti prieš 20-30 ar daugiau metų pagal tuo metu mūsų šalyje galiojančius sovietinius standartus. Iki šiol šie įrenginiai eksploatuojami ir remontuojami laikantis šių standartų reikalavimų. Slėginės įrangos eksploatacija, techninės būklės patikrinimai ir likusio tarnavimo laiko įvertinimas reglamentuojamas metodiniuose nurodymuose RD 03-421-01 (PД 03-421-01) [5]. Tyrimų analizės ir daugiametės praktikos pagrindu, šiuose metodiniuose nurodymuose pateikiamos rekomendacijos įrengimų techniniam diagnozavimui, saugaus ir patikimo slėginės įrangos techninės apžiūros organizavimui ir vykdymui. Pramonėje naudojama slėginė įranga gaminama iš įvairių plieno markių. Įrangą eksploatacijos metu veikia įvairios išorinės jėgos ir kiti veiksniai. Dažnai įrangos nusidėvėjimui ir jos patikimumo sumažėjimui įtakos turi korozijos reiškiniai. Svarbu įvertinti įrangos elementų matmenų pokyčius dėl korozijos, šio reiškinio priežastis. Korozijos poveikio vertinimas gali būti atliekamas pagal ИТТ-93 instrukciją [6]. Šiame dokumente, atsižvelgiant į įrangos tipą ir eksploatacijos sąlygas, reglamentuojamas slėginės įrangos revizijos periodiškumas bei brokavimas.

Tinkamumo eksploatacijai metodikų taikymas slėginių įrenginių resurso ir/arba pažeidimo įvertinimui gali būti atliekamas ir pagal LST EN 13445:2009 ir API 579-1/ASME FFS-1 (Fitness-For-Service) standartų reikalavimus.

Reikalavimai slėginės įrangos projektavimui, medžiagoms, gamybai, bandymams, atitikties įvertinimo procedūroms, reglamentuojami įvairiais standartais, pvz., Rusijoje galioja GOST P 52857.1-2007 grupės standartai [7], Europos sąjungoje – LST EN 13445:2009 grupės standartai [8], o JAV taikomi Amerikos inžinierių mechanikų organizacijos ASME kodeksai/standartai [9]. Reikia pripažinti, kad ASME kodeksai yra taikomi plačiausiai.

## 2. PAGRINDINIAI DUOMEYS APIE TALPYKLĄ

### 2.1. Talpyklos paskirtis ir pagrindiniai techniniai duomenys

Įmonės technologinėse krosnyse planuojama deginti emulsuotą kurą, kuris yra sudarytas iš naftos perdirbimo proceso metu gaunamo visbrekingo likučio (turinčių santykinai didelę klampą) ir vandens, kurio stabilumą užtikrina specialiai į jį dedami cheminiai priedai. Vanduo, šiuo atveju, naudojamas, siekiant sumažinti šio kuro klampą. Pagaminto emulsuoto kuro kaupimui reikalinga talpykla. Šiam tikslui numatoma naudoti nuo 1998 m. eksploatuotą horizontalaus tipo talpyklą, kurioje buvo laikomas mazutas. Šios talpyklos pagrindiniai matmenys: skersmuo – 2800 mm.; ilgis – 17000 mm.; tūris – 100 m<sup>3</sup>.

Talpykla pagaminta iš įprastinės kokybės anglinio plieno 3 (GOST 380). Šios rūšies plienas dažniausiai naudojamas suvirintų ir nesuvirintų konstrukcijų gamybai, kurios dirba, esant teigiamai temperatūrai. Dažniausiai naudojami įvairių storių lakštiniai elementai.

Talpyklos medžiagos cheminė sudėtis pateikta 2.1 lentelėje. Duomenys paimti iš talpyklos techninio paso.

2.1 lentelė

#### Talpyklos metalo cheminė sudėtis

Elementų kiekis, %							
C	Si	Cr	Ni	Ti	Mn	S	P
0,15	0,27	0,024	0,022	0,00	0,32	0,017	0,016

Emulsuotą kurą numatyta laikyti talpykloje, esant darbinei temperatūrai 125 °C. Būtina įvertinti apsaugą nuo kure esančio vandens užvirimo. Tuo tikslu į talpyklą 4 bar slėgiu tiekiamas azotas.

Taigi, atlikus talpyklos rekonstrukciją, bus pakeisti ir šio įrenginio parametrai. Esamos ir būsimos talpyklos techniniai parametrai pateikti 2.2 lentelėje.

2.2 lentelė

#### Talpyklos techniniai parametrai

Tech. charakteristikos	Esami parametrai	Nauji parametrai
Darbinė terpė	Mazutas	Emulsuotas kuras
Darbinis slėgis, MPa	Atmosferinis	0,25
Projektinis slėgis, MPa	0,03	0,4
Darbinė temperatūra, °C	55	125
Projektinė temperatūra, °C	90	150

## 2.2. Likutinio metalo storio tyrimas

Sunkiosios pramonės įmonėse, ypač dirbančios naftos ir dujų sektoriuje, viena didžiausių problemų yra metalų konstrukcijų korozija. Šis reiškinys gali būti technologinių procesų avarinių situacijų priežastimi. Taigi, labai svarbus yra slėginės įrangos likutinio metalo storio monitoringas ir kontrolė. Tam tikslui yra sukurti specialūs metodai, įranga bei technologijos.

### 2.2.1. Metalo storio nustatymas ultragarsiniu metodu

Paprasčiausias metalo likutinio storio įvertinimo būdas – matavimas mechaniniais matavimo prietaisais (slankmačiu arba mikrometru). Tačiau uždaro tipo įrenginiuose arba elementuose, prie kurių priėjimas galimas tik iš vienos pusės (pvz., vamzdynuose, katiluose, talpose), šių prietaisų panaudojimas yra ribotas arba iš vis negalimas. Tokiu atveju kontrolė dažniausiai atliekama ultragarsiniu metodu. Tai vienas iš neardomos kontrolės būdų, naudojant ultragarsinius metalų storių matuoklius (žr. 2.1 pav.).



2.1 pav. Metalų ultragarsinis storių matavimo prietaisas

Bet kokio ultragarsinio storio matavimo pagrindas – garsinio impulso sklidimo nagrinėjamame objekte laikas. Naudojamas nuo 20 kHz iki 1000 MHz dažnio ultragarso bangos. Matuojamas laiko intervalas, per kurį banga pereina metalą ir atsispindėjusi sugrįžta į jutiklį. Metalo storis apskaičiuojamas formule:

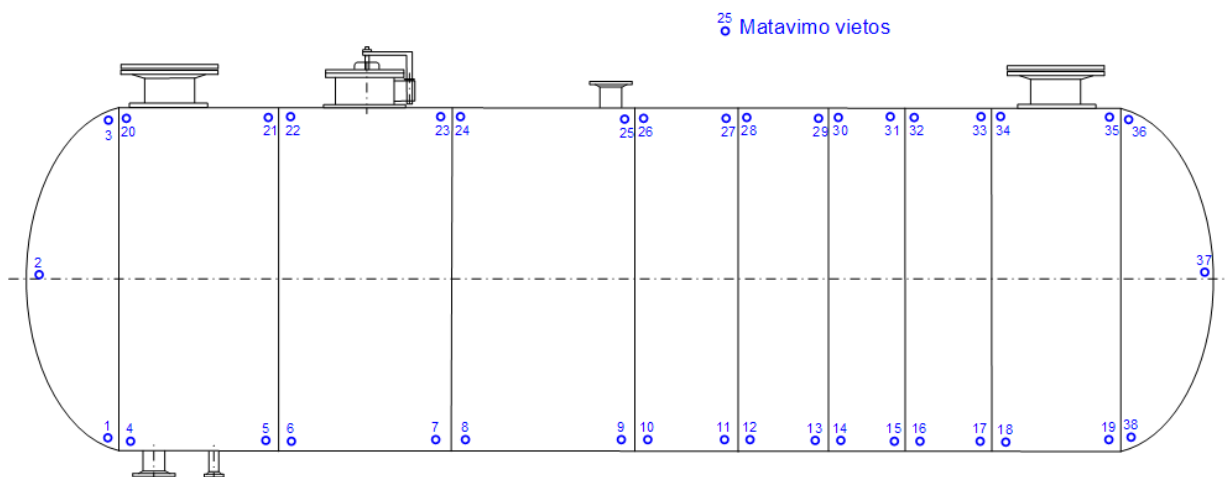
$$h = \frac{c \times t}{2}, \quad (2.1)$$

čia:  $c$  – garso greitis medžiagoje, m/s;

$t$  – laikas, s.



Ultragarsiniai metalo storio matuokliai rodo apskaičiuotą metalo storį ekrane. Talpyklos korpuso likutinio metalo storio matavimai atlikti ultragarsiniu storio matuokliu KRAUTKRAMER DMS-2 [10] pagal LST EN 14127-2011 standarto reikalavimus [11]. Talpos matavimo taškų išdėstymas parodytas 2.2 paveiksle.



**2.2 pav.** Talpyklos korpuso storių matavimo schema

### 2.2.2. Talpos likutinio metalo storio tyrimas

Pagal gautus ultragarsius storių matavimų duomenis yra nustatytas talpos metalo korozijos greitis, kuris yra apskaičiuojamas pagal formulę [5]:

$$KG = \frac{t_{\text{prad.}} - t_{\text{fakt.}}}{T_l \times K}, \quad (2.2)$$

čia:  $KG$  – korozijos greitis (mm per metus);

$t_{\text{prad.}}$  – pradinis (ar nominalus) tikrinamos sienelės storis (mm);

$t_{\text{fakt.}}$  – vidutinis paskutinio tikrinimo metu nustatytas sienelės storis (mm);

$T_l$  – laikas (metais) tarp paskutinio ir ankstesnio matavimo;

$K = 0,75$  – koeficientas, įvertinantis skirtumą tarp vidutinio numatomo korozijos greičio ir garantuojamo korozijos greičio.

Pagal pamatuotus duomenis ir apskaičiuotą korozijos greitį nustatomas likutinis sąlyginis talpos eksploatavimo laikas, kuris apskaičiuojamas pagal formulę [5]:

$$T_l = \frac{t_{fakt.} - t_{pask.}}{KG}, \quad (2.3)$$

čia:  $T_L$  – likęs sąlyginis eksploatavimo laikas (metais);

$t_{fakt.}$  – vidutinis paskutinio tikrinimo metu nustatytas sienelės storis (mm);

$t_{pask.}$  – skaičiuotinas reikiamas ribinis dalies ar zonos storis (mm);

$KG$  – korozijos greitis (mm per metus).

Slėginės talpyklos likutinio storio matavimo ir eksploatavimo resurso nustatymo rezultatai pateikti 1 priede. Pateikti duomenys rodo, kad esant duotoms eksploatavimo sąlygoms talpyklos eksploatavimo laikas gali būti pratesiamas mažiausiai 10 metų.

### 2.3. Plieno 3 mechaninių savybių tyrimo metodika ir rezultatai

Apie konstrukcijos stiprumą, standumą, patikimumą galima spręsti tik kai yra žinomos tiriamos konstrukcijos elementų medžiagų mechaninės savybės: stiprumas, tamprumas, plastiškumas, trapumas, kietumas ir kt. Šias savybes kiekybiškai apibūdina rodikliai, pvz., stiprumą – tempiamasis stipris ir takumo stipris; tamprumą – proporcingumo riba, tamprumo stipris; plastiškumą – tempiamasis stipris ir kt. Medžiagos mechaninės savybės nustatomos, atliekant mechaninius bandymus. Įvairūs norminiai dokumentai nustato bandymų sąlygas, pvz., bandinių formą ir matmenis, tikslumą, t. t. Normuojamas taip pat apkrovimo greitis, temperatūra, bandinių skaičius, mechaninių rodiklių nustatymo metodika ir kt.

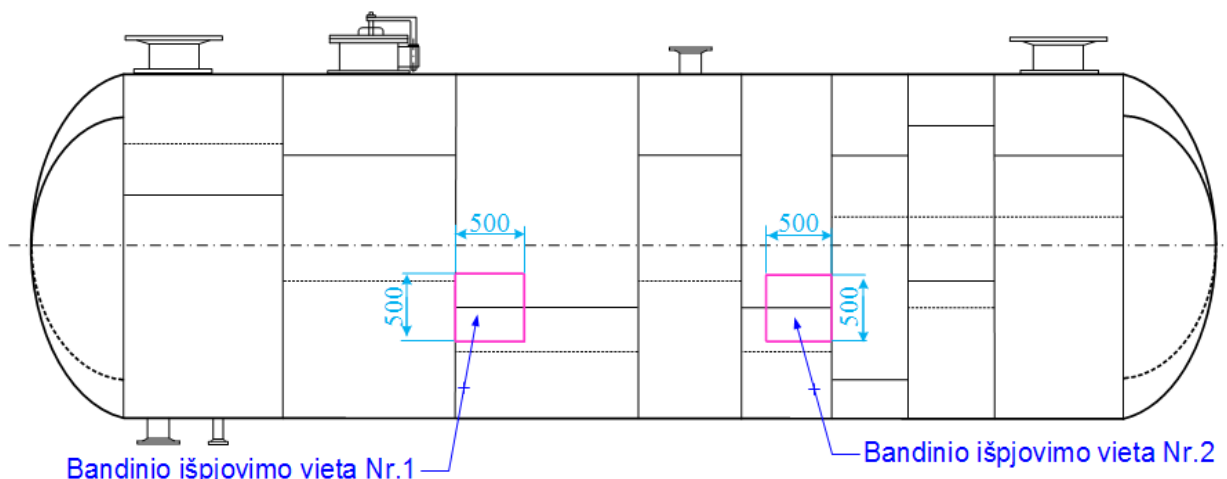
#### 2.3.1. Tempimo bandymų metodika ir rezultatai

Tempimo bandymas yra vienas iš pagrindinių medžiagų mechaninių bandymų. Jo metu užtikrinamas deformacijos būvis, kai bandinį veikia vienos krypties įtempiai. Dažniausiai šis bandymas atliekamas naudojant skritulinio skerspjuvio bandinius. Stačiakampio formos skerspjuvio bandiniai naudojami tik tuo atveju, jei skritulinio skerspjuvio bandinius yra sunku, arba visai neįmanoma pagaminti, pvz., bandant lakštinį metalą.

Tempiant bandinį automatiškai braižoma diagrama, vaizduojanti priklausomybę tarp bandinį veikiančios jėgos ir jo ilgio pokyčio. Ši diagrama perskaičiuojama ir gaunama diagrama, siejanti normalinius įtempius ir santykinę išilginę deformaciją, kuri yra įprastesnė ir labiau naudinga, atliekant inžinerinius konstrukcijų stiprumo įvertinimus.

Prieš atliekant talpyklos stiprumo skaičiavimus ir jos atitikties įvertinimą naujiems darbo parametrų, buvo atliktas talpyklos medžiagos (plieno 3) mechaninių savybių

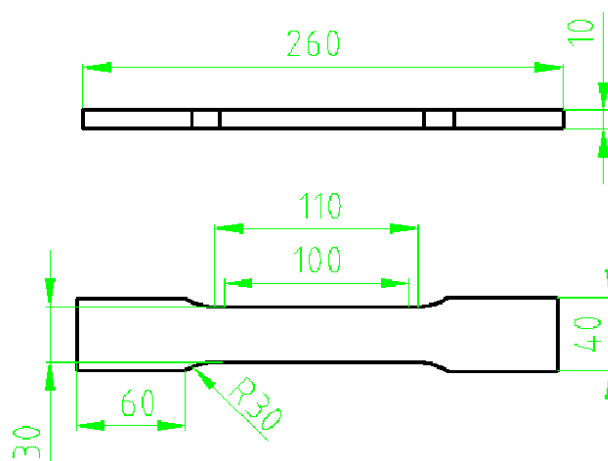
nustatymas. Tai svarbu visų pirma todėl, kad talpykla buvo ilgą laiką eksploatuojama ir jos medžiagos mechaninės savybės galėjo pasikeisti lyginant su tuo, kas apie naudojamą medžiagą pateikiama standartuose. Tuo tikslu, iš talpyklos buvo išjauti metalo mėginiai (vietos pažymėtos 2.3 pav.).



**2.3 pav.** Talpos korpuso mėginių išjovimo vietos

Tempimo bandymas atliktas pagal GOST 1497-84 standarto reikalavimus, esant 20 °C temperatūrai. Bandinių forma bei matmenys pateikti 2.4 pav.

Mechaniniai tempimo bandymai atlikti universalia tempimo-lenkimo bandymų mašina МИРИ-500К (žr.2.5 pav.), kurios techniniai duomenys pateikti 2.3 lentelėje [12].



**2.4 pav.** Bandinių forma tempimo bandymui



**2.5 pav.** Tempimo-lenkimo bandymų mašina МИРИ-500К

2.3 lentelė

**Tempimo-lenkimo bandymo mašinos МИРИ-500К techniniai duomenys**

Parametras	Vertė
Maksimali apkrova, kN	500
Minimali apkrova, kN	10
Maksimalus darbinės erdvės aukštis, mm.	450
Apkrovimo tempiant greičio ribos, kN/s	125
Apkrovimo ir deformacijų matavimo paklaida, %	±1

Metalo stiprumą apibūdina du svarbūs parametrai: takumo stipris ir tempiamasis stiprumas.

**Takumo stipris**, tai mažiausias sąlyginis įtempis, kuriam veikiant bandinys tįsta nedidinant apkrovos [13]:

$$R_e = \frac{F_e}{A_0}, \quad (2.4)$$

$$R_{p0,2} = \frac{F_{0,2}}{A_0}, \quad (2.5)$$

čia:  $F_e$  – jėga, kuriai veikiant metalas pradeda deformuotis plastiškai, nedidinant apkrovos;

$A_0$  – pradinis tempimo bandinio skerspjūvio plotas;

$F_{0,2}$  – jėga, kuriai veikiant liekamasis tempimo bandinio ilgėjimas sudaro 0,2 % nuo pradinio skaičiuojamojo ilgio. Pagal standartą – tai sąlyginis įtempis;

$R_e$  – metalo takumo stipris;

$R_{p0,2}$  – sąlyginis takumo stipris.

Kai kurios medžiagos takumo aikštelės neturi. Tačiau projektuotojui svarbu žinoti, kada prasideda intensyvus plastinis deformavimasis. Todėl nustatoma sąlyginis takumo stipris.

**Tempiamasis stipris** – didžiausias sąlyginis įtempis, kurį atlaiko bandinys [13]:

$$R_m = \frac{F_{\max}}{A_0}, \quad (2.6)$$

čia:  $F_{\max}$  – didžiausia jėga, užfiksuota tempiant bandinį;

$R_m$  – metalo tempiamasis stipris.

Bandymo mašinos griebtuvose įtvirtinti bandiniai, pradėjus didinti jėgą, pradeda ilgėti. Tempiančios jėgos didumą rodo manometras, bandinio pailgėjimą – atstumas tarp griebtuvų. Tempiančios jėgos ir bandinio pailgėjimo ryšys dažniausiai pateikiamas grafiku, iš kurio patogiausia nustatyti tiriamos medžiagos mechaninių savybių rodiklius.

Iš talpyklos metalo mėginių išpjovų Nr. 1 ir Nr. 2 (žr. 2.3 pav.) padarytų bandinių tempimo bandymų rezultatai pateikti 2.4 ir 2.5 lentelėse.

2.4 lentelė

**Išpjovos Nr.1 bandinių tempimo bandymų rezultatai**

Išpjovos/bandinio Nr.	$F_m, kN$	$R_m, MPa$	$R_{p0,2}, MPa$	A,%
1-1	47.7	450	196	33
1-2	47.5	448	185	33
1-3	47.7	450	186	33

2.5 lentelė

**Išpjovos Nr.2 bandinių tempimo bandymų rezultatai**

Išpjovos/bandinio Nr.	$F_m, kN$	$R_m, MPa$	$R_{p0,2}, MPa$	A,%
2-1	46.2	436	223	33
2-2	48.4	456	205	33
2-3	48.2	454	198	33

**2.3.2. Plieno 3 takumo stipris ir tempiamasis stipris, esant +150 °C temperatūrai, apskaičiavimas**

Mechaninės medžiagų savybės nėra pastovios. Joms poveikį turi įvairūs veiksniai. Vienas pagrindinių veiksnių, darančių įtaką slėginės įrangos mechaninėms savybėms, yra temperatūra.

Laikantis standartų reikalavimų mechaniniai medžiagų savybių rodikliai nustatomi vadinamoje kambario temperatūroje (~20 °C). Tačiau daug slėginės įrangos, ypač naftos ir dujų pramonėje, dirba aukštesnėse nei kambario temperatūroje. Medžiagų stipris temperatūrai kylant mažėja, o jai krintant didėja. Tuo tarpu medžiagų plastiškumas – atvirkščiai, temperatūrai kylant didėja, o krintant – mažėja. Todėl labai svarbu įvertinti temperatūros poveikį medžiagų mechaninėms savybėms.

Medžiagos takumo stipris ir tempiamasis stipris esant +150 °C temperatūrai buvo nustatyti pagal API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service standarte [13] pateiktą metodiką. Ši metodika skirta inžineriniam slėginės įrangos vertinimui, ji leidžia daryti išvadas apie likusį įrangos tarnavimo laiką.

Tiriamos talpyklos takumo stipris esant +150 °C temperatūrai [13]:

$$\sigma_{ys} = \sigma_{ys}^r \times \exp(C_0 + C_1T + C_2T^2 + C_3T^3 + C_4T^4 + C_5T^5), \quad (2.6)$$

čia:  $\sigma_{ys}^r = 185$  MPa – bandinių, išpjautų iš tiriamos talpyklos, plieno takumo stipris esant +20 °C temperatūrai (naudojama minimali iš bandimų metu nustatytų ir 2.4 ir 2.5 lentelėse pateiktų reikšmių);

$T$  – skaičiuojama temperatūra (mūsų atveju 150 °C);

$C_{0-5}$  – medžiagų koeficientai (paimti iš [13] F.2M; F.3 lentelių):

$$C_0 = 3,79335351 \times 10^{-2},$$

$$C_1 = -1,86385965 \times 10^{-3},$$

$$C_2 = 6,69470079 \times 10^{-6},$$

$$C_3 = -1,82518378 \times 10^{-8},$$

$$C_4 = 2,31521177 \times 10^{-11},$$

$$C_5 = -1,22947065 \times 10^{-14}.$$

Apskaičiuotas talpyklos korpuso metalo takumo stipris esant +150 °C temperatūrai yra  $\sigma_{ys}^r = 160$  MPa.

Tiriamos talpyklos tempiamasis stipris esant +150 °C temperatūrai:

$$\sigma_{uts} = \sigma_{uts}^r \times \exp(C_0 + C_1T + C_2T^2 + C_3T^3 + C_4T^4 + C_5T^5), \quad (2.7)$$

čia:  $\sigma_{uts}^r = 436$  MPa – bandinių, išpjautų iš tiriamos talpyklos, plieno tempiamasis stipris esant +20 °C temperatūrai (naudojama minimali iš bandimų metu nustatytų ir 2.4 ir 2.5 lentelėse pateiktų reikšmių);

$T$  – skaičiuojama temperatūra (mūsų atveju 150 °C);

$C_{0-5}$  – medžiagų koeficientai (paimti iš [13] F.4M; F.5 lentelių):

$$C_0 = 3,55835868 \times 10^{-2},$$

$$C_1 = -8,87531986 \times 10^{-4},$$

$$C_2 = -4,52108819 \times 10^{-6},$$

$$C_3 = 4,67964163 \times 10^{-8},$$

$$C_4 = -1,07882077 \times 10^{-10},$$

$$C_5 = 6,38793289 \times 10^{-14}.$$

Apskaičiuota tiriamos talpyklos korpuso metalo tempiamasis stipris esant +150 °C temperatūrai yra  $\sigma_{uts}^r = 345$  MPa.

### 3. TAPLYKLOS STIPRUMO ANALIZĖ

Analitinį tyrimą, kaip ir bet koki inžinerinį projektavimą galima išskaidyti į tris etapus. Visų pirma reali nagrinėjama konstrukcija idealizuojama ir pasirenkama jos skaičiuojamoji schema, kuri dažniausiai yra paprastesnė, nei realus objektas. Antrame etape atliekama skaičiuojamosios schemos analizė. Trečiame etape nagrinėjami gauti rezultatai ir daromos išvados ar reali konstrukcija gali tenkinti užduotas sąlygas ir parametrus, ar ji yra pakankamai patikima, pvz., stiprumo, standumo ar kt. požiūriu [14].

Pasirenkant skaičiuojamąją schemą, realaus objekto forma sudaroma iš vieno ar kelių paprastos formos elementų: strypo, plokštės, kevalo, masyvo, kt. Plokštės ir kevalai skaičiuojamosiose schemose žymimi paviršiumi, einančiu per šių elementų storio vidurį (jis vadinamas viduriniu paviršiumi). Plokštės vidurinis paviršius – plokštuma, kevalo – kreivas paviršius (cilindras, sfera, kūgis). Plokštėmis skaičiuojamosiose schemose paprastai tampa perdangos plokštės, hidrotechniniai užtvagai, kevalais – skliautiniai perdengimai, garo katilai, dujų ar skysčių rezervuarai. Skaičiuojamosiose schemose supaprastinamas ir veikiančių apkrovų ir atramų aprašymas ir vaizdavimas.

Antrame etape atliekami skaičiavimai, kurių pagrindą sudaro analitinių arba skaitinių metodų taikymas. Šiuo metu skaičiavimuose vis dažniau naudojami skaitiniai metodai, kurie leidžia pasirinkti sudėtingesnes skaičiuojamasias schemas ir gauti pakankamai tikslius rezultatus.

Šiame darbe pateikiami stiprumo skaičiavimai taikant baigtinių elementų metodų (BEM) programą SolidWorks Simulation. Ši programa leidžia pasirinkti įvairių tipų baigtinius elementus: tūrinius, kevalinius, strypinius. Ja patogiai modeliuojamos rėminės konstrukcijos, santvaros, plonasieniai gaminiai, sudėtingos geometrinės formos mechaninių sistemų elementai ir jų deriniai. Programa yra patogi tuo, kad galima ne tik nustatyti pavojingas konstrukcijų zonas, bet ir atlikti konstrukcijos optimizaciją, pritaikyti geometrinę ir fizikinę netiesiškumą, analizuoti nuovarginius reiškinius. Atskirai galima pateikti rezultatus pagal ASME slėginių indų skaičiavimo reikalavimus. Slėginių indų skaičiavimo modulis apima įtempių kombinacijas nuo įvairių apkrovų derinių bei įtempių perskaičiavimą pagal ASME International Boiler and Pressure Vessel Code Division II.

#### 3.1. Stiprumo kriterijai ir sąlygos

Konstrukcijų projektavimo normos beveik visada riboja konstrukcijų elementų įtempių didumą taip, kad neatsirastų plastinės (liekamosios) deformacijos. Leidžiami tik vietinio



pobūdžio tampriai plastinio deformavimo procesai, kurie neapima visos medžiagos. Dažnai jie neišvengiami įtempių koncentracijos vietose. Kai plastinės deformacijos apima didesnes elementų sritis, jos kaupiasi, didėja, keičia jų geometriją, trikdo jų sąveiką ir padaro neįmanomą visos konstrukcijos eksploatavimą [15]. Konstrukcijas veikia įvairūs aplinkos veiksniai. Mechaninius aplinkos veiksnius išreiškiame jėgomis ir apkrovomis. Kad konstrukcija nesuirėtų arba per daug nepakeistų formos, mechaninio aplinkos poveikio funkcija  $\Phi$  neturi viršyti konstrukcijos medžiagos pasipriešinimo funkcijos  $f$ . Kadangi skaičiavimo tikslumas visada gaunamas su tam tikra paklaida, būtinas atsargos įvertinimas. Atsarga įvertinama koeficientu, kuris išreiškiamas pasipriešinimo ir poveikio funkcijų santykiu:

$$n = \Phi / f . \quad (3.1)$$

Atsargos koeficientas pasirenkamas, atsižvelgiant į konkrečias konstrukcijos darbo sąlygas, sukauptą patirtį, šiuolaikinės technikos lygį.

### 3.1.1. Konstrukcijų patikimumo skaičiavimo metodai

Konstrukcijos patikimumas didžia dalimi priklauso nuo jos elementų stiprumo. Labiausiai paplitęs konstrukcinių elementų stiprumo skaičiavimo būdas yra skaičiavimas pagal įtempius. Jis pagrįstas tuo, kad konstrukcijos tinkamumo kriterijumi laikomas įtempis, kuris lyginamas su ribine reikšme. Ribinė įtempio reikšmė nustatoma eksperimentiniu būdu, ji siejama su medžiagos tempiamuoju stipriu arba takumo stipriu.

#### Leistinių įtempių metodas.

Taikant leistinių įtempių metodą, įtempiai atitinkantys nominalią apkrovą lyginami su ribiniais įtempiais, padalintais iš atsargos koeficiento:

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_{lim}}{n} , \quad (3.2)$$

čia:  $\sigma_{adm}$  – leistinieji įtempiai;

$\sigma_{lim}$  – ribiniai įtempiai;

$n$  – stiprumo atsargos koeficientas.

Ribine apkrova yra laikoma takumo arba tempiamuoju stipriais tempiant.

#### Ribinių būvių metodas.

Taikant šį metodą, stiprumo salygoje naudojami projektiniai įtempiai, t. y., įtempiai, kurie gali būti konstrukcijoje, pasiekusioje ribinį būvį (tokį būvį, kai konstrukcijos nebegalima

eksploatuoti). Projektinės apkrovos reikšmė gaunama, padauginus nominalinę apkrovos reikšmę iš apkrovos patikimumo koeficiento:

$$\sigma_{lim} = \frac{R_{lim}}{A}, \quad (3.3)$$

čia:  $\sigma_{lim}$  – ribinis būvis;  
 $R_{lim}$  – ribinė apkrova;  
 $A$  – skerspjūvio plotas.

### 3.1.2. Talpyklos metalo leistinų įtempių nustatymas

Talpyklos metalo leistinieji įtempiai, apskaičiuojami pagal EN 13455 standarto reikalavimus [8]. Plieno 3 leistinieji įtempiai esant +20 °C temperatūrai:

$$\sigma_{adm} = \min\left(\frac{R_{p0.2/t}}{1.5}; \frac{R_{m/t}}{2.4}\right), \quad (3.4)$$

čia:  $R_{p0.2/t}$  – metalo bandinių, išpjautų iš tiriamos talpyklos, plieno takumo stipris esant +20 °C temperatūrai (paimta iš mechaninių bandymų rezultatų (žr. 2.4 ir 2.5 lent.);  
 $R_{m/t}$  – metalo bandinių, išpjautų iš tiriamos talpyklos, plieno tempiamasis stipris esant +20 °C temperatūrai (paimta iš mechaninių bandymų rezultatų (žr. 2.4 ir 2.5 lent.);  
 1.5; 2.4 – atsargos koeficientai (paimti iš [8] 6-1 lentelės).

Mūsų atveju, esant +20 °C:

$$\sigma_{adm} = \min\left(\frac{185}{1,5}; \frac{436}{2,4}\right). \quad (3.5)$$

Talpyklos metalo leistinieji įtempiai esant +20 °C temperatūrai yra  $\sigma_{adm} = 123$  MPa.

Plieno 3 leistinieji įtempiai esant +150 °C temperatūrai:

$$\sigma_{adm} = \min\left(\frac{160}{1,5}; \frac{345}{2,4}\right). \quad (3.6)$$

Talpyklos metalo leistinieji įtempiai esant +150 °C temperatūrai yra  $\sigma_{adm} = 107$  MPa. Gauti rezultatai rodo, kad tiriamos talpyklos metalo membraniniai įtempiai, esant naujiems darbo parametrams, negali viršyti 107 MPa.

### 3.1.3. Plonasienių indų įtempių analizė ir stiprumo sąlygos

Stiprumo sąlygos parodo, kad medžiaga, veikiamą apkrovos, nesuirs ir kad joje neatsiras nepageidaujamų didelių plastinių deformacijų. Kai įtempių būvis vienašis, stiprumo sąlyga paprasta. Kai įtempių būvis dviašis ar triašis, konstrukcijos poveikio funkcija priklauso ne nuo vienino parametro. Tokiu atveju, būtina rasti tokią įtempių parametrais aprašomą funkciją (ekvivalentinių įtempių funkciją), kurios sprendinį būtų galima lyginti su ribiniu įtempiu, gaunamu atliekant tempimo arba gniuždymo bandymą.

Pirmoji ir paprasčiausia stiprumo teorija – *didžiausių normalinių įtempių teorija* (Galilėjaus) [16]. Pagal šią teoriją, pavojingas kūno būvis susidaro tada, kai vienas svarbiausiasis įtempis prilygsta projektiniam stipriui  $R$ . Šią sąlyga galima užrašyti taip:  $\sigma_1 \leq R$ . Ši teorija neapima kitų krypčių svarbiausiųjų įtempių ( $\sigma_2, \sigma_3$ ), nors jie turi įtaką stiprumui.

*Maksimalių tangentinių įtempių teorija* (Tresca sąlyga) apibrėžia pavojingo būvio sąlygą taip:  $\sigma_1 - \sigma_3 \leq R$ . Pagal šią teoriją kūno stiprumas pažeidžiamas tada, kai medžiagoje atsiranda kritiniai tangentiniai įtempiai, priklausantys nuo normalinių įtempių, veikiančių šlyties plokštumose. Jos trūkumas – neįvertinamas vidurinio svarbiausiojo įtempio  $\sigma_2$ , kuris taip pat gali būti reikšmingas.

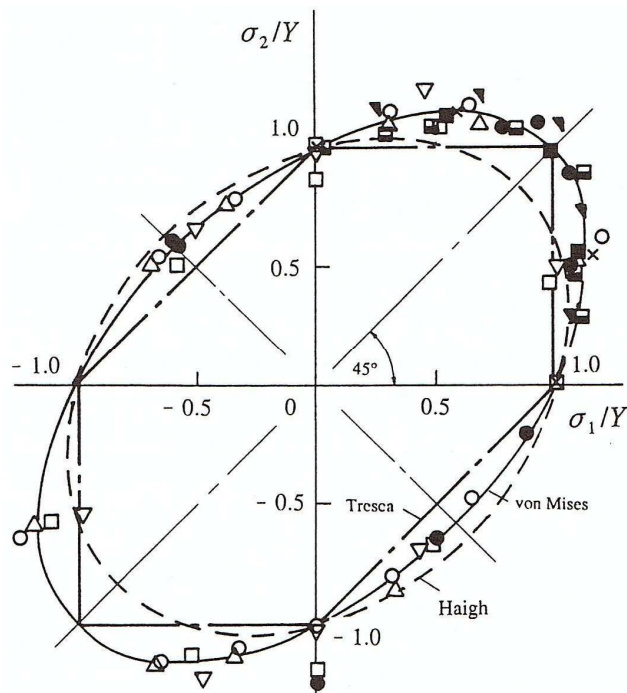
*Energetinė stiprumo teorija* (vadinamoji Huberio ir Mizeso sąlyga) išreiškiama tokia priklausomybe:

$$\sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \geq R. \quad (3.7)$$

Šioje priklausomybėje naudojami visi svarbiausieji įtempiai, ji gerai tinka plastinėms medžiagoms ir yra labai plačiai taikoma.

Jei tyrimuose taikomas leistinų įtempių metodas, vietoj projektinio stiprio  $R$  stiprumo sąlygose nurodomi leistinieji įtempiai (plastiškų medžiagų takumo stipriai ir trapių medžiagų tempiamieji stipriai, padalinti iš atsargos koeficientų).

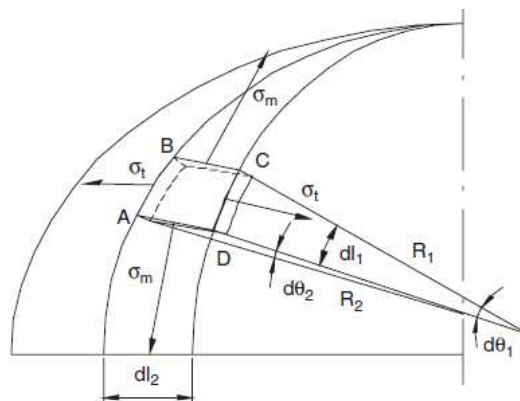
Teorijų palyginimą dviašio įtempių būvio atveju iliustruoja diagrama, pateikta 3.1 pav. [17]. Diagramos koordinatės – svarbiausiųjų įtempių  $\sigma_1$  ir  $\sigma_2$  ir proporcingumo ribos  $Y$  santykiai. Be skirtingas stiprumo teorijas nusakančių linijų, diagramoje taip pat pateikti skirtingų medžiagų irimo pradžios taškai, gauti iš atliktų eksperimentų. Duomenys rodo, kad maksimalių normalinių įtempių teorija tinka tik trapioms medžiagai (pvz., ketui), o plastiškoms medžiagoms (pvz., plienui, variui, aliuminiui) naudotina energinė hipotezė.



**3.1 pav.** Stiprumo teorijų palyginimas dviašio įtempių būvio atveju [17]

Plonasieniu vadiname indą, kurio sienelės storis  $t$  mažas, palyginus su indo skersmeniu  $D$  ( $t < 0,1D$ ). Cilindro, kūgio, paraboloido ir kitokio sukinio formos indai (talpyklos, katilai, vamzdžiai) dažniausiai veikiami vidinio skysčių ar dujų slėgio.

Kai indo sienelėje nėra didelių paviršiaus pokyčių, taikoma kevalų (membraninė) teorija, kuri pagrįsta normalinių įtempimų per visą plonos sienelės storį tolygiu pasiskirstymu. Iš indo išpjautą elementą veikia ne tik dujų ar skysčio masės, bet ir tempimo įtempiai meridianine kryptimi (meridianiniai įtempiai  $\sigma_m$ ) ir tempimo įtempiai žiedine kryptimi (žiediniai įtempiai  $\sigma_t$ ). Įtempimų pasiskirstymo vaizdas pateiktas 3.2 pav.



**3.2 pav.** Įtempimų pasiskirstymas plonasieniame elemente

Įtempių  $\sigma_m$  ir  $\sigma_t$  apskaičiavimas įvairių formų elementams aprašytas daugumoje vadovėlių ir žinybų (pvz., [14, 18, 20, 21]). Radialine kryptimi veikia radialiniai įtempiai  $\sigma_r$ , kurie lygus slėgiui  $-p$  prie indo sienelės vidinio paviršiaus ir nuliui prie išorinio paviršiaus. Ploniasieniams indams šie įtempiai yra santykinai maži ir jų paprastai nepaisoma. Taigi, indo sienelės įtempių būvis yra dviašis. Ploniasienių indų stiprumo sąlygos rašomos, remiantis kuria nors plastiškumo hipoteze. Pvz., taikant energetinę stiprumo teoriją, stiprumo sąlyga būtų tokia:

$$\sigma_d = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_m^2 - \sigma_t \sigma_m} \geq R_{p0,2}. \quad (3.8)$$

Kadangi abu įtempiai yra teigiami,  $\sigma_d < \sigma_{\max}$ . Tai verčia taikyti griežtesnę sąlygą, t. y., maksimalių normalinių įtempių stiprumo hipotezę, kuri paprastai taikoma tik labai trapioms medžiagoms:

$$\sigma_{\max} (= \sigma_t) \leq R_{p0,2}. \quad (3.9)$$

Beje, taikant maksimalių tangentių įtempių teoriją, kai įvertinamas ir vidinis dujų slėgis ( $\sigma_3 = -p$ ), gaunama šiek tiek didesnė įtempių reikšmė:

$$\sigma_{\max} (= \sigma_t + p) \leq R_{p0,2}. \quad (3.10)$$

Pateiktos sąlygos tinka indo pjūviuose, kurie yra pakankamai toli nuo paviršiaus lūžio arba sienelės storio pokyčio vietų, kuriose deformacijų būvis yra sudėtingesnis. Tokiose vietose atsiranda ne vien tik tempimo, bet ir lenkimo įtempiai, o bendros įtempių reikšmės pasidaro daug kartų didesnės.

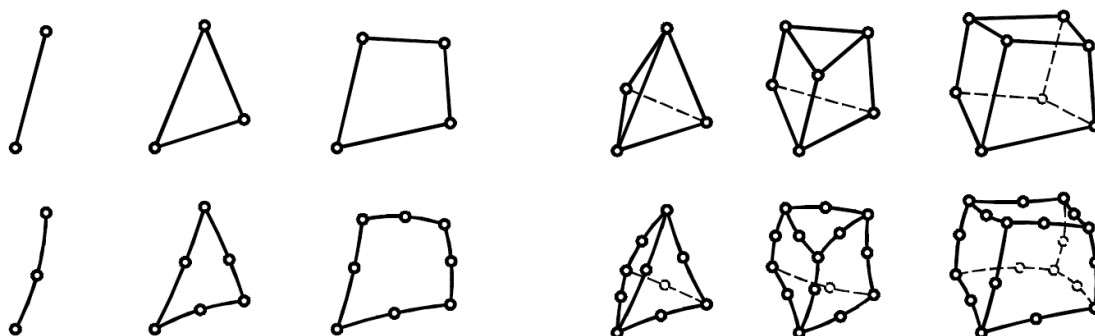
### 3.2. BEM taikymas talpyklos stiprumui tirti

Baigtinių elementų metoda – tai skaitinis metodas, skirtas matematinėms diferencialinėms lygtims spręsti, kuriomis aprašomi įvairūs fizikiniai reiškiniai. BEM galima spręsti mechaninių, termodinaminių, srautų, elektromagnetinių ir kitokių fizinių sistemų uždavinius, modeliuoti dinامينius procesus. Taikant šį metodą, nagrinėjama struktūra skaidoma į paprastos formos elementus (baigtinius elementus), todėl rezultatai gaunami su tam tikra paklaida. BEM šiuo metu labai plačiai taikoma inžineriniuose skaičiavimuose, kadangi šis metodas pateikiamas kartu su šiuolaikinėmis automatizuoto geometrinio projektavimo programomis ir jis leidžia dar projektavimo stadijoje nesunkiai tirti tirti projektuojamus, patikrinti ar prognozuoti jų savybes.

BEM algoritmas yra beveik toks pat kaip ir įvairių fizinių sistemų. Atliekant analizę paprastai sprendžiami tokie klausimai [18]:

- sudaromas diskretus tiriamojo kūno arba srities modelis (aprašoma objekto geometrija, objekto medžiagos elgsena);
- nurodomos kraštinės sąlygos ir išorės poveikis;
- sudaroma modelio lygčių sistema ir ji išsprendžiama;
- iš lygčių sistemos sprendinių apskaičiuojami reikalingi išvestiniai dydžiai (kieto deformuojamo kūno atveju dažniausiai tai deformacijos ir įtempiai).

Baigtinių elementų parinkimas priklauso nuo sprendžiamo uždavinio pobūdžio ir objekto geometrijos. Jis apibudinamas tipu, forma ir mazgų skaičiumi. Dvimatėse struktūrose baigtiniai elementai parenkami trikampiai ir keturkampiai, trimatėse – įvairios prizmės, apribotos trikampių ir keturkampių (žr. 3.2 pav.).



**3.3 pav.** Baigtinių elementų pavyzdžiai

Praktika rodo, kad trimačiais baigtiniais elementais galima modeliuoti tik storasienius kevalus, kurių sienelės santykis su skersmeniu mažesnis nei 10. Atsižvelgiant į nagrinėjamos talpyklos formą ir jos sienelės santikį su skersmeniu ( $t/D = 0,0043 < 0,1$ ), galima padaryti išvadą, kad tai ploniasienis indas, kurio stiprumo analizei atlikti gali būti taikomi kevalų tipo struktūrų tyrimo metodai (kevalu čia vadinama plonasiene erdvinė konstrukcija). Indus su tokiu santykiu modeliuoti tūriniais baigtiniais elementais galima, tačiau yra keletas trūkumų, iš jų pagrindiniai yra šie:

- dėl didelio elementų skaičiaus, būna didelės analizės laiko sąnaudos, reikalingi spartesni kompiuteriai;
- neišskiriami atskirai membraniniai ir lenkiamieji įtempiai (naudojant shell tipo elementus, tai nesunkiai atliekama).

Kevalų, sudarytų iš kreivų paviršių, skaičiavimą nagrinėja klasikinės kevalų teorijos, tačiau jų lygtys yra per daug sudėtingos, kad jas būtų galima spręsti bet kuriam kevalui. Šiuo metu dažniausiai naudojamas BEM.

Plokščios ir kevalinės struktūros nuo dvimačių skiriasi tuo, kad joms galimos apkrovos ne tik struktūros plokštumoje, bet ir nukreiptos kampu į plokštumą. Kevalus nuo plokščių skiria viduriniojo paviršiaus forma (plokščių vidurinis paviršius yra plokščias, o kevalo – kreivas). Plokštelėse pridėtasias jėgas atsveria vidiniai lenkimo momentai ir šlyties jėgos, o kevaluose, be minėtų jėgų, dar ir membraninės jėgos. Dėl šios priežasties kevalai yra ekonomiškesnės struktūros ir gali atlaikyti didesnes apkrovas, nei plokštės [19].

Lenkimo įtempiai kevalinėse struktūrose atsiranda nuo apkrovos projekcijos, statmenos kevalo vidiniam paviršiui. Jų atstojamosios (lenkimo ir sukimo momentai) apskaičiuojami taip [19]:

$$M_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{xx} z dz, \quad M_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{yy} z dz, \quad M_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{xy} z dz, \quad (3.11 a)$$

$$Q_x = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xz} dz, \quad Q_y = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{yz} dz. \quad (3.12 b)$$

Membraniniai įtempiai kyla nuo apkrovos projekcijos, lygiagrečios su kevalo viduriniu paviršiumi. Jų atstojamosios:

$$N_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{xx} dz, \quad N_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{yy} dz, \quad N_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{xy} dz. \quad (3.13)$$

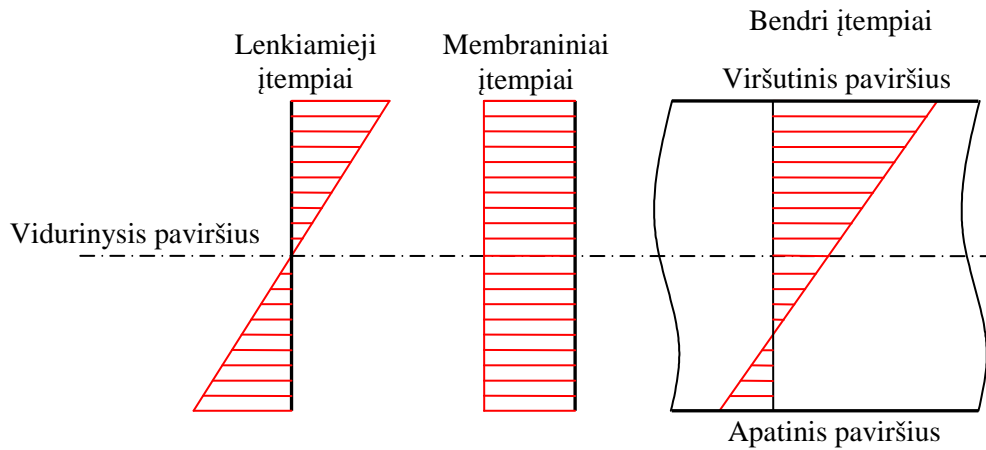
Lenkimo įtempiai kinta tiesiškai storio kryptimi, jie lygūs nuliui viduriniajame paviršiuje, o membraniniai įtempiai pasiskirsto tolygiai per visą kevalo storį (žr. 3.4 pav.).

Bet kuriame kevalo sluoksnyje, kuris nuo viduriniojo paviršiaus nutolęs atstumu  $z$ , veikiantys įtempiai apskaičiuojami taip [19]:

$$\sigma_{xx} = \frac{N_x}{h} + \frac{M_x z}{h^3/12}. \quad (3.14)$$

ir t. t.

Patys paprasčiausi kevalų baigtiniai elementai yra plokštuminiai (sudarantys plokščių ir membraninių elementų superpoziciją). Tokiais elementais aproksimuojama kreivalinė konstrukcija pakeičiama laužytomis plokštumėlėmis. Kad diskretizuotas modelis būtų kuo artimesnis struktūros geometrijai, dažnai tenka naudoti tankų plokščių kevalinių elementų tinklą.



**3.4 pav.** Membraninių ir lenkiamųjų įtempių pasiskirstymas plokštelės pjūvyje

Membraniniai elementai mazge turi du laisvės laipsnius (poslinkius koordinačių ašių elemento plokštumoje kryptimi). Lenkiamieji elementai turi tris laisvės laipsnius (poslinkį statmena elemento plokštumai kryptimi ir du posūkius apie ašį elemento plokštumoje). Papildomai pridedamas dar vienas laisvės laipsnis – posūkis apie koordinačių ašį, statmeną elementų plokštumai. Taigi, kevalo elemento mazgo  $i$  laisvės laipsniai:

$$\{U_i^e\} = \{u_i \quad v_i \quad w_i \quad \theta_{xi} \quad \theta_{yi} \quad \theta_{zi}\}. \quad (3.15)$$

Kevalinių struktūrų standumo matricų sudarymas, koordinačių transformavimo procedūros ir skaičiavimo seka išsamiai aprašyta [19].

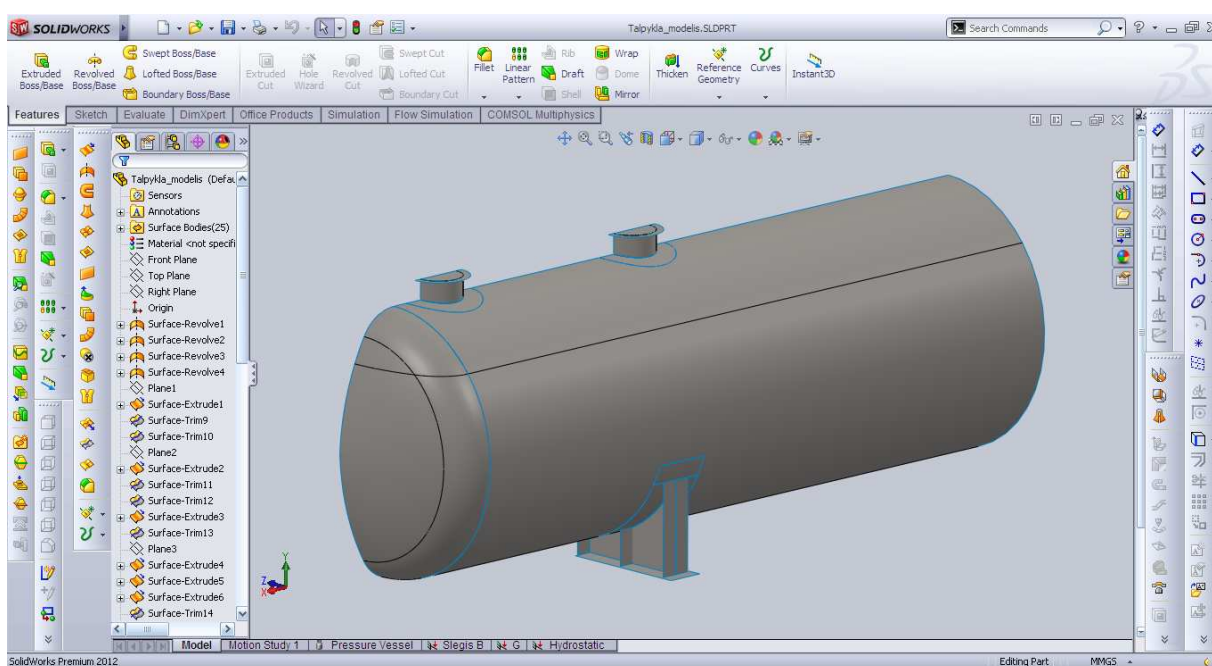
### 3.2.1. Talpyklos modelio sudarymas

Baigtinių elementų analizės tikslumas priklauso nuo tinklo elementų skaičiaus ir dydžio (kuo elementai mažesni, tuo tiksliau aproksimuojama nagrinėjama sritis ir gaunamas tikslesni rezultatai). Tačiau būtina įvertinti tai, kad mažėjant elementų dydžiui, didėja jų skaičius, kas lemia didesnes skaičiavimo sąnaudas. Generuojant struktūros tinklą, dažnai būna tikslinga rinktis ne vienodų dydžių elementus. Tose modelio vietose, kuriose rezultatų tikslumas yra svarbesnis, elementų tinklas tankinamas. Be to, diskretizuojant plonasienę struktūrą, reikia įvertinti ir tai, kad ploname kevale lenkimo momentų įtaka didelė netoli atramų, formos pokyčio vietose ir pan. Toliau nuo tokių vietų vyrauja membraninės deformacijos ir įtempiai. Membraninės įrašos pakankamai tiksliai apskaičiuojamos retu baigtiniu elementų tinklu, tuo tarpu lenkimo momentai pakankamu tikslumu gali būti apskaičiuojami tik taikant tankesnį elementų tinklą.



Talpyklos modelis buvo suformuotas SolidWorks grafinio projektavimo programa iš atskirų plokščių ir kevalinių elementų, atsižvelgiant į matmenis, nurodytus surinkimo brėžinyje (žr. 2 priedą). Modeliuojant procesus baigtinių elementų metodu, ne visada būtina atkurti visą konstrukciją. Tuo atveju, kai konstrukcija turi simetrijos plokštumas, dažniai gali būti naudojamas konstrukcijos pusės arba vieno ketvirčio modelis.

Kadangi nagrinėjama slėginė talpykla turi dvi simetrijos plokštumas (smulkūs elementai, tokie kaip nedidelio skersmens atvamzdžiai, joje neįvertinami), ir nėra apkrovų, kurių poveikis būtų nesimetrišnis, pasirenkamas vieno ketvirčio talpyklos modelis, kuris 3.5 pav. pavaizduotas darbinėje SolidWorks aplinkoje. Jei pavyzdžiui reiktų įvertinti vėjo apkrovą, galėtų būti naudojamas pusės konstrukcijos modulis su pilna atrama.



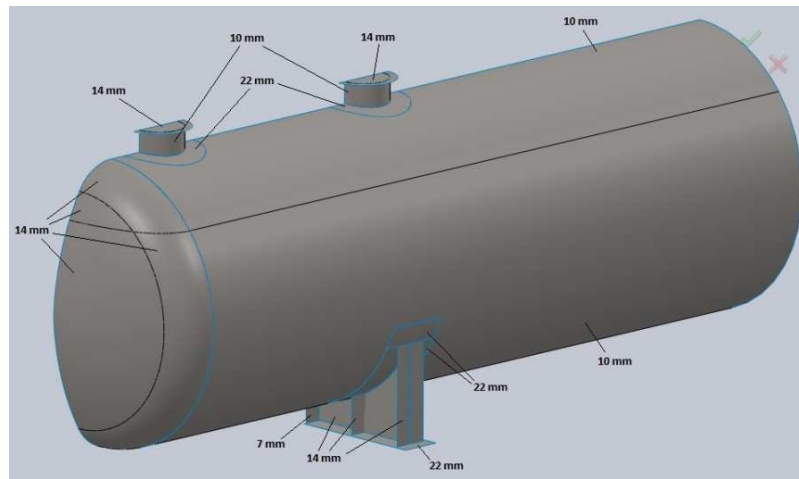
**3.5 pav.** Talpyklos modelis SolidWorks aplinkoje

Sudarant baigtinių elementų modelį, kiekvienam jo elementui būtina priskirti atitinkamos medžiagos charakteristikas. Galima pasirinkti iš programos duomenų bazėje kataloge esančių medžiagų (įvairių metalo lydinių, plastikų, gumos, medienos, stiklo pluošto, kt.). Esant specialiam poreikiui ir neradus duomenų bazėje reikiamos medžiagos, pats vartotojas gali susikurti medžiagą ir apibrėžti jos savybes pagal poreikį.

Nagrinėjamu atveju, į SolidWorks medžiagų katalogą buvo įtraukta nauja medžiaga – plienas 3, kuri buvo priskirta visoms plokštumoms ir visiems kevaliniams elementams, iš kurių suvirinta talpykla. Šiai medžiagai priskirtos charakteristikos, kurios atitinka nagrinėjamo plieno 3 charakteristikas, esant 150 °C temperatūra:

- takumo stipris – 160 MPa;
- tempiamasis stipris – 345 MPa;
- tamprumo modulis – 2,1 GPa;
- tankis – 7800 kg/m<sup>3</sup>.

Kadangi talpyklos modelis sudarytas iš shell tipo elementų, būtina kiekvienam iš šių elementų užduoti storį. Tai atlikta, atsižvelgiant į talpyklos darbo brėžiniuose nurodytus korpuso, laikiklių, atvamzdžių ir kitų dalių lakštų storius ir leistinus korozijos gylius (žr. 3.6 pav.). Visoms plokštumoms ir kevaliniams elementams jungiančiuoją briauna pasirinkta viduriniojo paviršiaus briauna. Suvirinimo siūlės neįvertintos, kadangi jų įtakos koeficientas stiprumo skaičiavimuose lygus 1 [9].



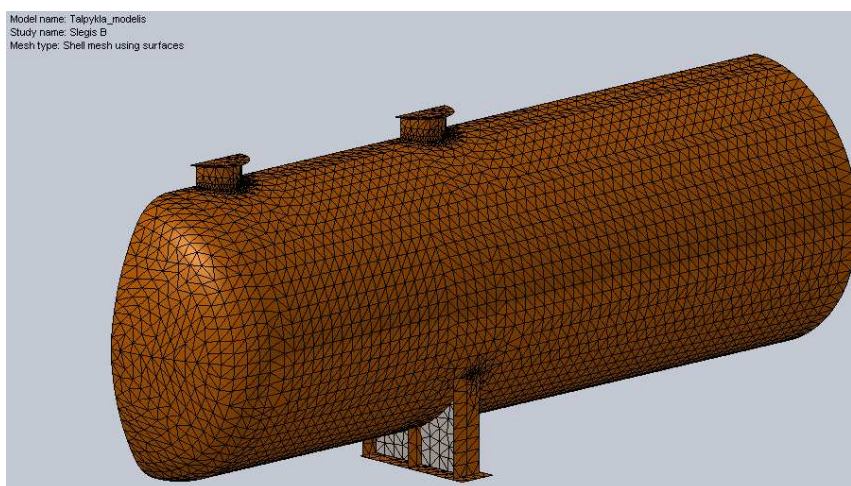
**3.6 pav.** Talpyklos modelį sudarančių elementų storiai

Talpyklos suskaidymas baigtiniais elementais daugelyje BEM programų gali būti vykdomas automatiškai, pasirenkant reikiamą elementų tinklelio tankį. Yra galimybė tam tikrose analizės atžvilgiu svarbesnėse modelio vietose tinklelį sutankinti arba išretinti. Tai leidžia taupyti skaičiavimui naudojamus kompiuterio resursus ir laiką. Talpyklos tinklelis buvo sutankintas viršutinių atvamzdžių ir talpyklos korpuso sujungimo vietose, taip pat, ties atramos viršutine briauna. SolidWorks Simulation diskretizuoto tiesiniais trikampaiais baigtiniais elementais modelio vaizdas pateiktas 3.7 pav. Pagrindiniai tinklelio duomenys pateikti 3.1 lentelėje.

### 3.2.2. Ryšių ir veikiančių apkrovų įvertinimas

Plokštuminiai kevalų elementai sudaryti iš membraninių ir lenkiamos plokštelės elementų. Pirmieji mazge turi du laisvės laipsnius (poslinkius koordinačių ašių elemento

plokštumoje kryptimis), antrieji – turi tris laisvės laipsnius (poslinkį statmena elemento plokštumai kryptimi ir du posūkius apie ašis elemento plokštumoje). Sprendžiant tiek statikos, tiek ir kitus uždavinius, būtina tiksliai apibrėžti kraštines sąlygas (suaržymus), t. y., elementų mazguose užduoti tuos poslinkius ir posūkius, kurie yra žinomi. Tuo tikslu, talpyklos simetrijos plokštumose esančių briaunų elementų mazguose apriboti poslinkiai statmena elementų kryptimi ir posūkiu elementų plokštumoje. Taip pat, apriboti poslinkiai talpyklos laikiklio apatinėje plokštumoje, kuri įtvirtinama standžiai. Gautas užduotų kraštinių sąlygų vaizdas pateiktas 3.8 pav.



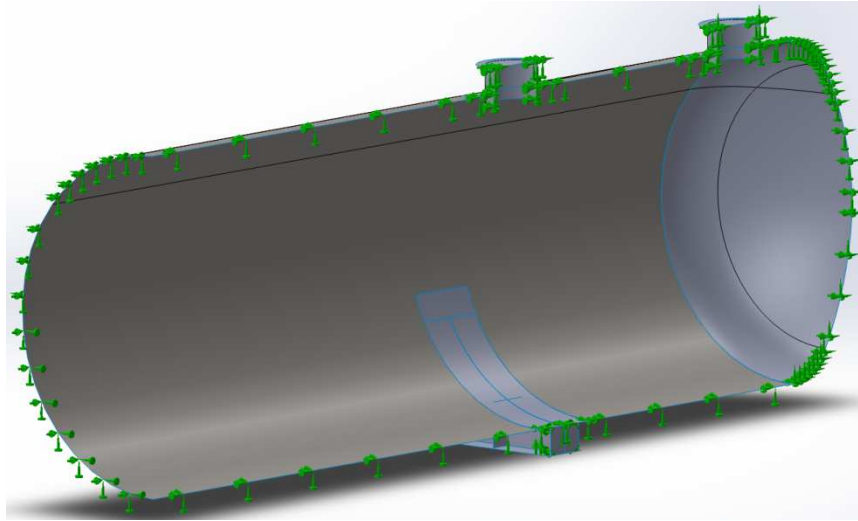
**3.7 pav.** Diskretizuoto baigtiniais elementais modelio vaizdas

3.1 lentelė

**Gauto modelio baigtinių elementų tinklelio duomenys**

<b>Pavadinimas</b>	<b>Dydis</b>
Elementų skaičius	5630
Mazgų skaičius	11501
Vidutinis elemento dydis (mm)	127,6
Vidutinis elemento dydis tinklelio sutankinimo vietose (mm)	31,9

Standartai reglamentuoja įvairias apkrovas, kurios pastoviai veikia arba gali laikinai veikti slėgines talpyklas [7-9]. Turi būti įvertinamos visos projektinės apkrovos, pvz., apkrovos dėl vidinio arba išorinio slėgio, konstrukcijos savojo svorio, hidrostatinio slėgio, talpyklą jungiančių elementų poveikio. Papildomai reikalaujama įvertinti vėjo ir sniego apkrovą, žemės drebėjimų metu atsirandančių jėgų poveikį, tarnsportavimo metu galimas apkrovas ir kt. Apkrovų rūšys konkrečiu atveju parenkamos, atsižvelgiant į realias gaminio eksploataavimo sąlygas, gamtinių ar kitų veiksnių poveikį.



**3.8 pav.** Užduotų kraštinių sąlygų vaizdas

Nagrinėjamoju atveju įvertinamos šios apkrovas:

- talpyklos savasis svoris;
- vidinis slėgis (0,4 MPa);
- hidrostatinis slėgis.

Hidrostatinio slėgio poveikis priklauso nuo skysčio stulpo slėgio:

$$P = \rho g h, \quad (3.16)$$

čia:  $\rho$  – skysčio tankis (emulsuoto kuro tankis  $9680 \text{ kg/m}^3$ );

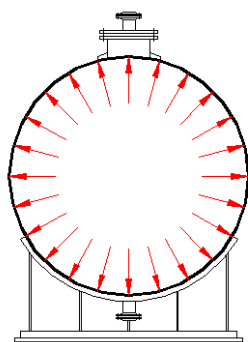
$h$  – skysčio stulpo aukštis (m);

$g$  – laisvo kritimo pagreitis;

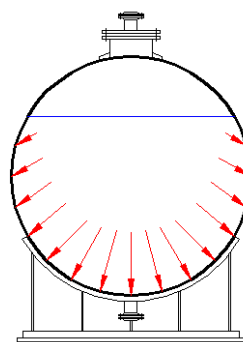
Vidinio ir hidrostatinio slėgių pasiskirstymo į talpyklos sienelės skerspjūvyje vaizdas pateiktas 3.9 pav.

### 3.2.3. Stiprumo sakačiavimo rezultatai

Konstrukcijų stiprumo analizė, taikant BEM programas, yra patogi tuo, kad nesudėtingai gaunami įvairių parametų (pvz., įtempių, deformacijų, poslinkių, kt.) pasiskirstymo grafiniai vaizdai arba jų skaitinių reikšmių masyvai patogia naudotojui forma. Grafiniai vaizdai leidžia nesunkiai identifikuoti pavojingas stiprumo ar standumo atžvilgiu konstrukcijos vietas ir atlikti konstrukcijos patobulinimą arba optimizaciją.



a) vidinis slėgis



b) hidrostatinis slėgis

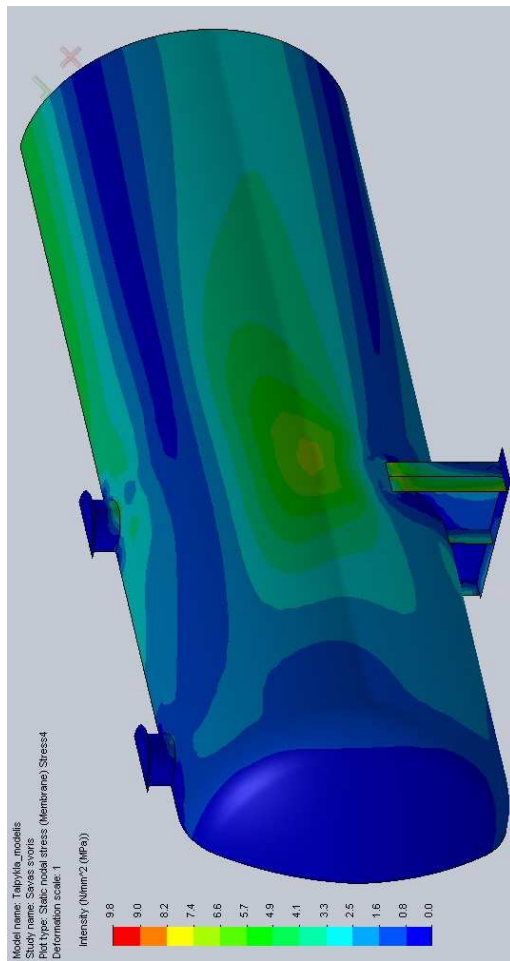
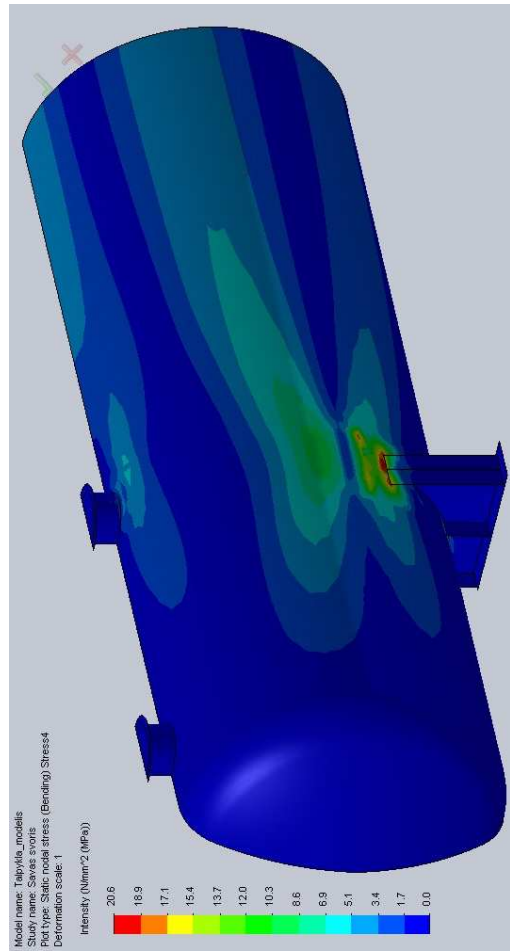
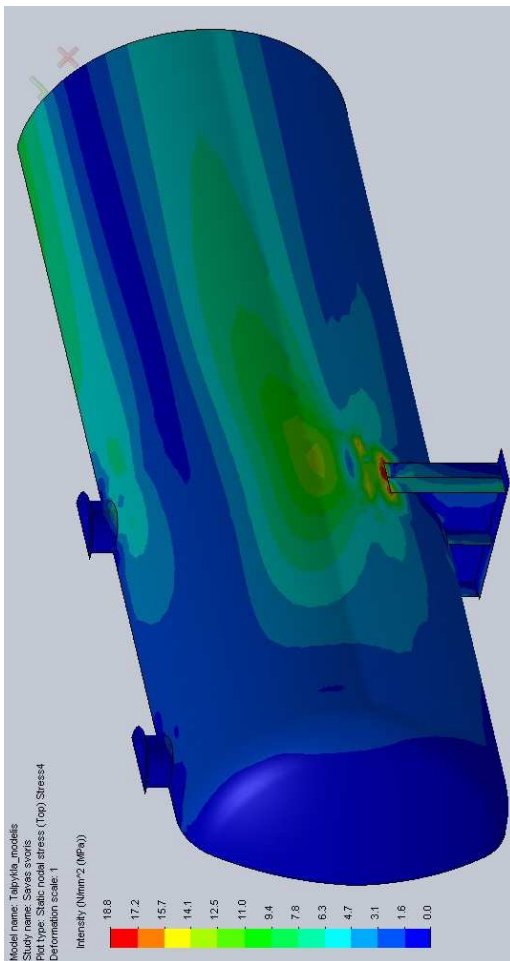
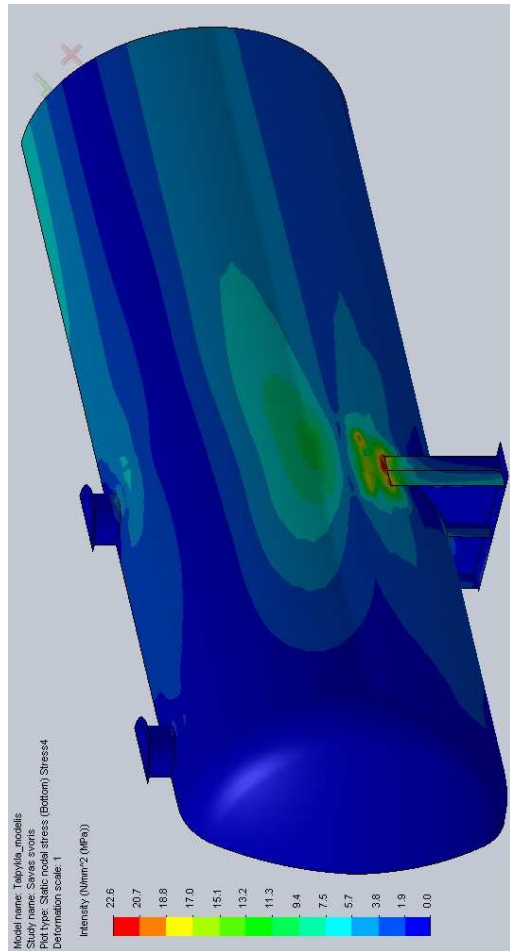
### 3.9 pav. Slėgių pasiskirstymas į talpyklos sienes

Tiriant slėginės talpyklos stiprumą, buvo atlikti trys atskiri tyrimai: savojo svorio poveikio nustatymas; vidinio slėgio (0,4 MPa) poveikio nustatymas; hidrostatinio slėgio poveikio nustatymas, kai talpykla emulsiniu kuru pripildyta iki maksimalaus leistino lygio. Taikytas tamprios medžiagos modelis. Toliau naudota SolidWorks Simulation paketo komanda „Pressure Vessel Design“ [23], kuri leidžia apjungti rezultatus ir gauti konstrukcijoje atsirandančių įtempių derinių reikšmes. Taikomas arba tiesinis sumavimas (linear combination) arba vidutinės kvadratinės (SSRS) reikšmės nustatymas. Pirmu atveju galima pritaikyti apkrovos koeficientą (factor). Nagrinėjamoju atveju taikytas tiesinis įtempių sumavimas.

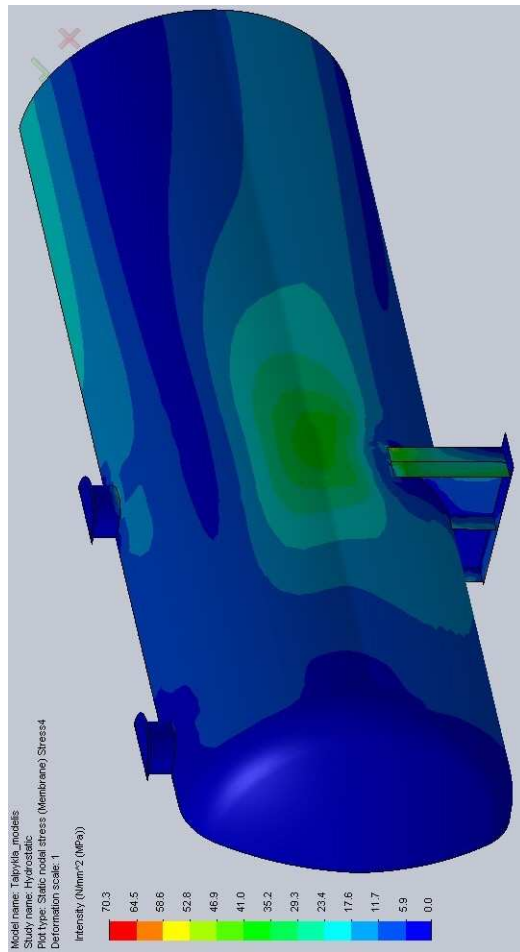
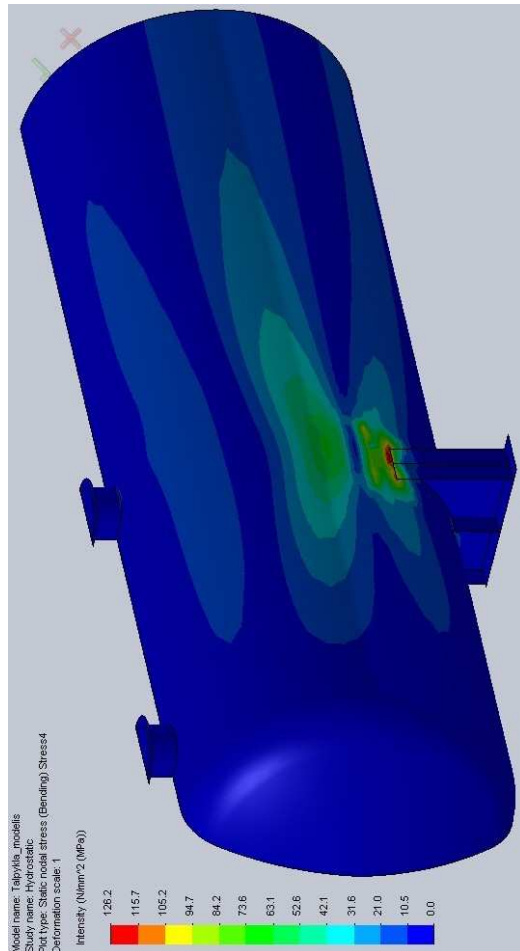
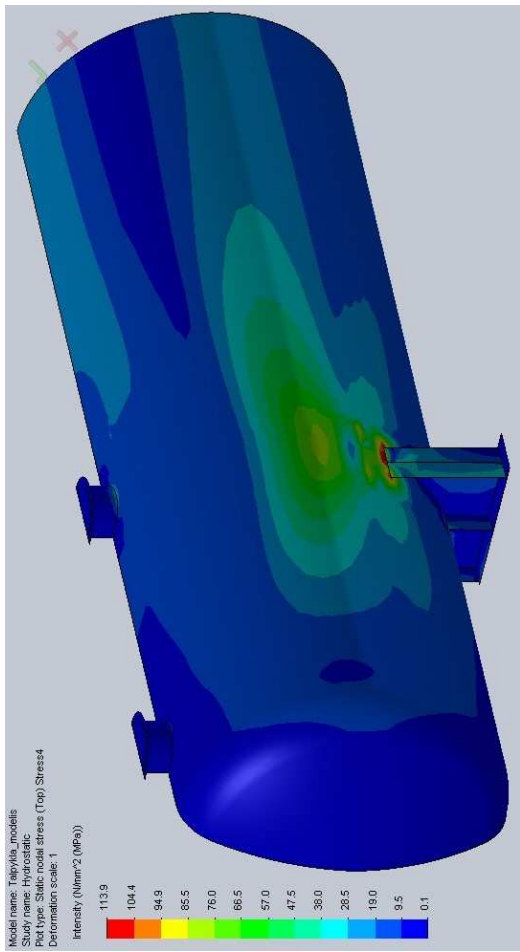
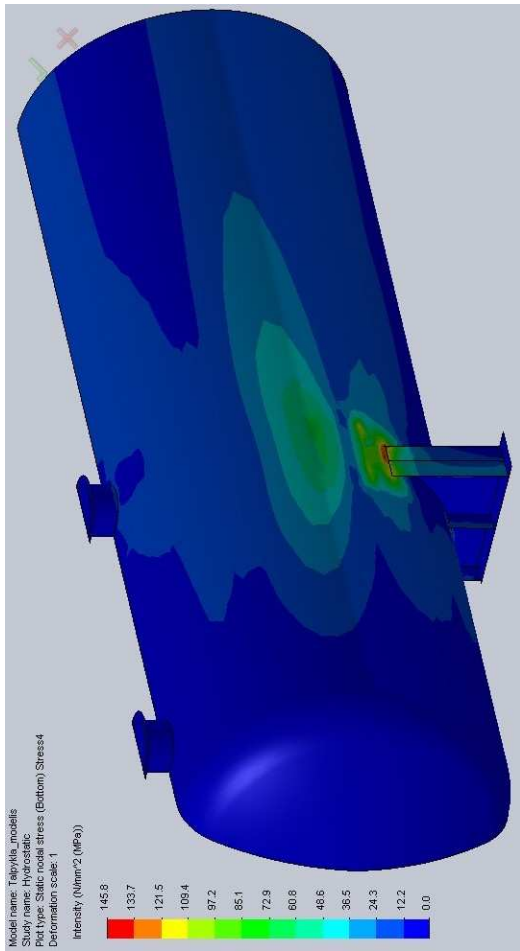
Žemiau esančiuose paveiksluose pateikiami nagrinėjamos konstrukcijos vidiniame ir išoriniame paviršiuje (*Top* ir *Bottom*) veikiančių įtempių, taip pat ir membraninių (*Membran*) ir lenkiamųjų (*Bending*) įtempių vaizdai, gauti taikant maksimalių tangentinį įtempių teoriją.

Savojo svorio poveikio įtempių pasiskirstymai talpyklos konstrukcijoje parodyti 3.9 pav., hidrostatinio slėgio – 3.10 pav., vidinio slėgio – 3.11 pav. Įtempių pasiskirstymo vaizdai, konstrukciją veikiant savajam svoriui ir hidrostatiniam slėgiui pateikti 3.12 pav., o savajam svoriui, hidrostatiniam ir vidiniam slėgiui – 3.13 pav.

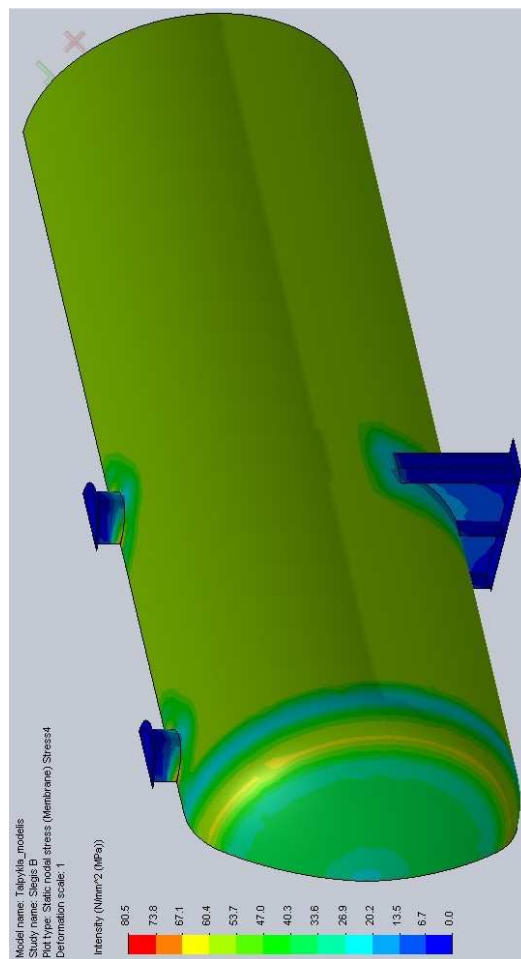
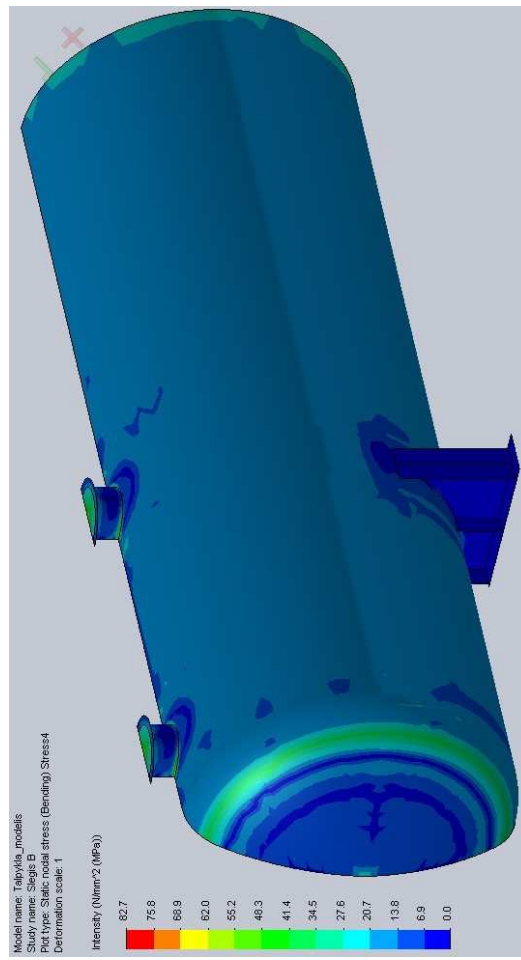
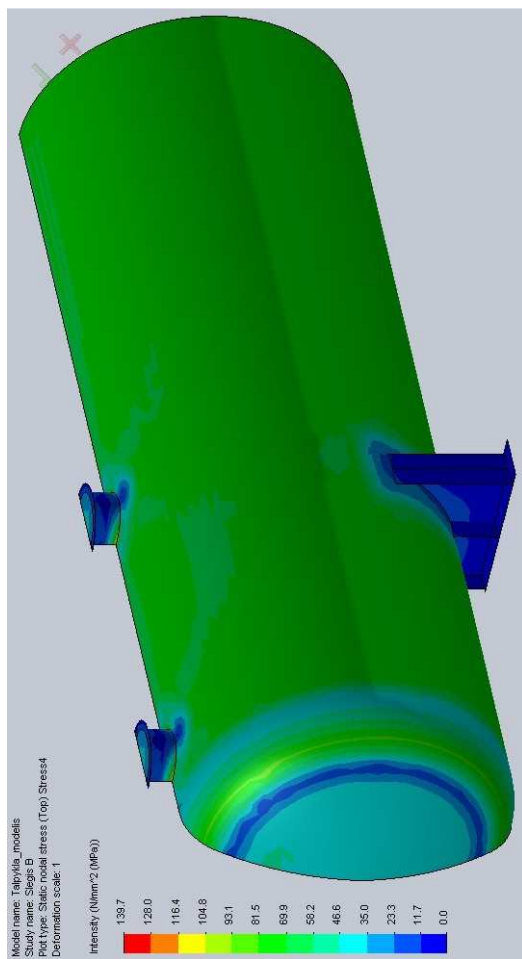
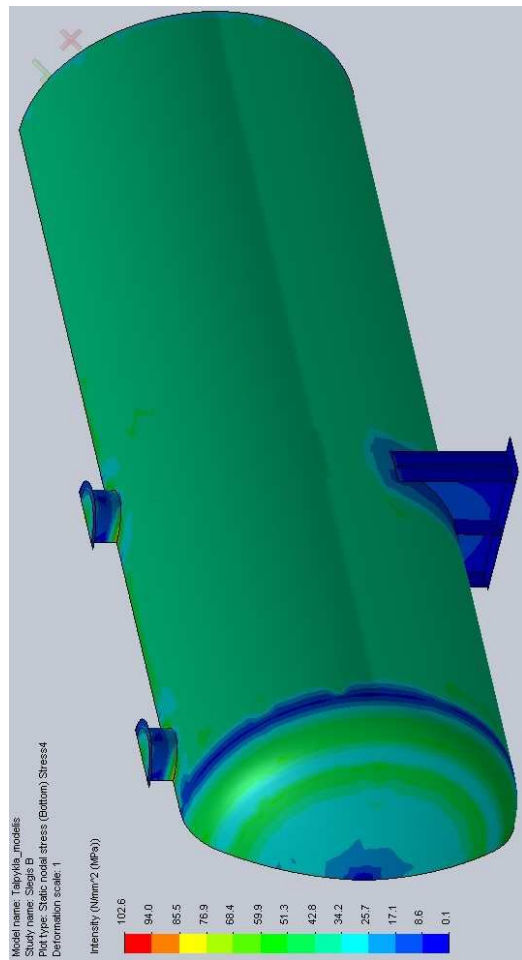
3.2 lentelėje pateiktos maksimalios nustatytos pagrindinių membraninių  $P_m$ , pagrindinių vietinių membraninių  $P_L$ , pagrindinių vietinių membraninių + pagrindinių lenkiamųjų  $P_L + P_b$  ir pagrindinių + antrinių  $P + Q$  įtempių reikšmės [9], esant skirtingoms apkrovoms ir jų deriniams. Gautos rezultatai rodo, kad dėl vidinio slėgio poveikio pagrindiniai membraniniai, vietiniai membraniniai, taip pat vietiniai membraniniai + lenkiamieji įtempiai padidėja, tačiau neviršija leistinųjų. Pagrindinių + antrinių įtempių reikšmės pasikeičia nežymiai. Tai leidžia padaryti išvadą, kad stiprumo požiūriu talpyklos konstrukcija yra tinkama eksploatuoti, joje laikant skystą emulsinį kurą ir tiekiant azotą, ne didesniu kaip 0,4 MPa slėgiu.



3.9 pav. Įtempių pasiskirstymo vaizdai, talpyklą veikiant savajam svoriui

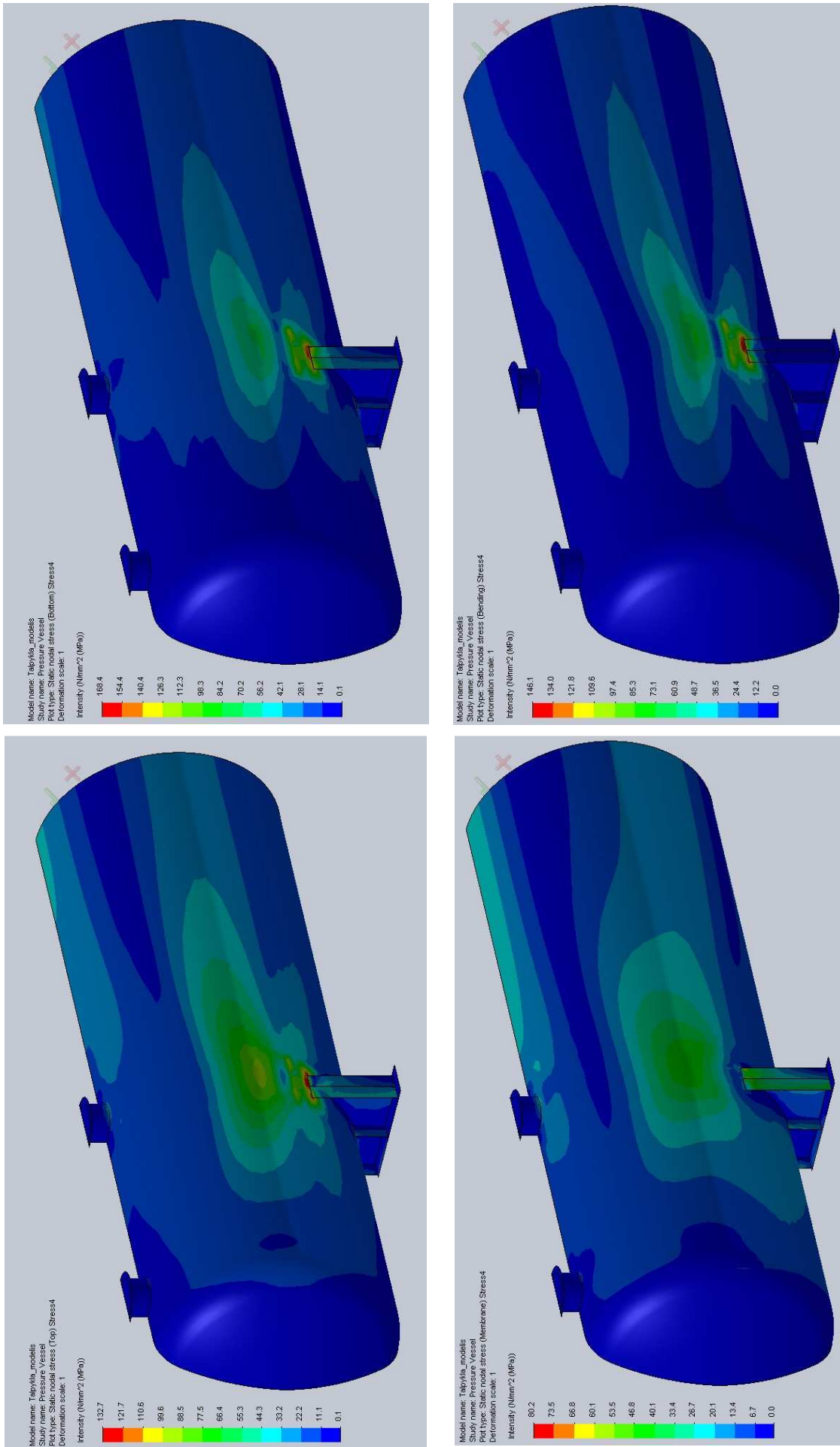


3.10 pav. Įtempių pasiskirstymo vaizdai, talpyklą veikiant hidrostatiniam slėgiui

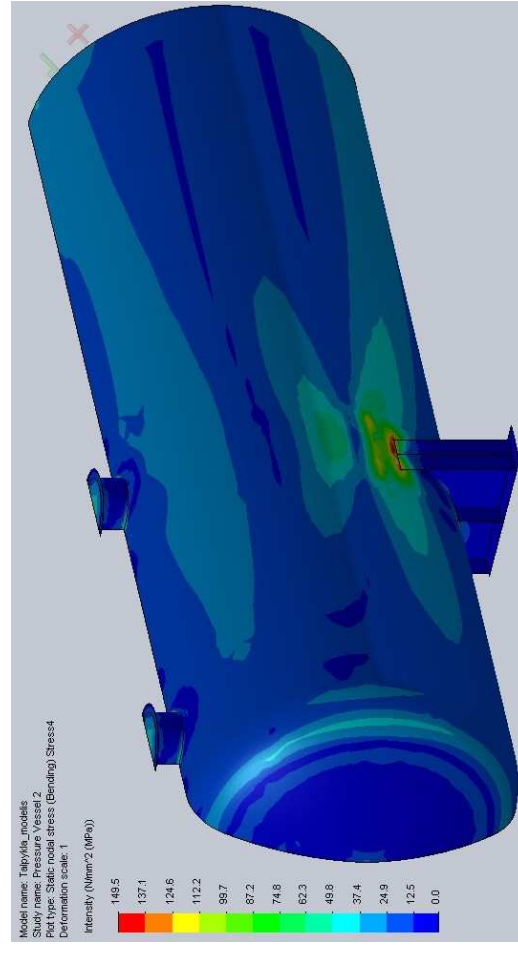
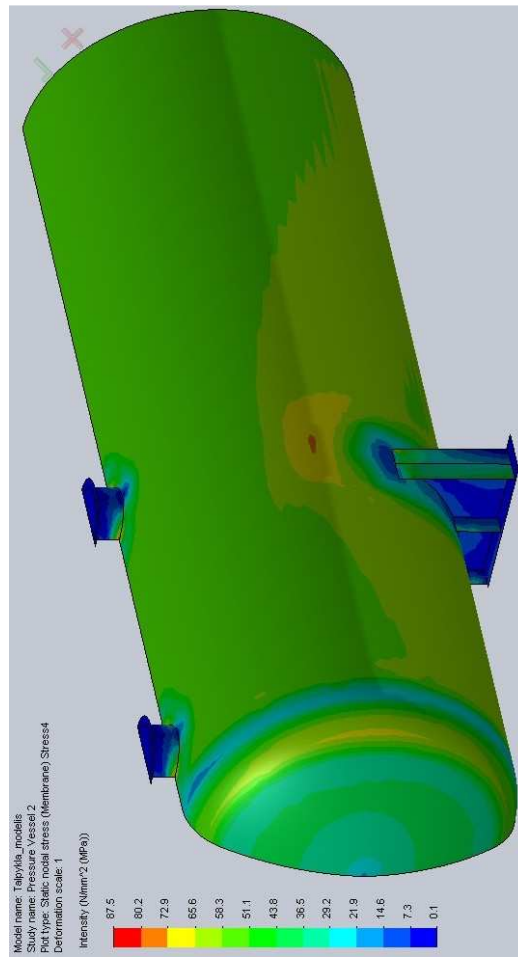
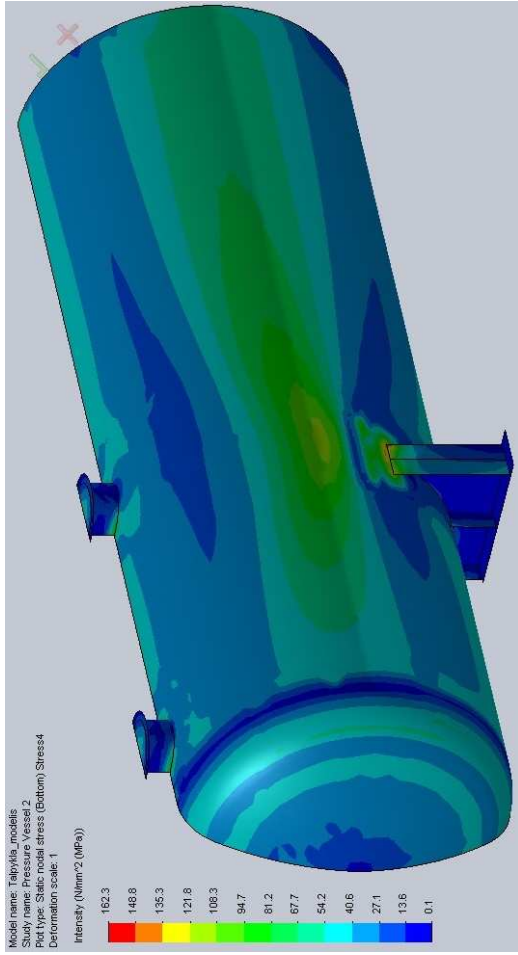
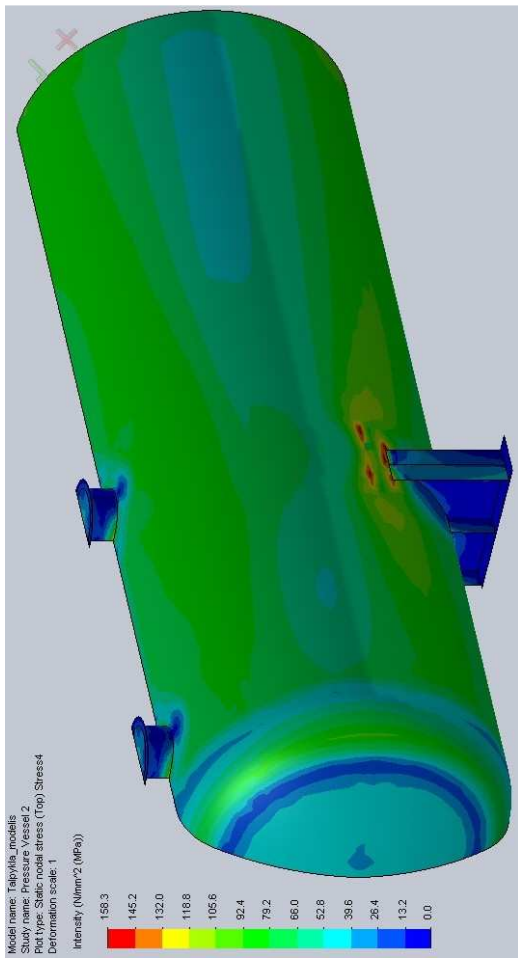


3.11 pav. Įtempių pasiskirstymo vaizdai, talpyklą veikiant vidiniam slėgiui





3.12 pav. Įtempių pasiskirstymo vaizdai, talpyklą veikiant savajam svoriui ir hidrostatiniam slėgiui



3.13 pav. Įtempių pasiskirstymo vaizdai, talpyklą veikiant savajam svoriui, hidrostatiniam ir vidiniam slėgiui

## Nustatytų ir leidžiamų įtempių palyginimas

Įtempių tipas	Didžiausi leidžiami įtempiai (MPa)	Didžiausi nustatyti įtempiai (MPa)	
		Savas svoris + hidrostatinis slėgis	Savas svoris + hidrostatinis slėgis + vidinis slėgis
Pirminiai pagrindiniai membraniniai $P_m$	$\frac{R_{p0,2/t}}{1,5} = 106,7$	<b>44,9</b>	<b>73,5</b>
Pirminiai vietiniai membraniniai $P_L$	$\frac{1,5R_{p0,2/t}}{1,5} = 160$	<b>24,1</b>	<b>85,7</b>
Pirminiai vietiniai membraniniai + pirminiai lenkiamieji $P_L + P_b$	$\frac{1,5R_{p0,2/t}}{1,5} = 160$	<b>41,2</b>	<b>108,7</b>
Pirminiai + antriniai $P + Q$	$\frac{3R_{p0,2/t}}{1,5} = 320$	<b>168,4</b>	<b>162,3</b>

## IŠVADOS

1. Atliekant tyrimą, SolidWorks programa suprojektuota slėginė talpykla, kuri pritaikyta BEM stiprumo analizei, naudojant kevalo tipo baigtinius elementus.
2. Nustatytas įtempių būviai dėl savijos svorio, hidrostatinio ir vidinio slėgio poveikio.
3. Bendras įtempių būvis konstrukcijoje parodė, kad įtempių intensyvumas, esant visų trijų apkrovų deriniui, neviršija plieno 3 leistinų įtempių esant 150 °C projektinei temperatūrai reikšmių ir slėginė talpykla gali būti saugiai eksploatuojama, joje laikant emulsuotą kurą, esant ne didesniai kaip 0,4 MPa vidiniam slėgiui.

## LITERATŪRA

1. HARVEY, John F. *Theory and design of pressure vessels*. 1985. ISBN: 0-442-23248-9. 640 p.
2. *Slėginių indų naudojimo taisyklės DT 12-02*. Valstybės žinios, 2002-12-04, Nr. 115-5165.
3. SCHIJVE, J. *Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art*. International Journal of Fatigue. 2003. 679-702 p.
4. *Slėginių įrengimų techninis reglamentas*. Valstybės žinios, 2000-10-20, Nr. 88-2726.
5. РД 03-421-01. *Методические указания по проведению диагностического состояния и определению остаточного срока службы сосудов и аппаратов*. 2001.
6. ИТМ-93. *Инструкция по техническому надзору, методам ревизии и отбраковке трубчатых печей, резервуаров, сосудов и аппаратов*. Волгоград, 1995.
7. ГОСТ Р 52857.1-2007 - 52857.12-2007. *Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность*.
8. LST EN 13445:2009. *Nekaitinamieji slėginiai indai*.
9. ASME. *Boiler and pressure vessel code*. 2013.
10. [http://www.geinspectiontechnologies.cn/download/products/ut/tg/GEIT-20201GB\\_dms2.pdf](http://www.geinspectiontechnologies.cn/download/products/ut/tg/GEIT-20201GB_dms2.pdf) (prieiga per internetą 2014-04-08).
11. LST EN 14127:2011. *Neardomieji bandymai. Ultragarso storio matavimas*. 2011.
12. <http://zapadpribor.com/miri-500k/> (prieiga per internetą 2014-04-08).
13. API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service. 2007.
14. ŽILIUKAS A. *Medžiagų mechanika. Vadovėlis*. Kaunas. Technologija. 2004. 595 p.
15. KRENEVIČIUS E., LEONAVIČIUS M. K. *Eksperimentinė medžiagų mechanika*. Vilnius. Technika. 2007. 107 p.
16. ŽILIUKAS A. *Stiprumo ir irimo kriterijai*. Kaunas. Technologija. 2006. 208 p.
17. REES D. W. A. *Basic engineering plasticity*. 2006. 512 p.
18. ANARATONE D. *Pressure vessel design*. 2007. 442 p.
19. BARAUSKAS R., BELEVIČIUS R., KAČIANAUSKAS R. *Baigtinių elementų metodo pagrindai. Vadovėlis*. V.: Technika, 2004. 612 p.
20. HARVEY J. F. *Theory and design of pressure vessels*. 1985. 623 p.
21. MOSS D. *Pressure vessel design manual*. 2003. 500 p.
22. AKIN J. E. *Finite element analysis concepts via Solidworks*. 2009. 299 p.
23. Steffen J. F. *Analysis of mechanical elements using SolidWorks Simulation 12*. 2012. 390 p.

# PRIEDAI

## 1 priedas

### Talpyklos elementų metalo storio matavimo rezultatai

Indo elemento pavadinimas	Projektinis storis, mm.	Matavimų rezultatai		Korozijos greitis mm/m	Paskaičiuotas resursas, m
		Taško Nr.:	Faktinis storis, mm		
Korpuso dugnas	16,0	1	15,2	0,14	>10 metų
Korpuso dugnas	16,0	2	14,0	0,25	>10 metų
Korpuso dugnas	16,0	3	15,1	0,15	>10 metų
Korpuso krija	12,0	4	11,9	0,05	>10 metų
Korpuso krija	12,0	5	12,0	0,04	>10 metų
Korpuso krija	12,0	6	11,4	0,10	>10 metų
Korpuso krija	12,0	7	11,4	0,10	>10 metų
Korpuso krija	12,0	8	11,5	0,09	>10 metų
Korpuso krija	12,0	9	11,7	0,07	>10 metų
Korpuso krija	12,0	10	11,8	0,06	>10 metų
Korpuso krija	12,0	11	11,7	0,07	>10 metų
Korpuso krija	12,0	12	11,7	0,07	>10 metų
Korpuso krija	12,0	13	11,6	0,08	>10 metų
Korpuso krija	12,0	14	11,3	0,11	>10 metų
Korpuso krija	12,0	15	11,2	0,11	>10 metų
Korpuso krija	12,0	16	10,9	0,14	>10 metų
Korpuso krija	12,0	17	10,8	0,15	>10 metų
Korpuso krija	12,0	18	11,1	0,12	>10 metų
Korpuso krija	12,0	19	11,2	0,11	>10 metų
Korpuso krija	12,0	20	11,5	0,09	>10 metų
Korpuso krija	12,0	21	11,0	0,13	>10 metų
Korpuso krija	12,0	22	10,9	0,14	>10 metų
Korpuso krija	12,0	23	10,6	0,17	>10 metų
Korpuso krija	12,0	24	10,6	0,17	>10 metų
Korpuso krija	12,0	25	10,8	0,15	>10 metų
Korpuso krija	12,0	26	10,8	0,15	>10 metų
Korpuso krija	12,0	27	10,9	0,14	>10 metų
Korpuso krija	12,0	28	10,9	0,14	>10 metų
Korpuso krija	12,0	29	11,3	0,11	>10 metų
Korpuso krija	12,0	30	11,0	0,13	>10 metų
Korpuso krija	12,0	31	11,2	0,11	>10 metų
Korpuso krija	12,0	32	10,8	0,15	>10 metų
Korpuso krija	12,0	33	10,8	0,15	>10 metų
Korpuso krija	12,0	34	11,5	0,09	>10 metų
Korpuso krija	12,0	35	11,0	0,13	>10 metų
Korpuso dugnas	16,0	36	14,8	0,18	>10 metų
Korpuso dugnas	16,0	37	14,3	0,22	>10 metų
Korpuso dugnas	16,0	38	14,3	0,22	>10 metų
Atvamzdis Ds50	6,0	39	6,0	0,04	>10 metų
Atvamzdis Ds50	6,0	40	6,0	0,04	>10 metų
Atvamzdis Ds100	5,5	41	4,7	0,11	>10 metų
Atvamzdis Ds100	5,5	42	4,7	0,11	>10 metų
Atvamzdis Ds100	5,5	43	4,8	0,11	>10 metų
Atvamzdis Ds50	8,0	44	7,7	0,07	>10 metų
Atvamzdis Ds50	8,0	45	7,4	0,10	>10 metų
Atvamzdis Ds20	6,0	46	6,1	0,04	>10 metų
Atvamzdis Ds20	6,0	47	6,0	0,04	>10 metų
Atvamzdis Ds50	5,0	48	5,3	0,02	>10 metų
Atvamzdis Ds50	5,0	49	5,3	0,02	>10 metų
Prielaja Ds20	9,0	50	8,9	0,05	>10 metų

Prielaja Ds20	9,0	51	8,3	0,11	>10 metų
Liukas Ds600	13,0	52	11,6	0,19	>10 metų
Liukas Ds600	13,0	53	11,4	0,21	>10 metų
Liukas Ds600	13,0	54	10,6	0,28	>10 metų
Atvamzdis Ds80	8,0	55	7,2	0,11	>10 metų
Atvamzdis Ds80	8,0	56	7,1	0,12	>10 metų
Liukas Ds450	10,0	57	7,9	0,23	>10 metų
Liukas Ds450	10,0	58	8,3	0,19	>10 metų
Liukas Ds450	10,0	59	8,9	0,14	>10 metų
Atvamzdis Ds150	6,0	60	5,0	0,13	>10 metų
Atvamzdis Ds150	6,0	61	4,7	0,16	>10 metų
Atvamzdis Ds150	6,0	62	4,8	0,15	>10 metų
Atvamzdis Ds25	8,0	63	8,0	0,04	>10 metų
Atvamzdis Ds25	8,0	64	8,0	0,04	>10 metų
Atvamzdis Ds3/4"	5,5	65	5,5	0,04	>10 metų
Atvamzdis Ds3/4"	5,5	66	5,5	0,04	>10 metų
Atvamzdis Ds2"	5,5	67	5,5	0,04	>10 metų
Atvamzdis Ds2"	5,5	68	5,5	0,04	>10 metų
Atvamzdis Ds50	6,0	69	6,0	0,04	>10 metų
Atvamzdis Ds50	6,0	70	6,0	0,04	>10 metų
Atvamzdis Ds4"	8,5	71	8,5	0,04	>10 metų
Atvamzdis Ds4"	8,5	72	8,5	0,04	>10 metų
Atvamzdis Ds4"	8,5	73	8,5	0,04	>10 metų
Atvamzdis Ds3"	7,6	74	7,6	0,04	>10 metų
Atvamzdis Ds3"	7,6	75	7,6	0,04	>10 metų
Atvamzdis Ds150	8,0	76	8,0	0,04	>10 metų
Atvamzdis Ds150	8,0	77	8,0	0,04	>10 metų
Atvamzdis Ds150	8,0	78	8,0	0,04	>10 metų
Vamzdis Ds150	6,0	79	6,0	0,04	>10 metų
Vamzdis Ds150	6,0	80	6,0	0,04	>10 metų
Liukas Ds600	13,0	81	11,3	0,22	>10 metų
Liukas Ds600	13,0	82	11,0	0,25	>10 metų
Liukas Ds600	13,0	83	10,7	0,27	>10 metų
Atvamzdis Ds80	8,0	84	7,8	0,06	>10 metų
Atvamzdis Ds80	8,0	85	7,7	0,07	>10 metų

## 2 priedas

### Talpyklos surinkimo brėžinys

