



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Autocisternos – puspriekabės konstrukcijos ir skysto krovinio dinamikos tyrimas

Baigiamasis magistro projektas

Tomas Barkauskas
Projekto autorius

Prof. dr. Vaidas Lukoševičius
Vadovas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Autocisternos – puspriekabės konstrukcijos ir skysto krovinio dinamikos tyrimas

Baigiamasis magistro projektas
Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

Tomas Barkauskas

Projekto autorius

Prof. dr. Vaidas Lukoševičius

Vadovas

Prof. Žilvinas Bazaras

Recenzentas

Kaunas, 2020



Kauno technologijos universitetas
Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas
Tomas Barkauskas

Autocisternos – puspriekabės konstrukcijos ir skysto krovinio dinamikos tyrimas

Akademinio sąžiningumo deklaracija

Patvirtinu, kad mano, Tomo Barkausko, baigiamasis projektas tema „Autocisternos – puspriekabės konstrukcijos ir skysto krovinio dinamikos tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

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

(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

(parašas)



Kauno technologijos universitetas

Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas

Studijų programa – Transporto priemonių inžinerija (6211EX021)

Magistro baigiamojo projekto užduotis

Studentui(-ei) *Tomas Barkauskas*

1. Baigiamojo projekto tema:

Autocisternos – puspriekabės konstrukcijos ir skysto krovinio dinamikos tyrimas

Research of road tanker semi-trailer structure and liquid cargo dynamics interaction

2. Projekto tikslas:

Darbo tikslas – skysčio teliuškavimo autocisternoje ir konstrukcijos reakcijos į poveikį analizė.

3. Projekto uždaviniai:

- Skirtingų autocisternų tipų konstrukcijų, jų paskirties analizė;
- Cisternos skysto krovinio dinaminė savybių ir judėjimo uždaroje erdvėje analizė:
 - VOF (Volume of Fluid) analizė;
 - FSI (Fluid Structure Interaction) analizė;
- Autocisternos sąstato masės centro bei stabdymo charakteristikų analizė;
- Rasti silpniausias cisternos konstrukcijos vietas esant skirtingiems jos užpildymo lygiams bei užpildantiems skysčiams.

4. Projekto aprašomosios dalies struktūra:

Lentelių sąrašas

Paveikslų sąrašas

Santrumpų ir terminų sąrašas

Įvadas

1. Literatūros apžvalga

1.1. Skysčio teliuškavimo tyrimo teorija

1.2. VOF modelio apžvalga ir apribojimai

1.3. Skysčio struktūros sąveika (Fluid – Structure Interaction (FSI))

1.4. Cisternų apžvalga

1.5. Autocisternų forma

1.6. Bangolaužiai

2. Autocisternos dinamikos tyrima

2.1. Teoriniai judėjimo skaičiavimai

2.2. Skysčio teliuškavimo skirtingų tipų cisternose simuliacijos

2.3. Skysto krovinio poveikis autocisternos konstrukcijai pagreičio metu

Išvados

Informacijos šaltinių sąrašas

Priedai

5. Projekto konsultantai:

Baigiamojo projekto autorius

Tomas Barkauskas

(pareigų sutrumpinimas, vardas, pavardė, parašas, data)

Baigiamojo projekto vadovas

Prof. dr. Vaidas Lukoševičius

(pareigų sutrumpinimas, vardas, pavardė, parašas, data)

Krypties studijų programų vadovas

prof. Artūras Keršys

(pareigų sutrumpinimas, vardas, pavardė, parašas, data)

Barkauskas Tomas. Autocisternos – puspriekabės konstrukcijos ir skysto krovinio dinamikos tyrimas. Magistro baigiamasis projektas / vadovas Prof. dr. Vaidas Lukoševičius; Kauno technologijos universitetas, Mechanikos inžinerijos ir dizaino fakultetas.

Studijų kryptis ir sritis (studijų krypčių grupė): Transporto inžinerija (E12), Inžinerijos mokslai.

Reikšminiai žodžiai: VOF, FSI, bangavimas, teliuškavimas, ANSYS, skysčio dinamika.

Kaunas, 2020. 79 p.

Santrauka

Sausumos keliais gabenti įvairius skystus kroviniai kurie labai dažnai būna pavojingi pvz. chemijos ar naftos produktai, praktikoje yra naudojamos autocisternos. Nors šis būdas yra populiarus ir plačiai naudojamas pasaulyje, tačiau autocisternos kelia rimtų eismo saugumo problemų dėl kurių žmonės gali būti sužeisti, žūti, netekti turto ar patirti ekonominių nuostolių. Taip pat dėl avarijos metu ištekiančio skystojo krovinio gali būti užteršta aplinka. Todėl reikalinga skirti didelį dėmesį siekiant užtikrinti saugų skystojo krovinio esančio autocisterneje transportavimą.

Šio darbo tikslas yra ištirti skysčio teliuškavimo autocisterneje specifiką bei konstrukcijos reakciją į šį reiškinį. Apžvelgiama autocisternų konstrukcijos – jų tipai bei paskirtis. Aiškinama kodėl egzistuojančios cisternos yra būtent tokių formų. Išanalizuoti literatūros šaltiniai aiškinantys šių autocisternomis transportuojamų krovinų poveikį sąstato dinamikai, taikomus apribojimus. Apžvelgta literatūra matematiškai aiškinanti laisvai judančio skysčio paviršiaus padėties prognozavimą tam tikru laiko momentu, atsižvelgiant į sąlygas (VOF – Volume Of Fluid). Taip aprašoma FSI (Fluid Structure Interaction) skysčio ir struktūros sąveikos specifika bei naudojimas struktūros ir skysčio dinaminiuose bandymuose.

Apskaičiuota vilkiko ir autocisternos sąstato masės centro vieta esant skirtingoms krovinio užpildymo sąlygoms. Teoriškai apskaičiuotas sąstato stabdymo kelias, kuris yra 16,2 m (50 km/h) / 53,09 m (90 km/h) bei laikas – 2,3 s (50 km/h) ir 4,2 s (90 km/h). Atliktos skysčio judėjimo cisterneje, ją veikiant pagreičiui, simuliacijos esant skirtingoms cisternos konstrukcijoms. Atlikti hidrostatiniai bei dinaminiai skysčio teliuškavimo cisterneje bandymai. Duplex plieno takumo riba yra ~450 MPa. Tyrimo rezultatuose gauti maksimalūs įtempiai yra ~433 MPa.

Kadangi dinaminis bandymas buvo atliekamas esant 1g lėtėjimo pagreičiui, kai tuo tarpu realiomis sąlygomis stabdančio autocisternos sąstato pagreitis, naudojant ABS, gali siekti 0,6 g., galima teigti, jog konstrukcija yra pakankamai tvirta tačiau norint konstrukciją dar labiau optimizuoti yra reikalingi papildomi tyrimai.

Barkauskas Tomas. Research of road tanker semi-trailer structure and liquid cargo dynamics interaction. Master's Final Degree Project / supervisor Prof. dr. Vaidas Lukoševičius; Faculty of Mechanical Engineering and Design, Kaunas University of Technology.

Study field and area (study field group): Transport Engineering (E12), Engineering Science.

Keywords: VOF, FSI, sloshing, ANSYS, fluid dynamics.

Kaunas, 2020. 79.

Summary

To transport various liquid cargo, which often are very dangerous, for example chemicals or oil products, by land roads tanker trucks are in use. Even if this choice is popular and widely used in all over the world, but tanker trucks endanger for traffic safety. The result of an accident can be injured people, lost property, suffer economic loss or even death. Also in case of an accident liquid cargo can be released to environment and possibly pollute it. That is why so much attention has to be paid to prevent all of this and ensure safe liquid cargo transportation.

The goal of this project is to analyze sloshing of liquid cargo in the tanker truck and the reaction of construction. Constructions of tanker semi-trailer are reviewed - their types and purpose. Explaining why existing tanker semi-trailers are in certain shape. Literature sources, that are explaining the effect of the load shift for the tanker truck dynamics and limits, analyzed. Review of literature that mathematically explains free fluid surface position prediction at the certain time moment, according to given conditions. Also Fluid Structure Interaction is covered, specification and appliance in fluid structure dynamic test.

Calculated tanker truck and semi-trailer center of mass in different load conditions. Theoretically calculated braking distance, which is 16,2 m (50 km/h) / 53,09 m (90 km/h) and time – 2,3 s (50 km/h) and 4,2 s (90 km/h). Simulations of fluid sloshing in the tank with acceleration were done in different tank constructions. The yield strength of Duplex steel is ~450 MPa, in the results of analysis the biggest stress is 433MPa.

Dynamic analysis was performed using 1g negative acceleration, meanwhile in real life conditions tanker truck braking acceleration, using abs, can reach up to 0,6 g., we can suggest that construction is strong enough but to optimize it more further investigation is necessary.

Turinys

Lentelių sąrašas	9
Paveikslų sąrašas	10
Santrumpų ir terminų sąrašas	11
Įvadas	12
1. Literatūros apžvalga	14
1.1. Skysčio teliuškavimo tyrimo teorija.....	14
1.2. VOF modelio apžvalga ir apribojimai.....	26
1.2.1. Apžvalga.....	26
1.2.2. Apribojimai.....	27
1.2.3. Pastoviosios būsenos ir trumpalaikių VOF skaičiavimai	27
1.2.4. Tūrio dalies lygtis	28
1.2.5. Numanoma schema	28
1.2.6. Medžiagų savybės	29
1.2.7. Momentų lygtis.....	29
1.2.8. Energijos lygtis.....	29
1.2.9. Papildomos skaliarinės lygtys	30
1.2.10. Paviršiaus įtempimas ir sukibimas su siena.....	30
1.2.11. Paviršiaus įtempimas	30
1.2.12. Kai paviršiaus įtempimo poveikis yra svarbus.....	31
1.2.13. Sukibimas su siena	32
1.2.14. Atviros kanalo bangos ribinės sąlygos	32
1.3. Skysčio struktūros sąveika (Fluid – Structure Interaction (FSI)).....	33
1.4. Cisternų apžvalga	35
1.4.1. Skystiems kroviniams.....	35
1.4.2. Maistiniams kroviniams	36
1.4.3. Naftos produktų kroviniams	38
1.4.4. LPG kroviniams.....	42
1.4.5. ADR kroviniams.....	44
1.4.6. Biriems kroviniams	44
1.5. Autocisternų forma	45
1.6. Bangolaužiai	49
2. Autocisternos dinamikos tyrimai	51
2.1. Teoriniai judėjimo skaičiavimai	51
2.2. Skysčio teliuškavimo skirtingų tipų cisternose simuliacijos	55
2.2.1. Skysčio teliuškavimas cisternoje be pertvarų.....	55
2.2.2. Skysčio teliuškavimas simetriškoje cisternoje	56
2.3. Skysto krovinio poveikis autocisternos konstrukcijai pagreičio metu	56
Rezultatų apibendrinimas	65
Išvados	66
Informacijos šaltinių sąrašas	67
Priedai	70

Lentelių sąrašas

1 lentelė. Degalams vežti skirtos pusprikabės specifikacijos. [5]	40
2 lentelė. Degalams skirtos vežti cisternos matmenys. [4]	41
3 lentelė. LPG cisternos specifikacijos [7]	43
4 lentelė. Birių krovinių cisternos specifikacijos. [8]	45
5 lentelė. Apskaičiuoti sąstato stabdymo rezultatai	54
6 lentelė. Plieno Duplex 2205 savybės [10]	57
7 lentelė. Statinio bandymo rezultatai	64
8 lentelė. Dinaminio bandymo rezultatai	64

Paveikslų sąrašas

1.1 pav. Ovalo formos cisternos kvazistatinis virtimo plokštumos modelis [1]	16
1.2 pav. Nuoseklus konforminis žemėlapis cilindrinėms talpoms su pertvaromis [2].....	20
1.3 pav. Skirtingos pieno transportavimo priemonės. A – Cisternos sumontuotos tiek ant krovininio automobilio, tiek ant priekabos rėmo; B – Cisterna sumontuota ant krovininio automobilio rėmo; C – Cisterna sumontuota ant puspriekabės rėmo. [4].....	38
1.4 pav. Vilkiko, su skirtingų konstrukcijų puspriekabėmis, kilimas į kalną. [5]	39
1.5 pav. Degalams skirtos vežti puspriekabės vaizdas iš šono. [4]	41
1.6 pav. Degalams skirtos vežti puspriekabės matmenys. [4].....	41
1.7 pav. Cisternos, turinčios 3 ašis, konstrukcija. Su sumontuotomis pertvaromis. [6]	42
1.8 pav. Cisternos, skirtos suskystintų dujų transportavimui, konstrukcija. [7]	43
1.9 pav. Cemento ir kitų bierių krovinų transportavimo cisternos parametrai [8]	45
1.10 pav. Cisterna skirta transportuoti birius krovinius [8]	45
1.11 pav. Elipsės formos autocisterna [5]	46
1.12 pav. Cisternos uždariantieji būgnai [5]	46
1.13 pav. Stačiakampio (A) ir elipsinio (B) skerspjūvių palyginimas [9]	47
1.14 pav. Naftos produktams skirta vežti autocisterna [4]	47
1.15 pav. Likučių susitelkimas: A – kvadratinėje erdvėje; B – elipsės formos erdvėje; [9]	48
1.16 pav. Skysčio bangavimas esant šoniniam pagreičiui [9]	48
1.17 pav. Cisternos su bangolaužiais pjūvis [5]	49
1.18 pav. Bangolaužių poveikis cisternoje [10]	49
1.19 pav. Skysčio judėjimas cisternoje veikian pagreičiams [11].....	50
2.1 pav. Sąstato vaizdas iš šono	51
2.3 pav. Sąstato masės centras pažymėtas raidėmis „Mc“	52
2.4 pav. „Mas1“ rezultatai gauti esant pripildytoms tik 1 ir 3 sekcijoms	52
2.5 pav. Sąstato masės centras pažymėtas raidėmis „Mc“	52
2.6 pav. Skysčio teliuškavimas cisternoje neturinioje pertvarų	55
2.7 pav. Skysčio teliuškavimas cisternoje su pertvaromis	56
2.9 pav. Skaičiavimo schema Ansys kompiuterinėje programoje.....	57
2.10 pav. Geltona spalva pažymėtose vietose BEM elementų dydis yra 80 mm	57
2.11 pav. Mėlyna spalva pažymėtose vietose BEM elementų dydis yra 25 mm.....	57
2.12 pav. Cisterną uždarančiuose galuose BEM elementų dydis yra 5 mm.....	58
2.13 pav. Sudaromas BEM tinklelis turintis 658913 mazgų ir 213144 elementų.....	58
2.14 pav. Gale esančios 8 tvirtinimo plokštumos įtvirtinamos nejudamai visomis kryptimis.....	58
2.15 pav. Įtvirtinimai leidžiantys cisternei judėti tik ašine kryptimi.....	59
2.16 pav. Hidrostatinio slėgio pasiskirstymas. Gaunamas maksimalus 19561,1 Pa slėgis.....	59
2.17 pav. Hidrostatinio slėgio pasiskirstymas. Gaunamas maksimalus 15648,9 Pa slėgis.....	60
2.18 pav. Hidrostatinio slėgio pasiskirstymas. Gaunamas maksimalus 25506 Pa slėgis.....	60
2.19 pav. Hidrostatinio slėgio pasiskirstymas. Gaunamas maksimalus 20404,8 Pa slėgis.....	61
2.20 pav. Pakeistos įtvirtinimo sąlygos. Galinė ašis neliečia žemės.....	61
2.22 pav. Vandens užpildymas ir pagreičio grafikas.....	62
2.23 pav. Konstrukcijos įtempių priklausomybė nuo laiko	62
2.24 pav. Kevalų įtempių priklausomybė nuo laiko	63
2.25 pav. Konstrukcijos įtempių priklausomybė nuo laiko	63
2.26 pav. Kevalų įtempių priklausomybė nuo laiko	64
2.27 pav. Silpniausia konstrukcijos vieta	65

Santrumpų ir terminų sąrašas

Terminai:

VOF (Volume Of Fluid) - skaitinis, skysčio paviršiaus aptikimo, metodas;

FSI (Fluid Structure Interaction) - sprendimas apjungiantis skysčio dinamiką ir konstrukcijos mechaniką;

LPG - suskystintos dujos (Liquefied Petroleum Gas);

ADR - Europos susitarimas pavojingų tarptautinių krovinių gabenimui keliais (The European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road);

BEM - Baigtinių Elementų Metodas.

Sausumos keliais gabenti įvairius skystus krovinius kurie labai dažnai būna pavojingi pvz. chemijos ar naftos produktai, praktikoje yra naudojamos autocisternos. Nors šis būdas yra populiarus ir plačiai naudojamas pasaulyje, tačiau autocisternos kelia rimtų eismo saugumo problemų dėl kurių žmonės gali būti sužeisti, žūti, netekti turto ar patirti ekonominių nuostolių. Taip pat dėl avarijos metu ištekancio skystojo krovinio gali būti užteršta aplinka. Todėl reikalinga skirti didelį dėmesį siekiant užtikrinti saugų skystojo krovinio esančio autocisterroje transportavimą.

Įvadas

Keliais važinėjančios autocisternos dažniausiai naudojamos gabenant įvairius skystus krovinius, kurių daugelis yra pavojingi, pavyzdžiui, chemijos ir naftos produktai. Statistinė analizė parodė, kad beveik 80% pasaulinių chemijos produktų buvo pristatyti autocisternomis, o tyrimų duomenimis pervežimai siekė 4 milijardus tonų per metus. Tačiau autocisternos taip pat kelia rimtų eismo saugumo problemų, dėl kurių žmonės galėtų susižeisti ir netekti turto. „Statuesque Canada“ surinkti duomenys parodė, kad 83% sunkvežimių avarijų greitkeliuose, kurios įvyksta apsiverčiant, yra sukeltos autocisternų sąstatų. JAV atliktas tyrimas parodė, kad vidutinis metinis autocisternų apsvertimų skaičius yra apie 1265, o tai sudaro 36,2% visų sunkiasvorių transporto priemonių avarijų keliuose. 2011 m. Kinijoje įvyko 416 autocisternų avarijos, dėl kurių daugiau nei 400 žmonių žuvo arba buvo sužeisti, taip pat, padaryta didžiulė ekonominė žala. Be to, autocisternų avarijose dažnai gali ištekėti jos skystas krovinys, kuris gali užteršti aplinką. Todėl didelis dėmesys turi būti skiriamas autocisternos transportavimo saugai.

Buvo atlikta daug darbų analizuojant autocisternų avarijų ypatybes. Išsiaiškinta, kad apvirtimas yra pagrindinė autocisternų avarijų rūšis ir sudaro 45% visų autocisternų avarijų. Tuo pačiu metu paprastų sunkvežimių apvirtimas sudaro tik 4% visų sunkvežimių avarijų. Buvo atlikta daug tyrimų siekiant iširti šio reiškinio veiksnius, ir visuotinai pripažinta, kad svarbiausias faktorius yra skysčio bangavimas dalinai užpildytose cisternose. Dėl cisternų pripildymo procentų apribojimų talpos dažniausiai būna ne visiškai užpildomos skystais kroviniais. Pasikeitus transporto priemonės dinaminei būsenai, skystis pradeda banguoti. Dėl šios priežasties šoninės bangos jėga, veikianti rezervuaro sieną, padidina vertimosi momentą ir pablogina transporto priemonės stabilumą.

Skirtingai nuo įprasto sunkvežimio, autocisternos yra sudėtinga skysčio ir kietųjų kūnų sistema sudaryta iš daugiau nei 2 komponentų. Skysčio bangavimas ir transporto priemonės dinamika nuolatos sąveikauja tarpusavyje, todėl modeliuojant cisternas reikia atsižvelgti į dinamines skysčių bangavimo savybes.

Yra žinoma, kad laisvas skysčio judėjimas iš dalies užpildytoje judančioje talpoje, šios talpos konstrukcijoje sukelia dideles jėgas ir momentus, kurie labai neigiamai veikia talpyklos transportavimo sistemos stabilumą. Projektuojant ir analizuojant judančią transporto priemonę, gabenančią skystus krovinius, reikia atsižvelgti į dinamines krovinio bangavimo apkrovas atsirandančias, kai jis yra sužadinamas dėl krypties keitimo manevrų. Bendrosios paskirties autocisternos dažnai būna tik iš dalies užpildytos dėl didelių krovinių masės tankio variacijų ir norminių ašių apkrovų. Didelės hidrodinaminės jėgos ir momentai kartu su dideliais dinaminiais masės centro pasikeitimais dalinai užpildytose autocisternose pakeičia sunkvežimio dinamines savybes jam stabdant, bėgėjantis bei atliekant kitus manevrus, kurie gali padidinti stabdymo kelią ar pabloginti stabilumą važiuojant posūkyje. Avarijų duomenų analizė parodė, kad skysčio bangavimas buvo susijęs su daugybe autocisternų avarijų, kas kelia didelį pavojų kelių ir aplinkos saugai, ypač kai tai susiję su transportuojamais pavojingais produktais.

Skysčio bangavimo judančiose talpose problema apima potencialių destabilizuojančių bangavimo jėgų ir momentų, taip pat natūralių kietųjų kūnų svyravimo dažnių, vertinimą. Iš esmės šios savybės yra susijusios su dinaminio skysčio bangavimu ir labai netiesiniu būdu priklauso nuo kelių konstrukcijos ir veikimo parametrų. Tai apima skysčio užpildymo lygį, skysčio savybes, rezervuaro

geometriją, manevro pobūdį ir pertvarų, jei tokių yra, konstrukcijas. Ankstesni bandymai ištirti skysčio bangavimo poveikį autocisternų judėjimo dinamikai buvo atlikti kvazistatiniu būdu. Kvazistatinis metodas gali numatyti tik vidutinę pastovią skysčio masės centro padėtį, darant prielaidą, kad kietajame kūne skysčio laisvojo paviršiaus riba yra linija (arba plokštuma 3D analizėje). Tada seka vidutinės pusiausvyros būsenos reakcijos, tuo pačiu neatsižvelgiama į svarbius veiksnius atsiradusius dėl dinaminio skysčio bangavimo. Be to, kvazistatinis metodas netaikomas cisternoms su bangavimo slopinimo įtaisais, tokiomis kaip bangolaužiai. Nors vidutinės pusiausvyros bangavimo jėgas ir momentus, gautus atlikus kvazistatinę analizę, galima efektyviai integruoti į transporto priemonės sąstato dinaminis modelius, pabrėžiama itin didelė svarba skirtingai atsižvelgti į dinaminio skysčio bangavimo poveikį daugelyje tyrimų, naudojant skysčių dinamikos skaičiavimo (Computational Fluid Dynamics - CFD) metodus. Šie tyrimai visada rodo, kad didžiausios bangavimo jėgos ir momentai iš dalies užpildytame rezervuare esant išilginiam ir (arba) šoniniam pagreičio sužadimui yra žymiai didesni nei vidutinės pusiausvyros būsenos vertės. CFD modelių taikymas sujungtų, skysčių - transporto priemonių sistemoms modeliuoti sulaukė nedidelės sėkmės dėl ne tik didelių CFD metodų skaičiavimo poreikių, bet ir dėl to, kad sudėtingas duomenų perdavimas tarp CFD ir transporto priemonės modelių.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – skysčio teliuškavimo autocisternoje ir konstrukcijos reakcijos į poveikį analizė.

Keliami uždaviniai:

- Skirtingų autocisternų tipų konstrukcijų, jų paskirties analizė;
- Cisternos skysto krovinio dinaminų savybių ir judėjimo uždaroje erdvėje analizė:
 - VOF (Volume of Fluid) analizė;
 - FSI (Fluid Structure Interaction) analizė;
- Autocisternos sąstato masės centro bei stabdymo charakteristikų analizė;
- Rasti silpniausias cisternos konstrukcijos vietas esant skirtingiems jos užpildymo lygiams bei užpildantiems skysčiams.

1. Literatūros apžvalga

1.1. Skysčio teliuškavimo tyrimo teorija

Pateikti tyrimai, susiję su skysčių judėjimu autocisternose, yra sistemingai apžvelgiami tam, kad būtų galima įsisavinti pagrindines žinias. Apžvelgti tyrimai yra trumpai apibendrinti žemiau.

Šiaurės Amerikos ir Europos cisternų projektavimo standartai daugiausia susiję su kenksmingų medžiagų gabenimu autocisternomis. Yra dvi pagrindinės taisyklės, reglamentuojančios rezervuarų projektavimą, Jungtinėse Valstijose tai būtent CFR 49 (Federalinis kodekso įstatymas (Code Federal Regulation)), kuris buvo pritaikytas Kanadoje ir yra žinomas kaip CAN / CSA B620 – B622 ir kaip ADR (Agreement Dangerous Road) Europos bendruomenei. Visi aspektai, susiję su pavojingų krovinių gabenimu, įskaitant klasifikavimą, juose aprašytos krovinių iškrovimo procedūros (pakrovimas, iškrovimas ir tvarkymas) ir pakavimas yra pabrėžiamas šiuose reglamentuose. Peržiūrint dizaino standartus, klasifikacijos ir krovinių gabenimo procedūros šiame darbe nebus aptariama. Kritinės autocisternų stabilumo ribos analizei yra skiriamas pagrindinis dėmesys. Rekomendacijos, minimali statinio apsvertimo riba, bangolaužių dizainas ir išdėstymas skysčių teliuškavimui slopinti dalinai užpildytose talpyklose yra itin detaliai analizuojama.

CFR 49 - 178 dalis daugiausia reglamentuoja korpuso ir pertvarų storį bei medžiagą. Reglamentas taip pat susijęs su bangolaužių naudojimu autocisternų korpusų sutvirtinimui, reikalaujant bangolaužio ar išorinio sutvirtinimo, kurių atstumas vienas tarp kito 1,52 m. ar mažiau. Reglamente nenagrinėjami klausimai, susiję su šoninėmis arba virtimo stabilumo ribomis (CFR 49, 2011 m. 178 dalis; CAN / CSA B620, 1987). Vis dėlto Kanados nacionalinės reguliavimo institucijos bandė apsvarstyti galimybę priimti minimalų 0,4g autocisternų virtimo slenkstį. Tuo tikslu, Kanados Nacionalinėje tyrimų taryboje (National Research Council of Canada - NCR) buvo atlikta išsami pokrypio kampo testų serija norint charakterizuoti autocisternų konfigūracijų, kurios eksploatuojamos Kanadoje, apsvertimo slenkstį (Billing ir Patten, 2005). Iš viso buvo įvertinta 17 transporto priemonių kombinacijų, tarp kurių buvo pagrindinės autocisternų konfigūracijos naudojamos visoje Kanadoje, tarp Kanados ir JAV. Iš viso 7 (41%) transporto priemonių junginiai parodė statinį apsvertimo slenkstį žemesnį nei 0,35 g, kai pakraunama iki leistino bendrojo svorio Ontarijuje, o 14 (83%) transporto priemonių paaiškėjęs apsvertimo slenkstis žemesnis nei 0,4 g. Be to, sąsąta su pakeliamomis ašimis riba sumažėjo 0,01–0,03 g, kai tos ašys posūkio metu yra pakeltos. Billing ir Patten (2005) taip pat analizavo tai, kad gamybos sąnaudų sumažinimas atrodo esminis punktas Kanados ir JAV cisternų gamintojams, tuo tarpu dinaminio stabilumo gerinimas yra prioritetas Europos gamintojams. Pneumatinių pakabų ir plačių padangų naudojimas priekabos ašimis Europos gamintojams leistų lengvai atitikti apsvertimo stabilumo ribą – 0,4 g, kuri yra nustatyta ADR (2011m.) cisternoms, gabenančioms pavojingus krovinius.

Avarijos apsiverčiant paprastai būna inicijuojamos esant staigiems vairo pasukimais, kurie atliekami norint išvengti kliūčių atsiradusių ant važiuojamosios kelio dalies arba stengiantis išlikti savo važiavimo juostoje. Esant tokioms sąlygoms stabilumo ribos grindžiamos statine analize (SRT – Static rollover threshold (statinio apsvertimo slenkstis)) gali būti nepakankamos, nes neatsižvelgiama į dinaminį atsaką (Dahlberg, 2000; Dahlberg ir Stensson, 2006). Buvo spėjama, jog transporto priemonė gali apsiversti esant mažesniai nei SRT pagreičiui (Gertsch ir Eichelhard, 2003). Dinaminis apsvertimo slenkstis (DRT – Dynamic Rollover Threshold), apibrėžiamas kaip pagreitis, per kurį gali įvykti apsvertimas trumpalaikio manevro metu. Jis kietų krovinių transporto

priemonėms buvo apskaičiuotas apytiksliai 20% žemesnis palyginus su SRT (Gertsch ir Eichelhard, 2003). Skystųjų krovinių judėjimas dalinai užpildytame rezervuare gali dar labiau sumažinti dinaminio apsvertimo slenkstį. Tyrimai rodo, kad blogiausios teliuškavimo sąlygos atsiranda užpildžius cisterną nuo 40 % iki 70 % tūrio. Esant tokioms krovos sąlygoms, apvirtimas gali įvykti pagreičio lygyje, kuris yra lygus pusei SRT (Ervin ir Mathew, 1988). Važiavimo krypties pakeitimo dažnis taip pat gali pabloginti transporto priemonės atsparumą apvirtimui. Vairo padėties pokyčio dažnis artimas 0,5 Hz gali sukelti rezonansinį teliuškavimą dalinai užpildytose cisternose (Ervin ir Mathew, 1988; Winkleris ir Ervinas, 1999). Kalbant apie tokio reiškinio prevencijos standartus, tik Europos ekonominė bendruomenė pritaikė vieną akivaizdžią taisyklę tam, kad būtų išvengta stabilumo pablogėjimo dėl bangavimo. ADR (2011 m) susitarime teigiama, kad leidžiamas užpildyti rezervuaro skyrius, kurio didžiausia talpa 7500 litrų, yra daugiau kaip 80% arba mažesnis nei 20%.

ADR (2011) susitarime autocisternų stabilumas nagrinėjamas dviem etapais. Pirmasis etapas reguliuoja rezervuaro kraštinių santykį virtimo plokštumoje, o tam reikalingas didžiausias plotis tarp tolimiausių kontaktuojančių taškų, kuris turi būti ne mažiau kaip 90 % pakrautos transporto priemonės masės centro aukščio. Antrasis etapas rekomenduoja visoms autocisternoms, kurių talpa yra didesnė nei 3 m³, skirtoms skystiems ar išlydytiems pavojingiems kroviniams gabenti, turi atitikti ECE taisyklės Nr. 111 dėl šoninio stabilumo (UN-ECE No. 111, 2000), techninius reikalavimus. ECE taisyklėje 111 reikalaujama, kad SRT ribos būtų randamos atliekant pakreipiamo pagrindo bandymą arba alternatyvų vertinimo metodą. Atliekant bandymą su pakreiptu pagrindu, statinis transporto priemonės apsvertimo stabilumas turi būti toks, kad ratai vienoje pusėje neprarastų sąlyčio su pakreipiamo pagrindo paviršiumi iki 23° kampo. Be to, bandymą reikia pakartoti tris kartus, kad būtų galima pakreipti kiekvieną transporto priemonės šoną. Taip pat, pakreipiamo pagrindo bandymas atliekamas esant visai apkrovai, mažiausiai 70 % užpildyto cisternos tūrio. Be to, pakreipto pagrindo kampas turėtų būti didinamas lėtai, kampiniu greičiu mažesniu kaip 0,3°/s. Standarte taip pat pateiktas SRT įvertinimo metodas transporto priemonėms ir reikalauja numatomo apvirtimo stabilumo arba šoninio pagreičio 4 m/s². Įvertinimo metodas taip pat reikalauja atsižvelgti į daugelį veiksnių, darančių įtaką apsvertimo stabilumui, pavyzdžiui, masės centro aukštis, vėžės plotis ir pakabos bei padangos standumas.

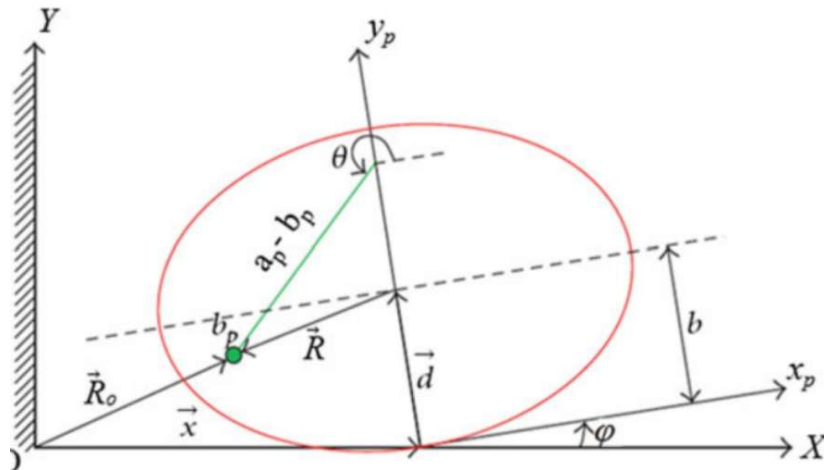
ADR (2011) taip pat reglamentuoja bangolaužių naudojimą, kad būtų išvengta cisternos korpuso pažeidimų. Autocisternoms gabenant skystus krovinius, korpusas turi būti aprūpintas sutvirtinimo elementais, sudarytais iš pertvarų, bangolaužių arba išorinių ir vidinių žiedų, o atstumas tarp dviejų gretimų stiprinimo elementų neturi viršyti 1,75 m. Į stiprinimo elementus galima neatsižvelgti, jei skysčio tūris tarp dviejų gretimų sutvirtinančių elementų yra mažesnis nei 7500 litrų. Taip pat, perskiriantis elementas turi uždengti mažiausiai 70 % rezervuaro skerspjūvio ploto.

Kaip aiškiai nurodyta šiame skyriuje, rezervuarų projektavimo standartai Šiaurės Amerikoje yra gana skirtingi palyginus su Europos bendrija. Šiaurės Amerikos nuostatuose trūksta minimalaus statinio apvirtimo slenkščio (SRT) ir reikalavimų dėl užpildymo sąlygų, kurie aptariamais Europos bendrijos nuostatuose. Kai kurios rezervuarų specifikacijos, tokios kaip US DOT 406 ar Kanados atitikmuo TC 406, pasižymi gera kokybe, palyginti su SRT, net jei juose nėra reikalavimų apie minimalų SRT pagal oficialų JAV federalinio reglamento kodeksą, CFR 49 (Billing ir Patten, 2005). Be to, šoninių pertvarų naudojimas taip pat nėra svarstomas ne Europos, nei Šiaurės Amerikos standartuose. Gamybos kaštų sumažinimas ir sunkumai vykdant cisternų valymo funkcijas yra pagrindinės priežastys atbaidančios naudoti pertvaras, nors šoninės pertvaros gali žymiai sumažinti

pavojų atsiradusį dėl skysčio teliuškavimo iš dalies užpildytoje autocisternoje (Ervinas ir Mathew 1988).

Skysčių bangavimas judančiose talpyklose buvo plačiai tiriamas nuo 1960 m. Abramson (1966) pateikia išsamią skysčių bangavimo problemų apžvalgą. Vis dėlto nagrinėjama tik klausimai, susiję su taikymu kosminėse transporto priemonėse, remiantis eksperimentais ir teorinėmis žiniomis. Taip pat pateikiama literatūros apžvalga apie skysčių – talpyklų sąveiką, daugiausia dėmesio skiriant parametrams, kurie daro įtaką dalinai užpildytų autocisternų stabilumui atliekant įvairius manevrus. Be to, Ibrahim ir kt. (2005) išsamiai apžvelgė teliuškavimo reiškinį, kurį taiko atliekant tyrimus įvairiose srityse, tokiose kaip suskystintų gamtinių dujų laivuose transportavimo metu, sandėliavimo cisternose, erdvėlaivių ir autocisternų tyrimuose. Vis dėlto dauguma apžvalginių publikacijų skysčių bangavimo srityje yra susijusios su kosmoso ir vandens transporto priemonėmis. Iš esmės tyrimai, kuriuose analizuojamas skysčių bangavimas keliais judančiose talpyklose, gali būti suskirstyti į tris kategorijas, remiantis analizės metodu: kvazistatiniai, mechaninė analogija ir dinaminis skysčio bangavimas. Šie analizės metodai kartu su jų pagrindinėmis savybėmis ir apribojimais, taikomų banguojančiam skysčiui ir transporto priemonės dinamikai, yra aprašomi toliau.

Kvazistatinis modelis yra supaprastintas skysčio laisvo paviršiaus, esančio judančiose talpyklose, padėties nusistovėjimo prognozės metodas. Galima pavaizduoti taip, jog be skysčio esantis paviršius pakeičiamas tiesia linija, kuri yra susijusi su apsvertimo judesiu ir šoniniu pagreičiu, nustatytu vertimosi plokštumoje, arba virtimo judesiu ir išilginiu pagreičiu virtimo plokštumoje (Popov, 1991). Vėliau įvertinamas pastovus krovinio poslinkis, siekiant ištirti jo poveikį transporto priemonės krypties dinamikai.



1.1 pav. Ovalo formos cisternos kvazistatinis virtimo plokštumos modelis [1]

Sankar ir kt. (1986) ištyrė sujungtų transporto priemonių, turinčių cilindrinės kiaurymės ir talpyklas esant dalinėms apkrovoms, pastovaus posūkio metu, atsparumą apvirtimui, naudojant kvazistatinį skysčio bangavimą ir transporto priemonės statinę virtimo plokštumą. Tyrimo metu padaryta išvada, kad iš dalies užpildytos autocisternos gaunamas mažesnis slenkstinis apsvertimo pagreitis, palyginti su kieto krovinio transportavimo transporto priemonėmis. Išvystytas kvazistatinis, dalinai užpildytos talpos, virtimo plokštumos modelis, tam kad būtų galima apskaičiuoti jėgas ir momentus, susijusius su krovinio apkrovos poslinkiu. Skystųjų krovinių masės centro vertikalus ir šoninis pasislinkimas tolygiai važiuojant posūkiu buvo apskaičiuotas naudojant keturių

skirtingų rezervuaro skerspjūvių kartotinį algoritmą; apskrito, elipsės formos, modifikuoto ovalo ir modifikuoto kvadrato. Statinės riedėjimo pusiausvyros lygtys išspręstos mažais virtimo kampo padidinimais, kol priekabos ir vilkiko padangos pakilo nuo žemės. Apvirtimo riba nustatyta naudojant didžiausią šoninį pagreitį, gautą skaičiavimo proceso metu. Tyrime padaryta išvada, kad apvalios cisternos turi aukštesnę stabilumo ribą naudojant didelio tankio skysčius, o modifikuotos ovalios ir modifikuotos kvadratinės cisternos rodo aukštesnį slenkstį esant mažo tankio skysčiams tam pačiam kroviniui ir ašių apkrovoms.

Sukurtas trijų dimensijų transporto priemonės modelis, integruojant kvazistatinį skysčio teliuškavimo ir virtimo plokštumos modelį, kad būtų galima ištirti skysčio apkrovos poslinkio poveikį transporto priemonėse su cisternomis, esant pastoviam važiavimo greičiui. Tyrimas parodė reikšmingą kelio, kuriuo važiuoja autocisterna, krypties pasikeitimą dėl skysčio judėjimo nuolat atliekant posūkio manevrą. Šis modelis toliau panaudojamas analizuojant traukinio cisternos kryptinę dinamiką atsižvelgiant į dalines apkrovas. Taip pat sukurta paprasta kompiuterinė programa, paremta kvazistatine analize, įvertinti iš dalies užpildytų autocisternų virtimo stabilumą įvairioms cisternų geometrijoms, esant nuolatiniam sukimo manevrui.

Išilginės apkrovos bangavimo plokštumoje tyrimui taip pat buvo naudojamas kvazistatinis modelis. Ranganathanas ir Yang (1996) ištyrė dalinai užpildyto cilindrinio rezervuaro skysčio apkrovos poslinkio įtaką autocisternos stabdymo charakteristikoms. Transporto priemonė buvo penkių ašių vilkiko – puspriekabės sąstatas, kurią sudaro trys ašys, veikiamos pastovaus lėtėjimo ir nulinio vairavimo. Tyrimas parodė, kad krovinio pasislinkimas iš transporto priemonės galo į priekį yra gana didelis, palyginti su ekvivalentiniu kieto krovinio sąstatu, ypač esant nuo 40 % iki 60 % užpildymo lygiui.

Kitas svarbus kvazistatinio metodo taikymas susijęs su autocisternų projektinių parametru optimizavimu, siekiant pagerinti tokių transporto priemonių stabilumą ir kryptinę dinamiką. Pavyzdžiui, Popov ir kt. (1993) sukūrė optimizavimo metodą, pagrįstą skysčio judesiu dvimatėse stačiakampėse talpyklose, atliekant pastovius posūkio manevers. Tyrime pateiktas optimalus rezervuaro aukštis, kuris netiesiškai kinta nuo 0,707 iki 0,5 rezervuaro pločio, šoniniam pagreičiui nuo 0 iki 1 g, nepriklausomai nuo skysčio užpildymo lygio. Popov ir kt. (1993) taip pat atliko skaitmeninę analizę, siekdami nustatyti optimalų elipsės formos cisternos aukščio ir pločio santykį, remiantis pastovios būklės sprendimu. Analizė buvo pagrįsta minimalizuojant aukščiausio piko momentą, atliekant pastovų posūkio manevrą. Tyrimo rezultatas parodė, kad optimalus aukščio ir pločio santykis mažėja didėjant šoninio pagreičio dydžiui. Tyrimas taip pat atskleidė, kad elipsės formos konteineriai yra mažiau stabilūs nei tokios pačios talpos stačiakampiai ar modifikuoti stačiakampiai.

Kitas pavyzdys yra Zhanqi ir kt. darbas (1995), kuris pasiūlė optimalų dalinai užpildyto rezervuaro dydį, pačiai talpai atliekant nuolatinį lėtėjimo manevrą, naudojant kvazistatinį skysčio slėgį. Tyrimas parodė, kad vienodo ilgio skyriai galėtų užtikrinti minimalų išilginės apkrovos persikėlimą tiesiu stabdymo manevru. Kvazistatinis metodas taip pat buvo naudojamas siekiant gauti optimalų rezervuaro skerspjūvį iš bendro rezervuaro skerspjūvio su aštuoniom simetriškom arkom. Optimizavimas buvo pagrįstas skysčio masės centro aukščio ir skysčio šoninio judėjimo minimizavimu esant skirtingiems užpildymo tūriams. Tyrime buvo pasiūlytos dvi rezervuaro geometrijos – viena skirta cisternoms, kurių skysčio pripildymo lygis skiriasi, o kitas - cisternoms, eksplotuojamoms beveik visiškai užpildžius.

Anksčiau minėti tyrimai išnagrinėjo tik dvimatį kvazistatinį skysčio judėjimą posvyrio arba virtimo plokštumoje siekiant iširti iš dalies užpildytų autocisternų nuolatinio važiavimo posūkiu ar stabdymo savybes. Kang et al. (2000) sukūrė trimatį kvazistatinį skysčio judėjimo modelį, atsižvelgiant į tuo pat metu taikomus išilginius ir šoninius pagreičius, kuris buvo integruotas į trimatį transporto priemonės modelį. Šis modelis buvo naudojamas tiriant skysto krovinio apkrovos poslinkio įtaką virtimo ir pasvirimo plokštumose tokių transporto priemonių, kurioms atliekamas manevras prieš stabdant, dinaminei elgsenai. Tyrimas patvirtino neigiamą riedėjimo, nuolydžio ir virtimo momentų, atsirandančių dėl krovinio poslinkio, įtaką autocisternų dinaminėms savybėms.

Nors kvazistatinis metodas leidžia tiksliai apskaičiuoti skysčio masės centro nusistovėjusią būseną, o tai padeda apskaičiuoti vidutinius dinامينius apkrovos poslinkius ir vidutines kryptines reakcijas, tačiau trumpalaikio skysčio bangavimo reiškinio poveikis į tai nenagrinėjamas. Be to, kvazistatinis metodas negali būti taikomas rezervuarams su pertvaromis. Keli tyrimai ištyrė dinaminį skysčio bangavimą iš dalies užpildytose talpyklose, taikant išilginį arba šoninį arba išilginį ir šoninį pagreičius, naudojant skysčio dinamikos skaičiavimo metodus. Šie tyrimai visada rodė didelį trumpalaikį bangavimą ir vientisą paviršių veikiant pagreiciams. Tai leido suformuluoti išvadą, kad didžiausios bangavimo jėgos ir momentai yra žymiai didesni nei numatyti kvazistatiniame modelyje. Modaresi-Tehrani (2004) ir Yan ir kt. (2005), naudodamiesi FLUENT kodu, išanalizavo dinaminį skysčio teliuškavimą ir patvirtino žymiai didesnius trumpalaikio skysčio bangavimo dydžius, nurodydami tik ribotą kvazistatinio metodo pagrįstumą pereinamuoju manevru ar dideliu sužadavimo laipsniu.

Atliekant dinaminę skysčio teliuškavimo analizę, skysčio judėjimas rezervuare aprašomas išsprendus Navier-Stokes lygtis. Dinaminio skysčio bangavimo analizę galima atlikti dviem skirtingais būdais. Pirmasis variantas yra susijęs su mažos amplitudės bangavimu, darant prielaidą, kad idealus skystis yra mažo klampumo, taip pat nespūdus ir iracionalūs srautai, kai Navier - Stokes lygtys sumažėja iki potencialių srautų lygčių su tiesinėmis ribinėmis sąlygomis laisvajame paviršiuje. Šis požiūris grindžiamas linijinio sumažėjimo teorija (Abramson, 1966). Antruoju metodu didelės amplitudės bangavimas modeliuojamas naudojant Navier - Stokes lygčių sprendimus, skaičiavimo metodus. Toliau pateikiama trumpa atitinkamų tyrimų, susijusių su šiais skaičiavimais, apžvalga.

Ibrahim (2005) teigė, kad tikslūs sprendimai linijiniam skysčio teliuškavimui yra apribota įprastų talpų geometrijos su tiesiomis sienomis, kaip kad kvadratinės ar cilindrinės cisternos. Beskysčių paviršių natūralūs dažniai ir režimų formos dvidimensinėms bei tridimensinėms kvadratinėms talpoms skaičiavimai buvo pasiūlyti Abramson (1966) ir Ibrahim (2005) naudojant kintamųjų atskyrimo metodą. Dėl sunkumų, susijusių su šiuo klasikiniu kintamųjų atskyrimo metodu, skirtu analizuoti linijinį bangavimą praktiškiausiose rezervuaro geometrijose (pvz., horizontaliuose cilindruose), buvo sukurta keletas kitų linijinės bangavimo analizės metodų. Konforminis kartografavimas yra dažniausias ir efektyviausias metodas linijiniam skysčio bangavimui modeliuoti. Šiuo metodu pirminė rezervuaro geometrija paverčiama įprasta geometrija, kurioje aiškiai išsprendžiamos Laplaso lygtys, taip pat ir sienelės bei laisvo paviršiaus ribinės sąlygos. Budiansky (1960) buvo pirmasis tyrėjas, kuris naudojo šį metodą apskaičiuodamas natūralų skysčio bangavimo dažnį ir režimą dvimatėje cilindrinėje ir sferinėje talpyklose kaip skysčio užpildymo gylio funkciją. Pagrindinis dažnis buvo mažiausias beveik tuščiaame rezervuare ir didėjo padidėjus skysčio užpildymo lygiui. Tyrimo rezultatus patvirtino Mccarty ir Stephens (1960) gauti eksperimentiniai duomenys. Natūralūs skysčių bangavimo dažniai dvimatėje cilindrinėje talpyklose su kintamu skysčio gyliu taip pat buvo įvertinti Kuttler ir Sigillit (1984) metodu, kuris nubrėžė apatinę ir viršutinę

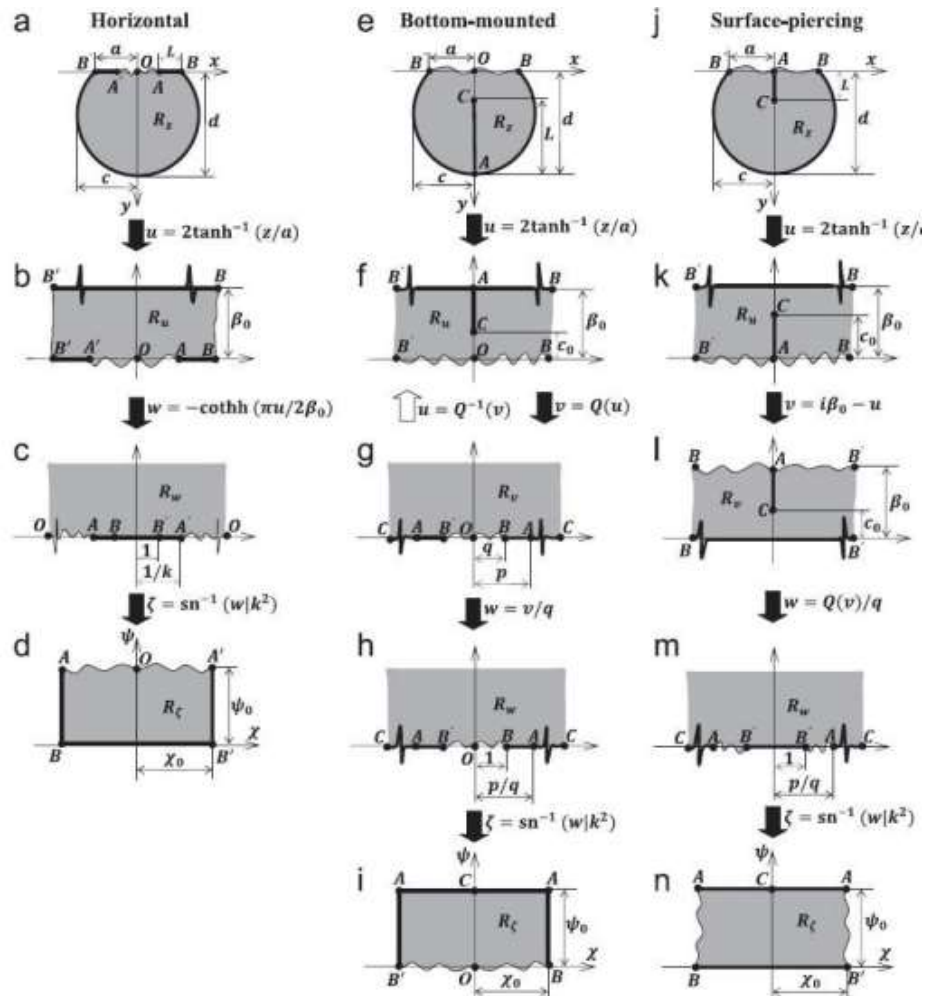
verčių ribas. Mciver (1989) taip pat sprendė, laisvo skysčio bangavimo dvimačiame cilindrinėje ir sferinėje talpyklose, srauto potencialo lygtį naudodamas konforminio kartografavimo metodą, ir nustatė natūralius dažnius atsižvelgiant į skysčio užpildymo lygį. Gauti rezultatai buvo labai panašūs į tuos, kuriuos gavo Budiansky (1960).

Papaspyrou ir kt. (2004), naudodamiesi analitiniu metodu, ištyrė skysčio bangavimą dvidimensinėse apskrito cilindro formos talpose, kuriose buvo atlikti skersiniai sužadainimai. Greičio potencialas buvo išreikštas erdvinių ir laiko funkcijų seka, tokiu būdu sumažinant dalines diferencialines lygtis į linijinių paprastųjų diferencialinių lygčių sistemą. Siūlomas metodas apsiribojo tik pusiau užpildytomis cisternomis. Patkas ir Karamanos (2007) sukūrė matematinį modelį, skirtą modeliuoti linijinio skysčio bangavimą dvimatėse horizontaliose cilindrinėse ir sferinėse talpyklose su nustatytu skysčio lygiu, esant šoniniam pagreičiui, naudojant variacinę formulę. Buvo apskaičiuoti natūralūs bangavimo dažniai, kurie vėliau buvo patikrinti remiantis Mciver (1989) teiginiais. Faltinsenas ir Timokha (2010) sukūrė linijinį multimodalinį metodą, kad būtų galima ištirti dvimatį skysčio bangavimą horizontalioje cilindrinėje talpykloje. Remiantis tiesiniu multimodaliniu metodu, laisvojo paviršiaus aukščio ir greičio potencialas buvo išreikštas natūralių bangavimo režimų seka. Tai sumažino atitinkamos linijinės ribos vertės problemą iki paprastų diferencialinių lygčių rinkinio.

Neskaitant apskrito skerspjūvio, buvo imtasi tiesinės analizės imituojant skysčio bangavimą kitokiose rezervuaro geometrijose. Fox ir Kuttler (1981) pasiūlė modalinės analizės ir kai kurių bendrosios formos talpyklų bangavimo dažnio įvertinimo metodą, pagrįstą konforminiu stačiakampių virsmu į dvi dvimačių sričių šeimas. Šią metodiką pritaikė Fox ir Kuttler (1983), norėdami apskaičiuoti plataus spektro dvidimensių talpyklų, turinčių įvairius skerspjūvius, bangavimo dažnius, įskaitant pusiau užpildytą elipsės formos, pusiau užpildytą elipsės formos su apačioje sumontuota vertikalia pertvara, pusiau užpildytą elipsės formos be pertvaros ir pusiau užpildytą cilindrinę talpa. Hasheminejad ir Aghabeigi (2009) apskaičiavo bangavimo dažnius pusiau užpildytai dvidimensei elipsės formos cisternai, su ir be horizontalių, virš skysčio sumontuotų, pertvarų. Originalus skerspjūvis buvo pertvarkytas į begalinį stačiakampį esant nesumontuotų pertvarų atvejui ir į baigtinį stačiakampį esant sumontuotų pertvarų atvejui. Tyrimas parodė, kad natūralus pusiau užpildytų elipsinių talpyklų bangavimo dažnis didėjo mažėjant rezervuaro kraštinių santykiui, nepriklausomai nuo skysčio tūrio ir rezervuaro matmenų. Tyrime taip pat aptarta, kad horizontalios šoninės pertvaros yra efektyvesnės beveik apskrito tipo talpyklose, palyginti su elipsės formos talpyklomis, kurių kraštinių santykis yra didelis.

Analitinis bangolaužių anti-bangavimo efekto modeliavimas apsiribojo labai mažai tyrimų, kuriuose buvo taikoma tiesinio bangavimo prielaida. Goudarzi ir kt. (2010) bei Goudarzi ir Sabbaghyazdi (2012) sukūrė analitinį modelį, pagrįstą potencialiu srautu ir linijiniu bangavimu, kad būtų galima įvertinti horizontalių ir vertikalinių bangolaužių slopinamąjį poveikį stačiakampėse talpyklose. Dėl pertvarų atsirandantis slopinimas buvo įvertintas naudojant pertvarų energijos santykio formulę ir bangolaužių pasipriešinimo koeficientą, kurie buvo įvertinti naudojant laisvų plokštumų pasipriešinimo koeficientą svyruojančiame skystyje (Keulegan ir Carpenter, (1958). Siūlomas analitinis sprendimas buvo paremtas eksperimentiniais matavimais. Faltinsenas ir kt. (2010) bei Faltinsenas ir Timokha (2011) taip pat atliko linijinio skysčio bangavimo stačiakampėse cisternose su pertvara sumontuota vertikaliai talpos viduryje, bandymą. Slėgio skirtumai ties plokšte buvo įvertinami pagal pastovaus slėgio skirtumą ir plokštės slėgio nuostolių koeficientą. Hasheminejadas ir Mohammadi (2011) naudojo konforminį žemėlapių sudarymo metodą (1.2 pav.),

norėdami ištirti skysčio paviršių liečiančių horizontalių šoninių pertvarų, dugne montuojamų vertikalių pertvarų ir paviršių kertančių vertikalių pertvarų, cilindrinėse talpose esant šoniniams sužadainimams, poveikį. Tyrimas parodė, kad ilga, paviršių liečiančių horizontalių šoninių pertvarų pora daro didelę įtaką natūraliam bangavimo dažniui, o apačioje montuojama vertikali pertvara nebuvo rekomenduojama kaip efektyvi apsaugos nuo bangavimo priemonė. Tačiau buvo nustatyta, kad vertikalus bangolaužis, kertantis paviršių, yra veiksmingas norint kontroliuoti skysčio bangavimą esant dideliame užpildymo lygiui. Tą pačią išvadą padarė ir Hasheminejad ir Aghabeigi (2009, 2011) bei Hasheminejad ir Aghabeigi (2012), kur buvo svarstomas elipsinis bakas su tomis pačiomis pertvarų konfigūracijomis.



1.2 pav. Nuoseklus konforminis žemėlapis cilindrinėms talpoms su pertvaromis [2].

Trijų dimensijų horizontalių cilindrinė talpyklų natūralių bangavimo dažnių ir bangavimo jėgų vertinimas, naudojant analitinius tiesinio bangavimo metodus, buvo nagrinėjamas tik keliuose tyrimuose. Dažniausiai tai priskiriama sunkumams, susijusiems su trijų dimensijų potencialo lygčių sprendimu ir laisvo paviršiaus ribos būklės įvertinimu. Moisejevas (1964) ir Moisejevas bei Petrovas (1966) sukūrė variacinį metodą, skirtą apskaičiuoti natūralų bangavimo dažnį įvairiose rezervuarų geometrijose, įskaitant cilindrinį indą. Evansas ir Lintonas (1993) nustatė greičio potencialo išraišką kaip apribotų harmoninių funkcijų seką, norėdami įvertinti bangavimo dažnį pusiau užpildytuose

dviejų ir trijų dimensijų cilindruose ir pusiau užpildytuose sferiniuose induose. Papaspyrou ir kt. (2003, 2004) taip pat išplėtė Evanso ir Lintono (1993) darbą analizuoti trijų matmenų skysčio bangavimą horizontaliuose cilindrinuose ir sferiniuose induose. Hidrodinaminės jėgos buvo vertinamos išilginiu sužadinimu, tuo tarpu tyrimai buvo atlikti tik su puspilniais indais.

Be analitinių metodų, skysčių bangavimo tiesinės ribinės vertės uždaviniui spręsti buvo naudojami skaitiniai metodai. Ru-De (1993) pateikė baigtinių elementų tiesinio skysčio bangavimo analizę vertikaloje cilindrinėje talpoje esant šoniniam sužadinimui. Cho ir kt. (2005) ir Arafa (2007) sukūrė baigtinių elementų formulę linijiniam skysčio bangavimui dvimatėse stačiakampėse talpyklose su pertvaromis. Mitra ir kt. (2007), naudodamas linijinę teoriją, panaudojo baigtinių elementų metodą laisvo skysčio paviršiaus judėjimui tirti dvimačiuose horizontaliuose cilindrinuose, stačiakampiuose, trapecijos formos ir vertikaliuose žiediniuose cilindrinuose rezervuaruose esant šoniniam sužadinimui. Rezultatai buvo pateikti atsižvelgiant į hidrodinaminio slėgio pasiskirstymą ant rezervuaro sienų ir laikiną laisvojo paviršiaus bangavimą. Karamanos ir kt. (2009) sukūrė trijų dimensijų baigtinių elementų metodą, skirtą apskaičiuoti natūralius dažnius, atsižvelgiant į skysčio užpildymo lygį horizontaliems cilindriniams, sferiniams ir kūginiams indams, esant seisminiam sužadinimui. Tengas ir kt. (2006) panaudojo kraštinių elementų metodą tiesiniam skysčio bangavimui analizuoti dvimatėse stačiakampėse talpyklose. Ribinių elementų metodas yra skaitinis metodas, skirtas spręsti integralines lygtis, kai yra atmetama tik kūno riba (Katsikadelis, 2002). Dutta ir Laha (2000) ir Firouzabadi ir kt. (2009) sukūrė ribinių elementų metodą, pagrįstą tiesine teorija natūralių dažnių ir slėgio jėgų, atsirandančių dėl skysčių virpesių, skaičiavimui trimatėse talpyklose, įskaitant stačiakampius, vertikalius cilindrinus ir sferinius rezervuarus. Firouzabadi ir kt. (2008) ir Sygulski (2011) taikė panašų metodą apskaičiuojant natūralius skysčio bangavimo dažnius ir režimo formas trimatėse talpyklose su sumontuotais bangolaužiais bei skirtinga geometrija. Bangolaužių įtaka natūraliam bangavimo dažniui taip pat buvo ištirta Gedikli ir Erguven (2003), naudojant kintantį BEM. Gedikli ir Erguvenas (1999) taip pat pranešė apie seismines reakcijas vertikaliam cilindriniam rezervuarui su žiediniu bangolaužio elementu, naudojant BEM ir režimų taikymą. Pagrindinis šių darbų indėlis buvo reikšmingas skaičiavimo išlaidų sumažėjimas, palyginti su kitais skaitmeniniais metodais, tokiais kaip baigtinių elementų metodas.

Ma (1994) tyrė rezervuaro, kuriame yra du skirtingi skysčiai, elgseną esant seisminėms apkrovoms. Šiame tyrime kartu naudojami analitiniai ir skaitiniai metodai. Savo darbe Yao tyrinėjo trimatį bangos judesį siauroje talpoje. Kim sukūrė analitinį metodą, skirtą atskleisti iš dalies užpildyto stačiakampio rezervuaro dviejų ir trijų matmenų reakcijas horizontaliomis ir vertikaliomis apkrovomis. Atsižvelgiant į bangų apkrovas, kurios atsirado bangavimo metu, Bagnoldas buvo pirmasis, kuris eksperimentiškai ištyrė šių apkrovų konstrukcinį poveikį. Atlikus šį tyrimą buvo išvesta formulė, pagal kurią galima numatyti didžiausią slėgio vertę rezervuare. Kitas svarbus eksperimentas, susijęs su bangavimo problema, buvo atliktas Akyıldız ir Ünal. Bangavimo poveikis transporto priemonės stabilumui buvo ištirtas ir kitu eksperimentiniu tyrimu. Šiame tyrime poveikis transporto priemonės judėjimui buvo įvertintas atsižvelgiant į 6 laisvės laipsnius. Daugiaaukščių pastatų atveju skysčiu užpildytos konstrukcijos yra suprojektuotos taip, kad slopintų vibraciją, kuri gali atsirasti pastate. Šios konstrukcijos vadinamos pakoreguotais skysčių slopintuvais. Šiuo klausimu atlikta daug svarbių tyrimų.

Kaip matyti iš anksčiau pateiktų pavyzdžių, bangavimo klausimas iškyla kaip problema, apimanti daugybę skirtingų disciplinų. Bangavimas yra poveikis, į kurį reikia atsižvelgti bet kuriai skysčio turinčiai struktūrai. Kai nagrinėjamas orlaivio degalų bakas, galimas bangavimo judesys turės įtakos

transporto priemonės dinaminiam stabilumui. Panašiai bangavimo judesys turės įtakos skystų krovinių laivo stabilumui. Vertinant dideliu mastu, bangavimo judesio efektą galima pastebėti ir ežero ar vandenyno mastu. Dangoraižius pastatus taip pat gali paveikti banguojantis judėjimas. Bangavimo hidrodinamika yra labai sudėtinga. Temos supratimą gali padidinti apskaičiuojama skysčių dinamika ir eksperimentinis darbas. Ypač kuriant rezervuarų dizainą, eksperimentinis darbas yra priešakyje. Yra daugybė jūromis plaukiančių laivų, turinčių įvairių modelių skysčių kaupimo bakus. Gali būti gabenama skysta neapdorota nafta, suskystintos gamtinės dujos, vanduo ir t.t.. Hidrodinaminės apkrovos, kurios veikia baką, yra proporcingos skysčio kiekiui talpoje. Net jei ji bus užpildyta skysčiu, tai bus taip, kad skystis judės dėl laivo judėjimo. Yra daugybė eksperimentinių ir skaitinių tyrimų, susijusių su skysčių rezervuarų bangavimu ir jo poveikiu laivo judesiams.

Skysčio bangavimas iš dalies užpildytose suskystintųjų gamtinių dujų/neapdorotos naftos laivuose gali atsirasti esant skirtingoms oro sąlygoms jūroje. Labai netiesinis reiškinys gali sukelti lokalias dideles apkrovas ant bakų sienų, galinčias sukelti konstrukcijos pažeidimus. Taigi, atliekant rezervuarų projektavimą, būtina ištirti bangavimo fenomenus ir su jais susijusią struktūros elgseną. Analizuojant bangavimo fenomeną, modelio testą galima atlikti esant skirtingoms sąlygoms ir pripildymo lygiams. Tačiau egzistuoja neapibrėžtumas, kai išmatuota modelio bandymo apkrova yra padidinama iki tikrojo dydžio, o skysčio klampumas taip pat lemia svarbų bangavimo slėgį. Analitiniai darbai daugiausia suskirstyti į du scenarijus, iš kurių vienas yra tiesinio potencialaus srauto teorija, apimanti idealų ir klampų skysčių slinkimą, o kitas – netiesioginio potencialo srauto teorija. Tikrą klampų slinkimą taip pat svarstė Wu ir kt., nekreipiant dėmesio į netiesinius advekcijos terminus, buvo gautas tiesinis bangavimas. Vis dėlto netiesinis viskozinis bangavimas dar turi būti gerai išanalizuotas. Be modelio testų ir analitinės analizės, skaitmeniniai metodai yra alternatyvūs įrankiai, įvertinantys aktualias bangavimo problemas. Rudmanas ir kt. naudojo išlygintų dalelių hidrodinamiką (Smoothed Particel Hydrodynamics – SPH), kad modeliuotų slydimą 2-D vandens modelyje, kuris atspindi sumažintą LNG (Liquefied Nitrogen Gas) rezervuarą. Luo ir kt. naudojo nuosekliųjų kietųjų dalelių metodą (Consistent Particle Method - CPM), norėdamas ištirti vandens slinkimą suskystintų gamtinių dujų rezervuare, esant sužadimui. Zhao ir kt. ištyrė judesį, kurį sukelia 3D bangavimas iš dalies užpildytame rezervuare, naudojant naują sujungtą „Level-Set“ ir „skysčio tūrio“ (CLSVOF) metodus, įtrauktus į baigtinio analitinio Navjė – Stokso (Finite Analytic Navier Stokes - FANS) metodą. Kim ir kt. sukūrė trimatį galutinių elementų metodą smūgio slėgiui, kurį sukelia skysčių bangavimas rezervuare, apskaičiuoti. Skysčio klampumo įtaką banguojant analizavo Zou et al., o rezultatai atskleidė, kad ribinis sluoksnis turėjo didelę įtaką reakcijos slėgiui. Xin ir Lin pasirinko erdvės vidurkio Navier - Stokes turbulencijos modelį, norėdami ištirti poveikį horizontaliai ir daugiapakopiui laisvam sužadintam bangavimui.

Romero nustatė, kad 4 proc. transporto priemonių avarių, susijusių su skystų krovinių gabenimu, įvyko bangavimo pabaigoje. Ypač tais atvejais, kai posūkiuose gali banguoti, labai tikėtina, kad greittelyje transporto priemonė bus priversta pakeisti eismo juostą. Priešingu atveju, staiga stabdymo atveju, dėl kurio transporto priemonė turi sustoti, rezervuare esantis skystis taip pat gali banguoti. Banga, kuri susidarys staiga sustojus transporto priemonei su ne užpildyta cisterna, atsitrenks į cisternos priekinę sienelę ir stums transporto priemonę bangos kryptimi. Tas pats efektas galioja traukiniams su skysčiu pripildytomis talpomis. 2004 m. Bogomazas parašė knygą, kurioje pagrindinis dėmesys buvo skiriamas tik šiai temai.

Hatayama nustatė bangavimo efektą septyniuose Tokachi žemės drebėjimo metu sugadintose cisternose. Atlikus tyrimą nustatyta, kad didžiausia žala buvo padaryta tais atvejais, kai natūralūs

rezervuarų turbulencijos laikotarpiai buvo nuo 5 iki 12 sekundžių. Didelė erdvėlaivio svorio dalis prieš paleidžiant yra jų gabenamo kuro svoris. Čia reikėtų pažymėti, kad efektyvusis bangavimo dažnis yra artimas sistemos dažniui. Tai gali sukelti dinaminius raketos neatitikimus. NASA atliko du svarbius tyrimus šia tema. Aplinka, kurioje nėra gravitacijos, kuriai veikiant erdvėlaivis patenka į orbitą, yra svarbu modeliuojant bangavimą degalų bakuose. Modelių bandymus naudoja pagrindinės klasifikavimo agentūros, norėdamos išbandyti įvairių tipų bakus, tuo pačiu išlaikydamos jų svarbą darbe šiuo klausimu. Tinkamiausio mastelio bandymų modelis yra nuo 1/25 iki 1/70. Jeonas atskleidė, kad mastelis nuo 1/25 iki 1/50 yra tinkamas, o 1/100 mastelis yra labai mažas.

Hirto pristatyta SOLA schema yra plačiai naudojamas būdas norint išspręsti Navier - Stokes lygtis, naudojant baigtinio skirtumo metodą. Sprendimo metodas taip pat buvo naudojamas modeliuojant trimatę bangavimo problemą dviejuose 2001 ir 2007 m. tyrimuose. Baigtinio skirtumo metodas pagrįstas principu, kad skirtumai nuo baigtinio Δx atstumo (arba laiko Δt) naudojami apytiksliai gauti kintamojo išvestinei. Kai šis atstumas padaromas be galo mažas, pasiekiamas diferencialo apibrėžimas. Bet skaitmeniniame tyrime šis skirtumas yra baigtinis skirtumas ir suteikia metodo pavadinimą. Jei Taylor išplėtimas taikomas aplink x tašką, sprendimus galima padaryti ieškant baigtinio skirtumo konvergencijos sąlygų.

Nagrinėjant iki šiol atliktus tyrimus, matyti, kad skaitiniai bangavimo problemos sprendimai yra priimami anksčiau paminėtais metodais. Sumažintos talpos paprastai naudojamos siekiant sumažinti bangavimo efektą. Yra atlikta įvairių rezervuarų, turinčių bangolaužius, geometrijos matematiniai tyrimai. Tuose tyrimuose talpos geometrija tapo sudėtinga, todėl analitinius metodus naudoti tapo vis sunkiau.

Norint patikrinti skaitmeninius ir matematinius tyrimus, reikia atlikti eksperimentinius tyrimus. Galima atlikti labai mažai eksperimentinio darbo, ypač palyginti su skaitiniais tyrimais. Akyıldız ir kt. siekė sumažinti bangavimo efektą, naudojant žiedinę pertvarą iš dalies užpildytame cilindriname rezervuare. Naudodami iš dalies skysčiu užpildytą cilindrinį rezervuarą, Lu et al. palygino eksperimentinių matavimų ir skaitmeninių skaičiavimų smūgio slėgį 4 skirtingais užpildymo kiekiais ir 3 skirtingais bangų ilgiais. Apskaičiuotos trumpojo bangos ilgio slėgio vertės yra mažesnės už išmatuotas vertes. Kadangi rezervuaro viršuje yra angos, išmatuotos vertės galėjo skirtis dėl oro judėjimo įtakos. Mikelis ir Journee sukūrė krovinių cisternų, naudojamų skysčiams gabenti laivuose, prototipą. Jie ištyrė slėgio pasiskirstymą susidarantį dėl rezervuaro sienų bei jėgų ir momentų, kuriuos sukelia skysčio judėjimas, ir šios situacijos įtakos rezervuaro ir laivo konstrukcijai. Jie taip pat eksperimentiškai ištyrė pusiau užšaldytų, skystų ir visiškai skystų krovinių bangavimo efektą. Atlikus eksperimentą pastebėta, kad pusiau užšaldytas skystis sudrėksta greičiau. Bredmose ir kt. eksperimentiniu ir skaitmeniniu būdu ištyrė horizontalųjį bangavimą. Darbo pradžia – mintis, jog bako pagreitis gali sukelti dvi skirtingas reakcijas, jungiančias viena kitą. Tai yra stiprus trumpas skysčio poveikis rezervuaro sienelėms ir plačios amplitudės bangavimo judesiai. Stiprus poveikis sukelia labai didelį slėgį, kurį galima išanalizuoti naudojant slėgio impulsų teoriją. Ilgas bangavimo judesys po pirmųjų skysčio pagreičio/lėtėjimo žingsnių sukelia stiprų slėgį tarp vidutinės ir aukštos vertės talpos sienose. Panigrahy ir kt. išmatavo skirtingų kvadratinių bakų vietų slėgį esant skirtingiems užpildymo atvejams ir tai pateikė slėgio diagramoje pagal laiką. Nustatytas paviršiaus ryšys tarp bangos ilgio ir užpildymo gylio. Eksperimentai su žiediniais bangolaužiais suteikia vilčių teikiančių rezultatų. Kai kurie gauti rezultatai yra šie: slėgio svyravimai, atsirandantys rezervuaro sienose šalia laisvo skysčio paviršiaus, yra didesni nei vykstantys giliau. Jie padarė išvadą, kad žiedo formos bangolaužiai yra efektyvesni nei įprastos horizontalios, vertikalios pertvaros.

Taip pat atlikta daugybė iš dalies skystu skysčiu užpildyto rezervuaro skaitinių tyrimų, aiškinantis bangavimo padarinius. Baigtinio tūrio metodas daro prielaidą, kad erdvinė sritis yra padalinta į ištisinių baigtinių kontrolinių tūrių skaičių. Dvi grupės valdymo lygtys yra naudojamos norint išreikšti nuo laiko priklausomus masės ir impulsų pokyčius kontroliniame tūryje. Formavimo pagrindai, masės tęstinumas ir Navier - Stokes lygtys. Išsami informacija apie baigtinio tūrio metodo skaitmeninius sprendimus buvo parodyta Muzaferijos ir Ferzigerio tyrimuose. Šis metodas yra pritaikytas bangos judėjimui suskystintam dujas transportuojančiose cisternose 2007 m. „Peric“ tyrime. Pagrindinis šio darbo skirtumas yra tas, kad išspręstos Reynolds'o vidutinės lygtys.

Baigtinių elementų metodas (Finite Elements Method – FEM) naudojamas sprendžiant daugybę skirtingų inžinerinių problemų. Šis metodas taip pat pritaikytas bangavimo problemai spręsti įvairiuose tyrimuose. FEM yra sudėtingesnis nei kiti metodai sprendžiant Navier - Stokes lygtis. Herfjordanas ir Tonnessenas savo darbe pasiekė gerų, srauto aplink dvimatį kūną, sprendimų rezultatų. Šiuo metodu srauto laukas yra padalijamas į elementus ir šiems elementams naudojamos formos funkcijos.

Išlygintų dalelių hidrodinaminis metodas (Smoothed Particle Hydrodynamic - SPH), srauto lauką apibūdina baigtinis dalelių skaičius. SPH gali gerai apibūdinti netiesines problemas, ypač bangavimą. Šiame metode naudojamos Navier - Stokes lygtys. Pagrindinė sprendimo idėja yra apibrėžti skystį su grupe (lygiųjų) dalelių. Monaghanas pritaikė šį metodą, kuris iki tol buvo naudojamas astrofizikoje, skaičiavimo skysčių dinamikos sričiai. Klasikinis SPH metodas yra pagrįstas interpoliacija aplink kiekvieną dalelę, kad būtų gautos metodo formulės. Interpoliavimo metodas leidžia bet kurią funkciją išreikšti netaisyklingų taškų grupėje (dalelėje).

Laisvo paviršiaus srautų tyrimai ir toliau kelia susidomėjimą pramonės įmonėmis ir akademiniam sluoksniams. Šią problemą išspręsti taikant Eulerio metodus yra labai sunku. Tačiau pagrindinis SPH metodo pranašumas yra puikus sudėtingų problemų identifikavimas. Monaghanas pateikė SPH taikymo pavyzdžius 1994 m. Šie pavyzdžiai apima bangų paletės ir bangos, einančios šalia kranto, analogiją su vandens judėjimu, kurios rezultatas galiausiai bus sudužusi banga. Rezultatai parodė, kad SPH gali būti naudojamas imituojant laisvą paviršių. 2007 m. Guilcherio tyrime SPH metodas apėmė Riemann ir branduolio funkcijos pataisus. „Marrone“ sukūrė labai svarbų algoritmą, skirtą stebėti laisvą paviršių dviem ir trimis matmenimis. Pirmasis šio požiūrio žingsnis yra aptikti daleles, kurios sukuria laisvą paviršių; antrasis žingsnis yra funkcijos, kuri bus naudojama atliekant interpoliaciją, perdavimas. Bai et al. sukūrė skaitmeninį modelį, kuris imituos bangavimą dvimatėje stačiakampio formos cisternoje, kuri yra dalinai užpildyta skysčiu. Valdančiosios lygtys yra išspręstos taikant baigtinio diferencialo metodą, naudojant pakopinių tinklelių metodą. Šis modelis naudoja dvi skysčio fazes tuo pačiu metu ir siekia užkirsti kelią bangų lūžimams netiesiniuose slinkties srautuose. Modeliuodami judančią koordinačių sistemą, galima lengvai imituoti slenkančias bangas stačiakampėje talpykloje, judančioje atsitiktine tvarka trimis laisvės laipsniais. Sukurtas skaitinis modelis yra švelnus ir atitraukiantis bangas, kurias sukuria vienas bangos ir žingsnio judesys, gali būti patikrintas imituojant. Skaitmeniniai tyrimo rezultatai dera su kitais eksperimentais ir skaitmeniniais šio skaitmeninio modelio rezultatais, įrodančiais jo pritaikomumą sprendžiant sudėtingas bangavimo problemas. Wang ir kt. išanalizavo bangavimo efektus talpose turinčiose trijų formų bangolaužius, įskaitant ties paviršiumi esantį bangolaužį, apačioje montuojamą bangolaužį ir jų T ir Y formos pertvarų derinių formą elipsės formos rezervuare. Ribos mastelio baigtinių elementų metodas („Scaled Boundary Finite Element Method (SBFEM)“) suformuluotas siekiant išspręsti bangavimo problemą naudojant zonavimo metodą, kuris iš pradžių

apima greičio potencialus. Pirmiausia SBFEM pritaikomas T formos elipsės formos rezervuarų bangavimo judesiams. Taip pat buvo sukurtas SBFEM srauto greičio sprendimas išilgai pertvarų. Taip pat ištirtas ryšys tarp atitvaro parametrų ir bangavimo efekto. Skaitiniai rezultatai rodo, kad siūlomu metodu galima pasiekti tikslumą, artimą tobulumui. Vienas didžiausių programos pranašumų yra tas, kad per trumpą laiką ji atlieka mažiau operacijų ir greičiau gaunamas rezultatas. Goudarzi ir Farshadmaneshas ištyrė viršuje sumontuotas pertvaras (Upper Mounted Baffles - UMB) ir paaikšino jų pranašumus. Naudojant UMB stačiakampėje talpoje, bangos aukštį, kurį sukelia bangavimas, galima sumažinti 50 %. Tokiu būdu sumontavus atitvarus taip pat lengviau įvertinti bangos aukštį rezervuare.

Jean Ma ir Mohammad Usman pristatė idėją, jog iš dalies pripildytų degalų bakų bangavimo reiškinytis yra ryškesnis, kai transporto priemonė staigiai pradeda judėti ar stabdyti. Bangavimas nepageidautinas, nes jis sukelia triukšmą, didelę smūgio jėgą į rezervuaro sienas. Šiandien, norint sumažinti bangavimą, priimtas sprendimas yra į bako vidų įstatyti pertvaras. Esant bangolaužiams, energija, kurią sukelia degalų judesiai, išsisklaido. Kuriant degalų baką, būtinas pertvarų projektavimas, kad jos atitiktų reikalaujamas eksploatacinių savybių specifikacijas.

Ranjit Babar ir Katkar teigė, jog bangavimas turi daugybę pritaikymų automobilių, kosmoso ir laivų statybos pramonėje. Skysčio elgsena degalų bako yra labai svarbi siekiant užtikrinti minimalią skysčio turbulenciją rezervuare. Šis turbulencija ne tik sukelia triukšmą, bet ir padidina apkrovas struktūrai dėl skysčio trankymosi į rezervuaro sienes. Norint pašalinti šią problemą, reikia, kad pertvaros autocisternose būtų montuojamos tam tikrose vietose taip užtikrinant mažesnę konstrukcijos apkrovą. Atsparumo bangavimui bandymo modeliavimas yra kritinis, nes tai yra įvairialypė problema, apjungianti skysčio sąveiką su struktūra ir yra pereinamasis reiškinytis. Ši problema modeliuojama naudojant susietą Eulerio - Lagranžo metodą. Šie modeliavimai reikalauja daug laiko, dėl labai mažų žingsnių ir labai didelio ciklo laiko. Taigi sukurtas metodas naudojantis standų baką ir mažo tūrio vandens modulį, kuris pagreitina simuliaciją. Šiuos modeliavimus galima naudoti įvertinant skirtingus pertvarų dizainus tiriant skysčių judėjimą rezervuaro viduje. Galutinai nustačius pertvarų vietas, imituojamas galutinis degalų bako struktūros tvirtumas.

Kim Hyun-Soo ir Lee Young-Shin pristatė mintį, kad skysčio svyravimai, kuriuos sukelia išorinė jėga, vadinami bangavimu, vyksta judančiose transporto priemonėse, kuriose yra skysčių, tokiose kaip sunkvežimiai, geležinkelio vagonai, orlaiviai ir t.t.. Šis bangavimo efektas gali būti rimta transporto priemonės stabilumo ir valdymo problema. Todėl labai svarbu sukurti efektyvų ir lengvą metodą, mažinantį bangavimo efektą. Priimama skysčių laikymo talpykla yra stačiakampio formos bakas. Dizaino kintamieji yra bangolaužio plotis ir įrengimo vieta, o optimizavime kaip objekto funkcija naudojamas bangavimo mažinimo koeficientas, naudojant bangolaužį.

„Jang-Ryong Shin“, „Kyungsik Choi“ ir „Sin-Young Kang“ taigė, kad projektuojant tanklaiviuose ar suskystintų gamtinių dujų transportavimo įrenginiuose, transportuojančiuose didelį kiekį skysčio savo krovinių cisternose, struktūrinė žala dėl skysčių bangavimo yra svarbi problema. Slėgis smūgio metu, kurį sukelia bangavimas, yra pats stipriausias, kai dalinai užpildytos talpyklos skysčio judesiai yra panašūs į laivo judesį ir rezonuoja. Norint sumažinti potencialią bangavimo žalą, galima apriboti rezervuaro dydį ir užpildymo lygį. Vidiniai konstrukciniai elementai arba pertvaros, kai jos yra tinkamai suprojektuotos, veiksmingai sumažins skysčio judėjimą. Vertikalūs bangolaužiai yra veiksmingi, kai reikalingas negilus užpildymas, o horizontalūs bangolaužiai yra naudingi giliam užpildymo lygiui.

N. Aquelet ir M. Souli teigė, kad Lagranžo – Eulerio (LE) baigtinių elementų metodai sulaukia susidomėjimo dėl galimybės valdyti tinklelio geometriją nepriklausomai nuo medžiagos geometrijos, LE metodai naudojami kuriant naują neiškreiptą tinklelį skysčio srityje. Šiame darbe bus naudojama LE technika, kaip priemonė išspręsti skysčio bangavimo problemą. Siekiant išlaikyti skysčio tinklelio vientisumą talpos judesio metu, buvo sukurta nauja LE formulė skysčio tinkleliui.

P.Pal apibūdino tai, kad skystis pasirinktos formos talpykloje, veikiant išoriniams sužadiniams, sukelia paviršiaus ir korpuso turbulenciją. Tokios turbulencijos pobūdis yra gana sudėtingas dėl keleto efektų, tokių kaip bangavimas, slėgio gradientas ir kt. Tarp jų, bangavimas padaro skysčio baką jautresnį struktūriniais pažeidimams. Taigi skysčio bangavimas yra praktinė transporto sistemų, tokių kaip autocisternos keliuose, skysčio cisternų vagonai, vandenynuose plaukiojantys laivai su skystais kroviniais, raketinio kuro bakai, naudojami palydovuose ir kituose erdvėlaiviuose, ir keletas kitų, saugumo problema.

K.J. Craigas, T.C. Kingsley, R. Dieterich, L. J. Haarhoff ir N. Stander teigė, kad degalų bakų projektavimui tiek bangavimui, tiek smūgiams skiriamas augantis dėmesys. Neseniai komerciniuose CFD koduose, tokiuose kaip FLUENT4, buvo laisvųjų paviršių prognozavimo galimybių, ir tai leido į projektavimo ciklą įtraukti tokį reiškinį kaip bangavimas. Kitas laisvųjų paviršių apdorojimo būdas yra Papildytasis Eulerio - Lagranžo (Augmented Eulerian-Lagrangian - ALE) metodas, kaip aprašyta LSDYNA5. Šis metodas ypač aktualus esant skysčių struktūros sąveikai.

Norint patvirtinti kosminių transporto priemonių projektavimo problemas, būtina imituoti ir analizuoti bangavimo fenomeną. Taip pat akivaizdu, kad bangavimo analizė yra vienas iš svarbiausių aspektų, skirtas kosminių transporto priemonių dizainui.

Umer tyrė horizontalios perforuotos pertvaros poveikį bangavimui vienoje cisternos kameroje esant skirtingiems užpildymo lygiams. Stabdant ir staigiai išvengiant kliūties, skysčio smūgio poveikis, kurį toliau daro bangavimas, gali būti žalingas. Kadangi dalinai užpildytose skysčių turinčiose cisternose krovinyse lengvai pasislenka, kai jį lydi dinaminis smūgis, jis tampa apvirtimo momentu ir sutrikdo linijinį autocisternos stabdymą. Autocisternos, vežančios pavojingus skysčius, kelia daug didesnę pavojų, nes apvirtus gali įvykti sprogdimas. Analizė atliekama su autocisternų modeliais, kuriuose yra sumontuota horizontali pertvara su skylėmis, taip pat ir be šios pertvaros. Cisternos tyrimams naudojama Ansys CFX programinėje įrangoje esanti integruota VOF (Volume of Fluid) sistema. Norint vizualiai pateikti skysčio elgseną cisternoje esant tam tikriems scenarijams, atliekama serija analizių, kurios skirtos sekti laisvą paviršiaus judėjimą, slėgio pokyčius, masės centro poslinkį ir skysčio virpesių reakciją talpos viduje.

1.2. VOF modelio apžvalga ir apribojimai

1.2.1. Apžvalga

Atliekant skysčių dinamikos skaičiavimus, skysčio tūrio (Volume Of Fluid - VOF) metodas yra laisvo paviršiaus judėjimo modeliavimo būdas, t.y. skaitmeninė laisvo paviršiaus judėjimo (arba skysčio ir kieto kūno sąveikos) sekimo ir vietos nustatymo technika. Tai priklauso Eulerio metodų klasei, kuriai būdinga nejudantis arba tam tikru būdu judantis tinklelis, kad atitiktų besikeičiančią skysčio formą. Iš esmės VOF yra skaitinis skaičiavimo būdas, leidžiantis programuotojui sekti

skysčio formą ir vietą, tačiau tai nėra atskiras srauto sprendimo algoritmas. Navier – Stokes lygtys, apibūdinančios srauto judėjimą, turi būti išspręstos atskirai.

VOF modelis gali modeliuoti du ar daugiau nesimaišančius skysčius, išspręsdamas vieną momentų lygčių rinkinį ir sekdamas kiekvieno skysčio tūrio dalį kiekvienoje srityje. Tipinis taikymas apima reaktyvinio skilimo prognozavimą, didelių burbuliukų judėjimą skystyje, skysčio judėjimą po užtvankos griuvimo ir pastovų ar trumpalaikį bet kurios skysčio - dujų sąveikos stebėjimą.

1.2.2. Apribojimai

- Privaloma naudoti slėgio pagrindu veikiančią skaičiavimą. VOF modelio negalima naudoti su skaičiavimu pagal tankį.
- Visi kontroliniai tūriai turi būti užpildomi vienos fazės skysčiu arba fazių deriniu. VOF modelis neleidžia tuštėti regionams, kuriuose nėra jokio tipo skysčių (oras yra taip pat traktuojamas kaip skystis).
- Tik viena iš fazių gali būti apibrėžta kaip suslegiamos idealiosios dujos. Suslegiamų skysčių naudojimas naudojant vartotojo apibrėžtas funkcijas nėra ribojamas.
- Periodiškas srautas (nurodytas masės judėjimo srautas arba nurodytas slėgio kritimas) negali būti modeliuojamas, kai naudojamas VOF modelis.
- Stebint daleles paraleliai, DPM modelio negalima naudoti su VOF modeliu, jei įjungta „shared memory“ parinktis.

1.2.3. Pastoviosios būsenos ir trumpalaikių VOF skaičiavimai

VOF ANSYS FLUENT paprastai naudojama apskaičiuoti nuo laiko priklausomą sprendimą, tačiau problemoms, kuriose reikalingas tik pastovios būklės sprendimas, galima atlikti pastoviosios būsenos apskaičiavimą. Pastovios būsenos VOF apskaičiavimas yra reikalingas tik tada, kai sprendimas nepriklauso nuo pradinių sąlygų ir yra atskiros atskirų fazių įėjimo ribos. Pavyzdžiui, kadangi laisvai judančio paviršiaus forma besisukančio puodelio viduje priklauso nuo pradinio skysčio lygio, tokią problemą reikia išspręsti naudojant nuo laiko priklausantį būdą. Kita vertus, vandens srautas kanale, kurio viršuje yra oro sritis ir atskira oro įleidimo anga, gali būti išspręsta nusistovėjusios būklės būdu.

VOF formuluotė remiasi tuo, kad du ar daugiau skysčių (arba fazių) nesimaišo. Kiekvienai papildomai fazei, kuri pridedama prie modelio, pateikiamas kintamasis: fazės tūrio dalis skaičiavimo langelyje. Kiekviename kontroliniame tūryje visų fazių tūrio dalys susilygina su vienetu. Visų kintamųjų ir savybių laukai yra dalijami fazėmis ir parodo reikšmes, kurių vidurkis yra tūris, jei kiekvienos fazės tūrio dalis yra žinoma kiekvienoje vietoje. Taigi kintamieji ir savybės bet kuriame langelyje yra tipiškai vienai iš fazių arba fazių mišiniui, priklausomai nuo tūrio dalies vertės. Kitaip tariant, jei skysčio q^{th} skysčio tūrio dalis langelyje žymima kaip α_q , tada galimos šios trys sąlygos:

- $\alpha_q = 0$: Langelis yra tuščias (q^{th} skysčio nėra).
- $\alpha_q = 1$: Langelis yra pilnas (q^{th} skysčio).
- $0 < \alpha_q < 1$: Langelyje yra sąsaja tarp q^{th} ir vieno ar daugiau skysčių.

Remiantis vietine α_q verte, atitinkamos ypatybės bei kintamieji bus priskiriami kiekvienam kontroliniam tūriui.

1.2.4. Tūrio dalies lygtis

Fazių sąsajos (-ų) stebėjimas atliekamas naudojant tęstinumo lygties sprendimą, tenkantį vienos (ar daugiau) fazių tūrio daliai. q^{th} fazei ši lygtis turi tokią formą:

$$\frac{1}{\rho_q} \left[\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla * (\alpha_q \rho_q v_q) = S_{\alpha_q} + \sum_{p=1}^n (m_{pq} - m_{qp}) \right]; \quad (1.1)$$

Čia m_{qp} yra masės persikėlimas iš fazės q į fazę p ir m_{pq} yra masės persikėlimas iš fazės p į fazę q . Pagal nutylėjimą šaltinio terminas esantis lygties dešinėje, S_{α_q} , yra lygus nuliui, tačiau kiekvienoje fazėje galima nurodyti pastovų arba vartotojo apibrėžtą masės šaltinį.

Pirminės fazės tūrio dalies lygtis nebus išspręsta; pirminės fazės tūrio dalis apskaičiuojama remiantis šiais apribojimais:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1; \quad (1.2)$$

Tūrio dalies lygtis gali būti išspręsta netiesiogine ir tiesiogine laiko diskretizacija.

1.2.5. Numanoma schema

ANSYS FLUENT standartinės baigtinių - skirtumų interpoliavimo schemos yra naudojamos tūrio dalims, kurios buvo apskaičiuotos praėjusiam žingsnyje.

$$\frac{\alpha_q^{n+1} \rho_q^{n+1} - \alpha_q^n \rho_q^n}{\Delta t} V + \sum_f (\rho_q U_f^n \alpha_{q,f}^n) = \left[\sum_{p=1}^n (m_{pq} - m_{qp}) + S_{\alpha_q} \right] V; \quad (1.3)$$

Čia, $n+1$ = naujo (esamo) laiko žingsnio indeksas;

n = praėjusio laiko žingsnio indeksas;

$\alpha_{q,f}$ = nominali q^{th} tūrio dalis, apskaičiuota pagal pirmosios ar antrosios eilės QUICK, modifikuotą HRIC arba CICSAM schemas.;

V = langelio reikšmė;

U_f = tūrio srautas per paviršių, remiantis normaliu greičiu;

Ši formuluotė nereikalauja kartotinio lygties sprendimo kiekviename laiko etape, kas yra reikalinga prognozuojamai schemai.

1.2.6. Medžiagų savybės

Lygtyse atsirandančios savybės nustatomos pagal komponentų fazes kiekviename kontroliniame tūryje. Dviejų fazių sistemoje, pavyzdžiui, jei fazes vaizduoja 1 ir 2 indeksai ir jei stebima antrosios iš jų tūrio dalis, kiekvienos vietos tankis nurodomas:

$$\rho = \alpha_2 \rho_2 + (1 - \alpha_2) \rho_1; \quad (1.4)$$

Iš esmės, n fazės sistemai, tūrio dalies tankio vidurkis įvardijamas žemiau esančio forma:

$$\rho = \sum \alpha_q \rho_q; \quad (1.5)$$

1.2.7. Momentų lygtis

Visoje srityje išspręsta vieno impulso lygtis, o gautas greičio laukelis pasidalijamas tarp fazių. Žemiau pavaizduota pagreičio lygtis priklauso nuo visų fazių tūrio dalių, atsižvelgiant į ρ ir μ savybes.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla * (\rho v) = -\nabla p + \nabla * [\mu(\nabla v + \nabla v^T)] + \rho g + F; \quad (1.6)$$

Vienas besidalinančių laukų aproksimavimo apribojimas yra tas, kad tais atvejais, kai tarp fazių yra dideli greičio skirtumai, gali būti neigiamai paveiktas apskaičiuoto ribinio greičio tikslumas.

1.2.8. Energijos lygtis

Energijos lygtis, taip pat paskirstyta tarp fazių, parodyta žemiau:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla * (v(\rho E + p)) = \nabla * (k_{eff} \nabla T) + S_h; \quad (1.7)$$

VOF modelis energiją, E ir temperatūrą, T , laiko kintamaisiais pagal masę:

$$E = \frac{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q E_q}{\sum_{q=1}^n \alpha_q \rho_q}; \quad (1.8)$$

kur E_q kiekvienai fazei priklauso nuo tos fazės savitosios šilumos ir bendros temperatūros. Savybės ρ ir k_{eff} (efektyvusis šilumos laidumas) dalijamos fazėmis. Šaltinio terminas S_h apima radiacijos, taip pat visų kitų tūrinių šilumos šaltinių poveikį.

Greičio laukelyje, temperatūros artimos ribinei tikslumas yra ribotas tais atvejais, kai tarp fazių yra dideli temperatūrų skirtumai. Tokios problemos iškyla ir tais atvejais, kai savybės skiriasi keliais dydžiais. Pvz., Jei modelis apima skystą metalą kartu su oru, medžiagų laidumas gali skirtis net keturis kartus. Tokie dideli savybių neatitikimai lemia lygčių rinkinius su anizotropiniais koeficientais, o tai savo ruožtu gali sukelti konvergencijos ir tikslumo apribojimus.

1.2.9. Papildomos skaliarinės lygtys

Atsižvelgiant į problemos apibrėžimą, į sprendimą gali būti įtrauktos papildomos skaliarinės lygtys. Turbulencijos dydžių atveju išsprendžiamas vienas transportavimo lygčių rinkinys, o turbulencijos kintamieji (pvz. k ir ϵ arba Reynoldso įtempiai) yra dalijami fazėmis visame lauke.

1.2.10. Paviršiaus įtempimas ir sukibimas su siena

Į VOF modelį taip pat gali būti įtrauktas paviršiaus įtempimo poveikis išilgai kiekvienos fazės poros sąsajos. Modelį galima padidinti papildomai nurodant kontaktinius kampus tarp fazių ir sienų. Paviršiaus įtempimo koeficientą galima nurodyti kaip konstantą, kaip temperatūros funkciją arba per UDF. Į sprendimą bus įtrauktos papildomos tangentinių įtempių sąvokos (sukeliančios vadinamąją Marangoni konvekciją), atsirandančios dėl paviršiaus įtempio koeficiento kitimo. Kintamo paviršiaus įtempio koeficiento poveikis paprastai yra svarbus tik esant nulinės arba beveik nulinės gravitacijos sąlygoms.

1.2.11. Paviršiaus įtempimas

Paviršiaus įtempimas atsiranda dėl traukos jėgų tarp skysčio molekulių. Pavyzdžiui, oro burbuliukai vandenyje. Burbule grynoji jėga yra lygi nuliui. Tačiau paviršiuje bendroji jėga yra nukreipta į vidų, o bendras jėgos komponentų poveikis visame sferiniame paviršiuje turi priversti paviršių susitraukti ir taip padidinti slėgį igaubtoje paviršiaus pusėje. Paviršiaus įtempimas yra jėga, veikianti tik paviršių, reikalinga palaikyti pusiausvyrą tokiais atvejais. Tai veikia tam, kad subalansuotų į vidų veikiančią tarpmolekulinę jėgą ir radialinę išorinio slėgio gradiento jėgą visame paviršiuje. Regionuose, kur du skysčiai yra atskirti, tačiau vienas iš jų nėra sferinių burbuliukų pavidalu, paviršiaus įtempis sumažina laisvosios energijos kiekį sumažindamas sąveikos plotą.

ANSYS FLUENT paviršiaus įtempimo modelis yra ištisinės paviršiaus jėgos modelis, kurį pasiūlė Brackbill ir kt.. Taikant šį modelį, pridedant paviršiaus įtempį prie VOF skaičiavimo, impulso lygtyje gaunamas šaltinio terminas. Norėdami suprasti šaltinio termino kilmę, reikia atsižvelgti į ypatingą atvejį, kai paviršiaus įtempis yra pastovus visame paviršiuje ir kai atsižvelgiama tik į normalines veikiančias jėgas. Galima įrodyti, kad slėgio kritimas visame paviršiuje priklauso nuo paviršiaus tempimo koeficiento σ ir paviršiaus kreivumo, išmatuoto dviem spinduliais stačiakampėmis kryptimis, $R1$ ir $R2$:

$$p_2 - p_1 = \sigma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right); \quad (1.9)$$

Čia p_1 ir p_2 yra slėgiai dviejuose skirtinguose skysčiuose skirtingose sprendimo modelio pusėse.

ANSYS FLUENT naudojama CSF modelio formuluotė, kai paviršiaus kreivė apskaičiuojama pagal vietinius paviršiaus nuokrypius nuo normalės. Čia n yra paviršiaus normalė, apibrėžiama kaip α_q gradientas, q^{th} fazės tūrio dalis.

$$n = \nabla \alpha_q; \quad (1.10)$$

Kreivė k apibrėžiama normaliojo vieneto skirtumu, n ;

$$k = \nabla * n; \quad (1.11)$$

Kur

$$\hat{n} = \frac{n}{|n|}; \quad (1.12)$$

Paviršiaus įtempimą galima apibūdinti atsižvelgiant į slėgio šuolį paviršiuje. Jėga paviršiuje gali būti išreikšta tūrio jėga, naudojant divergencijos teoremą. Būtent ši tūrio jėga yra pagrindinis terminas, pridedamas prie impulsų lygties. Jis turi tokią formą:

$$F_{vol} = \sum_{\text{pairs } ij, i < j} \sigma_{ij} \frac{\alpha_i \rho_i k_j \nabla a_j + \alpha_j \rho_j k_i \nabla a_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)}; \quad (1.13)$$

Ši išraiška leidžia sklandžiai išdėstyti jėgas šalia vietų, kuriose yra daugiau nei dvi fazės. Jei langelyje yra tik dvi fazės, , tada $k_i = -k_j$ ir $\nabla a_i = -\nabla a_j$. Aukščiau esanti lygtis susiprastina į:

$$F_{vol} = \sigma_{ij} \frac{\rho k_i \nabla a_i}{\frac{1}{2}(\rho_i + \rho_j)}; \quad (1.14)$$

1.2.12. Kai paviršiaus įtempimo poveikis yra svarbus

Paviršiaus įtempimo efekto svarba nustatoma remiantis dviejų bedimensių dydžių verte: Reinoldso skaičiumi Re ir kapiliariniu skaičiumi Ca ; arba Reynoldso numeris Re ir Weberio skaičius, We . Jeigu $Re < 1$, kapiliarinis skaičius:

$$Ca = \frac{\mu U}{\sigma}; \quad (1.15)$$

Jeigu $Re > 1$, dominantis yra Weberio skaičius:

$$We = \frac{\rho L U^2}{\sigma}; \quad (1.16)$$

čia U yra laisvo srauto greitis. Paviršiaus įtempimo efekto galima nepaisyti, jei $Ca > 1$ arba $We > 1$.

1.2.13. Sukibimas su siena

VOF modelyje taip pat yra galimybė nurodyti sienų sukibimo kampą kartu su paviršiaus įtempimo modeliu. Modelis yra paimtas iš Brackbill ir kt. Atliktų darbų. Užuoat nustačius šią ribinę sąlygą prie pačios sienos, naudojamas kontaktinis kampas, kurį, kaip manoma, skystis sukuria su siena, naudojamas normalizuoti paviršių vietose prie sienos. Ši vadinamoji dinaminė ribinė sąlyga lemia paviršiaus, esančio šalia sienos, kreivumą.

Jei $\theta_{r\sigma}$ yra kontakto kampas prie sienos, tada normalus paviršiaus plotas šalia sienos esančioje vietoje yra:

$$\hat{n} = \hat{n}_{r\sigma} \cos\theta_{r\sigma} + \hat{t}_{r\sigma} \sin\theta_{r\sigma}; \quad (1.17)$$

kur $\hat{n}_{r\sigma}$ ir $\hat{t}_{r\sigma}$ yra atitinkamai normaliniai ir tangentiniai. Šio kontaktinio kampo derinys su apskaičiuotu paviršiaus normalės elementu, nutolusiu nuo sienos, lemia vietinį paviršiaus kreivumą, ir šis kreivumas naudojamas kūno jėgos reikšmei koreguoti apskaičiuojant paviršiaus įtempį.

1.2.14. Atviros kanalo bangos ribinės sąlygos

Atviro kanalo bangos ribos sąlyga leidžia imituoti bangų plitimą, kuris yra naudingas jūrų pramonėje. Tai yra ribinė sąlyga ir taikoma VOF modelio greičio sukūrimui. Krintančios bangos profilį galima apibūdinti taip:

$$\zeta = A \cos(k_x x + k_y y - \omega_e t + \epsilon); \quad (1.18)$$

kur z yra bangos aukštis, A yra bangos amplitudė, ϵ yra fazių skirtumas, t yra laikas, o k_x ir k_y yra bangų skaičiai x ir y kryptimis, atitinkamai, kad $k_x = k \cos\theta$ ir $k_y = k \sin\theta$.

Bangos numeris k apibrėžiamas kaip:

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}; \quad (1.19)$$

kur λ yra bangos ilgis ir efektyvusis bangos dažnis ω_e yra:

$$\omega_e = \omega + kU; \quad (1.20)$$

U yra vienodas krintančios bangos greitis, o ω bangos dažnis, kuris apibrėžiamas kaip:

$$\omega = \sqrt{gk \tanh(kh)}; \quad (1.21)$$

kur h yra skysčio aukštis, o g yra gravitacijos dydis.

Krintančios bangos ribinės būklės greičio komponentai gali būti apibūdinami sekliomis bangomis ir trumpomis gravitacijos bangomis.

Sekliosios bangos yra apibrėžiamos kaip:

$$\left(\frac{u}{v}\right) = \frac{gkA}{w} \frac{\cosh [k(z+h)]}{\cosh (kh)} \left(\frac{\cos \theta}{\sin \theta}\right) \cos(k_x x + k_y y - \omega_e t + \epsilon); \quad (1.22)$$

$$w = \frac{gkA \sinh [k(z+h)]}{w \cosh (kh)} \sin(k_x x + k_y y - \omega_e t + \epsilon); \quad (1.23)$$

Trumpos gravitacijos bangos yra apibūdinamos kaip:

$$\left(\frac{u}{v}\right) = \frac{gkA}{w} e^{kz} \left(\frac{\cos \theta}{\sin \theta}\right) \cos(k_x x + k_y y - \omega_e t + \epsilon); \quad (1.24)$$

$$w = \frac{gkA}{w} \sin(k_x x + k_y y - \omega_e t + \epsilon); \quad (1.25)$$

kur u , v ir w yra greičio komponentai. Greičio komponentų krypčių specifikacijos yra tokios, kad u yra pagrįstas srauto kryptimi, nurodyta bangos greičio specifikacijos metode, w yra paremta gravitacijos kryptimi, o v yra statmena srauto kryptimi gravitacijos kryptimui.

1.3. Skysčio struktūros sąveika (Fluid – Structure Interaction (FSI))

Skysčio – struktūros sąveika (FSI) yra tam tikros judančios, kietos ar deformuojamos struktūros sąveika su vidiniu ar aplinkiniu skysčio srautu. Skysčio – struktūros sąveika gali būti stabili arba dinamiška. Vykstant dinamiškai sąveikai, kietoje struktūroje skysčio sukelta deformacija verčia ją judėti tol kol deformacijos šaltinis susilpnėja, struktūra grįžta į buvusią būseną ir procesas kartojasi.

Šio (FSI) tyrimo atlikimas remiasi daugiau nei viena fizikine analize siekiant išsiaiškinti kaip sąveikauja skysčiai su struktūromis. Dėl skysčio srauto veikiančio konstrukciją, ji yra apkraunama slėgiu ir (arba) šiluma. Šios atsiradusios apkrovos gali sukelti pakankamai didelę konstrukcijos deformaciją, kuriai esant pasikeistų pats skysčio srautas. Nepageidaujamas poveikis modeliuojamam kūnui gali padidėti, nes padidėja skysčio - struktūros sąveika. Norint giliau suvokti su modeliuojamu kūnu susijusius reiškinius, taip pat užtikrinti saugumą, patikimumą ir ilgaamžiškumą yra naudojamas skysčio – struktūros sąveikos modeliavimas.

Siekiant išlaikyti aukštą patikimumo lygį programinė įranga turi daugybę analizavimo būdų skirtų išspręsti visas skysčio - struktūros sąveikos problemas su kuriomis galima susidurti. Ansys CFD gali visiškai išspręsti paprastas skysčio – struktūros sąveikos problemas. Tai yra žinoma kaip standaus kūno judėjimas, kuro pavyzdys gali būti sparnuotė, besisukanti maišymo rezervuare.

Didėjant skysčio – struktūros sąveikai, problemos sprendimui yra reikalingas detalesnis įvertinimas, šiuo atveju „Ansys“ turi automatizuotą, lengvai naudojamą algoritmą, vadinamą vienpusiu sujungimu. Vienpusis sujungimas sprendžia pradinį CFD arba „Ansys“ Mechanical modelį ir automatiškai perkelia bei pateikia duomenis kitoje sistemoje. To pavyzdys galėtų būti skysčio

srauto simuliacija aplink kūginį srauto matuoklį ir automatinis šių duomenų perdavimas tam, kad būtų galima apskaičiuoti gaunamą konstrukcijos atsaką į veikiančius veiksnius.

Norint išspręsti sudėtingesnes ir glaudžiai susietas skysčio – struktūros sąveikos problemas, galima naudoti sistemų sujungimą tam, kad atlikti dvikryptę sujungtą FSI simuliaciją. Skysčių ir struktūros simuliacijos yra paruošiamos ir sprendžiamos tuo pačiu metu. Skaičiavimo metu, duomenys automatiškai perduodami tarp dviejų sprendimų siekiant gauti patikimus ir tikslius rezultatus. To pavyzdys galėtų būti srauto aplink standų lėktuvo sparną apskaičiavimas ir slėgio apkrovų perkėlimas, siekiant sužinoti konstrukcijos deformacijas. Struktūrinė deformacija perkeliama atgal į CFD modeliavimą, vėl apskaičiuojamas srautas, ir šis procesas kartojasi.

Skysčio – struktūros sąveika yra esminis dalykas kuriant daugelį inžinerinių sistemų, pvz. orlaivius, erdvėlaivius, variklius ir tiltus. Neatsižvelgimas į dinamiškos sąveikos padarinius gali būti katastrofiškas, ypač konstrukcijose, kuriuos yra surenkamos naudojant nuovargiui jautrias medžiagas. „Tacoma Narrows“ tiltas (1940) yra turbūt vienas liūdniausių didelio masto gedimų pavyzdžių. Orlaivio sparnai ir turbinos mentės taip pat gali sulūžti dėl FSI svyravimų. Analizuojant didelių arterijų ir dirbtinių širdies vožtuvų aneurizmus, reikia atsižvelgti į skysčio – struktūros sąveiką. Muzikinių instrumentų liežuvėliai iš tikrųjų skleidžia garsą, nes lygčių sistema, reguliuojanti liežuvėlio dinamiką, turi dinamiškus sprendimus. Dviejų taktų varikliuose ir kompresoriuose naudojamų lapelinių vožtuvų dinamiką reglamentuoja FSI. Skysčio – struktūros sąveika taip pat vyksta judančiose talpyklose, kur skysčio virpesiai dėl konteinerio judesio sukelia didelę jėgą ir momentus veikiančius konteinerio struktūrą, kurie labai neigiamai veikia konteinerio transportavimo sistemos stabilumą.

Skysčio – struktūros sąveikos ir kitos problemos, kuriose veikia daugiau nei vienas fizikinis reiškinys, dažniausiai yra per daug sudėtingos, kad jas būtų galima išspręsti analitiniu būdu, todėl jos turi būti analizuojamos eksperimentais arba skaitmeniniu modeliavimu. Skaičiuojamosios skysčių dinamikos ir skaičiuojamosios struktūrinės dinamikos tyrimai vis dar tęsiasi, tačiau šiais laikais ištobulintos simuliacijos leidžia skaitmeniniu būdu modeliuoti skysčių ir struktūrų sąveiką. Yra du pagrindiniai skysčių ir struktūros sąveikos problemų modeliavimo metodai:

- Vienalytis metodas: srautai ir konstrukcijos poslinkiai nuo kurių priklauso srauto tėkmė, yra sprendžiami vienu metu, naudojant vieną sprendinį.
- Padalintasis metodas: lygtys, reguliuojančios srautą ir konstrukcijos poslinkius, yra sprendžiamos atskirai, dviem skirtingais sprendiniais.

Vienalyčiam metodui reikalingas kodas, sukurtas šiam konkrečiam fizinių problemų deriniui, tuo tarpu padalintasis metodas išsaugo programinės įrangos moduliškumą, nes esamas srauto ir struktūrinis sprendimas yra sujungiami. Be to, padalintasis metodas palengvina srauto lygčių ir struktūrinių lygčių sprendimą skirtingais, galbūt efektyvesniais metodais, kurie buvo sukurti specialiai srautų arba struktūrinėms lygtims. Kita vertus, padalintame metode reikalingas stabilus ir tikslaus sprendimo algoritmo vystymas. Apibendrinant, padalintasis sprendimas leidžia pakartotinai naudoti esamą programinę įrangą, kas yra malonus pranašumas. Tačiau reikia atsižvelgti į sprendimo metodo stabilumą.

FSI problemoms spręsti gali būti naudojamas Niutono – Raphsono metodas arba kitokia fiksuoto taško iteracija. Metodai, pagrįsti Niutono – Raphsono iteracija, naudojami virnalyčiame, tiek padalijamajame metode. Šie metodai Niutono - Raphsono metodu išsprendžia netiesines srauto ir struktūrinės lygtis visoje skysčio ir kietojoje srityje.

Nors Niutono – Raphsono metodai išsprendžia srauto ir struktūros būklės problemą visoje skystoje ir kietojoje srityje, taip pat įmanoma FSI problemą reformuluoti kaip sistemą, kurios modelio vietoje nežinomieji yra tik laisvės laipsniai. Šis domeno išskaidymas sutelkia FSI klaidos problemą į su sprendimu susijusį poskyrį. Taigi FSI problemą galima apibūdinti kaip šaknies radimo problemą arba fiksuoto taško problemą, o sprendimo padėtis yra nežinoma.

1.4. Cisternų apžvalga

1.4.1. Skystiems kroviniams

Jeigu reikia saugiai, patikimai ir ekonomiškai gabenti prekes iš vienos vietos į kitą, sunkvežimių transportą sunku įveikti. Tiek sunku, kad prekių gabenimas sunkvežimiais vis dar yra plačiausiai naudojama transporto rūšis Europoje. Naudoti geležinkelius yra populiarus pasirinkimas gabenant labai didelius krovinius dideliais atstumais, tačiau sunkvežimį sunku įveikt, kai kalbama apie didžiąją dalį prekių, kurias reikia gabenti visoje šalyje.

Kelių transporto rūšis užima pirmąją vietą Europos transporto rinkoje. Sunkvežimių priekabos puikiai tinka aptarnauti nuo durų iki durų, taip pat yra žinomos dėl patikimumo, lankstumo, greičio, mažesnės žalos tikimybės ir sąlyginai nedidelių išlaidų. Atsižvelgiant į tai, šia transporto rūšimi transportuojama apie 75 % krovinų apimtys (t/km) ES. Kitos palankios kelių transporto savybės yra galimybė vežti nedideles siuntas palyginti nedideliu atstumu ir patikimas aukštos vertės prekių gabenimas. Krovinų gabenimo keliais pobūdis, be vietinės infrastruktūros išsivystymo laipsnio, priklauso nuo atstumo, kuriuo prekės vežamos keliais, nuo atskiros siuntos svorio ir tūrio bei gabenamų prekių rūšies. Galima važiuoti nedideliais atstumais ir nedideliais kroviniais – furgonu ar pikapu. Dideliems kroviniams yra tinkamesnis sunkvežimis, net jei krovinys yra mažesnis nei pilnas.

Autocisternos, suprojektuotos vežti vieną krovinį, turi vieną skyrių, o tos, kurios vežamos keliais kroviniais, yra vidinės pertvaros jų cisternose. Skiriamieji cisternų priekabų faktoriai yra cisternos forma, krovinio tipas, kurį gabena priekaba, ir dydis. Kiti skiriamieji veiksniai yra šaldymo galimybė, slėgio galimybė ir atsparumas rūgštims. Kai kurie modeliai yra specialiai sukurti laikantis šalies taisyklių dėl suskystintų krovinų gabenimo. Taigi priekabų struktūra įvairiose šalyse skirsis. Tačiau priekabų funkcionalumas yra tas pats, nepriklausomai nuo gamintojo.

Pagrindinis gabenimo sunkvežimiais pranašumas yra tas, kad sunkvežimis iš taško A į tašką B gali patekti greičiau nei bet kurios kitos rūšies transporto priemonė. Taip yra todėl, kad sunkvežimis gali važiuoti tiesiausiu įmanomu maršrutu, nereikalaudamas tvarkaraščių. Sunkvežimiai yra tvirti ir patikimi bei gali lengvai važiuoti visais keliais, nepaisant oro sąlygų, įskaitant sniegą, - tai yra labai svarbu atsižvelgiant į tai, jog kelionės taške A klimatas gali būti visiškai kitoks nei galutiniame kelionės taške B. Nepaisant atstumo, mažų krovinų gabenimas sunkvežimiu yra labai ekonomiškas, ekspertai vairuotojai gali greitai pakrauti ir iškrauti. GPS sekimas ir kontroliuojamos temperatūros skyriai reiškia, kad sunkvežimiai yra universalūs ir gali gabenti įvairias prekes.

Visam šiam transportavimui yra naudojamos kelių tipų transportavimo priemonės:

1. Tentiniai sąstatai;
2. Platforminiai sąstatai;
3. Kontroliuojamos temperatūros sąstatai;
4. Kietašoniai sąstatai;
5. Autocisternų sąstatai.

Pastarojo tipo talpyklose transportuojami itin smulkūs nesupakuoti kroviniai – cukrus, grūdai, skysčiai ir t.t.. Autocisternos labiausiai išsiskiria neįprasta forma. Cisternas sudaro cilindro formos bakas, horizontaliai gulintis ant transporto priemonės rėmo. Mažiau įprastos savybės yra rezervuaro atitikimas maisto transportavimui keliamiems reikalavimams, šaldymo galimybės, atsparumas rūgštims ir atsparumas slėgiui. Yra daugybė autocisternų, kurios pritaikytos skirtingomis transporto priemonės gabenamų krovinių rūšims. Šias transporto priemones sunku vairuoti dėl aukšto masės centro. Tokio tipo kroviniams reikalingas įrodymas, jog talpa atitinka ADR 3 klasės reikalavimus. Plačiau tai yra analizuojam šiame darbe. Lietuvoje tokių krovinių transportavimu užsiima tokios įmonės kaip „Licatrans“, „Hegelmann Lithuania“, „Transadria“. Tokių autocisternų gamyba rūpinasi „DAN-LIT“.

1.4.2. Maistiniams kroviniams

Autocisternos yra naudojamos maistui skirtiems arba ne maisto klasės skysčiams vežti geriausiomis sąlygomis. Maistinės autocisternos leidžia gabenti maistinius skysčius. Tai gali būti sultys, vynas, pienas, aliejus ir dar daugiau. Kadangi produktai yra greitai gendantys ir jautrūs aplinkai, šių gaminių kelionės metu reikalinga optimali priežiūra.

Siekdama reguliuoti transportavimo procesą, Europos Sąjunga nustatė maisto saugos standartus, kurių turi laikytis visi, susiję su produktų gamyba, gabenimu ir paskirstymu. Tarp šių priemonių yra nurodytos normos, susijusios su autocisternos savybėmis.

Maistinės autocisternos reikalavimai:

- Transporto priemonėje turi būti įdiegta GPS sistema, leidžianti bet kuriuo metu stebėti sunkvežimio buvimo vietą;
- Autocisternų gamybos medžiaga yra labai svarbi. Pagal ES ATP standartus ji privalo būti pagaminta iš nerūdijančio plieno bei būti izoterminė;
- Maistinė cisterna turi būti iškraunama elektriniu siurbliu ir naudojant antibakterinius filtrus;
- Temperatūra turi būti kontroliuojama analoginiu termometru. Taip užtikrinama, kad skysčiai visada bus laikomi geriausiomis sąlygomis;
- Svarbu priminti, kad higiena ir valymo procesas turi būti nepriekaištingi. Štai kodėl autocisternos kruopščiai išvalomos ir išgarinamos, kad būtų išvengta pavojaus sveikatai. Pagal gabenamą produktą naudojamos skirtingos valymo priemonės;
- Maisto klasės autocisternos, siekiant efektyviausio proceso, dažnai yra atskiriamos skirtinguose skyriuose.

Žemiau yra pateikiama viena iš cisternų ryšių – maisto produktų autocisternos, tokių kaip pienas, sultys, vanduo, vyno medžiagos ir kt. transportavimui. Montuojamos jos ant atitinkamai parinktų krovininių automobilių, priekabų ir puspriekabių važiuklių. Medžiaga, iš kurios gaminami vidiniai rezervuarai, išoriniai apvalkalai ir tvirtinimo diržai – tai rūgštims atsparus plienas markės AISI 304. Cisternų laikantieji elementai (rėmas, špantai) gaminami iš cinkuoto plieno. [3]

Plienas AISI 304:

304 nerūdijantis plienas naudojamas įvairiems buitiniams ir pramoniniams tikslams, tokiems kaip maisto tvarkymo ir perdirbimo įranga, varžtai, mašinų dalys ir automobilių kolektoriai. 304 nerūdijantis plienas taip pat naudojamas architektūroje išoriniams akcentams, pavyzdžiui, vandens ir ugnies, akcentams. Tai taip pat yra įprasta garintuvų ričių medžiaga.

Cisternos bendroji charakteristika [3]:

- Talpa: iki 26 000 litrų;
- Forma:
 - Skrynios;
 - Elipsės;
 - Apskrita;
- Kamerų skaičius: Standartiškai 3, tačiau gali varijuoti;
- Gaminama iš rūgštims atsparaus plieno;
- Kaip izoliacinė medžiaga naudojama polistireno putplastis arba pliuretano putos;
- Montuojama CIP sistema – centrinis atskirų cisternos kamerų plovimas;
- Montavimas galimas ant daugelio tipų priekabų ir krovininių automobilių važiuklių.
- Išorinis paviršius apdailintas medžio imitacija;
- ATP sertifikatas (atitikties sutartis dėl greitai gendančių maisto produktų tarptautinio gabenimo ir specialistų tokiems gabenimams skirtų transporto priemonių liudijimas);
- Šilumos praskverbimo koeficientas $k = 0.68$.

Šiuo atveju tokios autocisternos yra skirtos transportuoti pienui. Jos gali būti montuojamos tiek ant puspriekabių, tiek ant priekabų ar paties krovininio automobilio važiuklių. Keletas skirtingo stiliaus pavyzdžių pateikiama 1.3 pav.



A

B

C

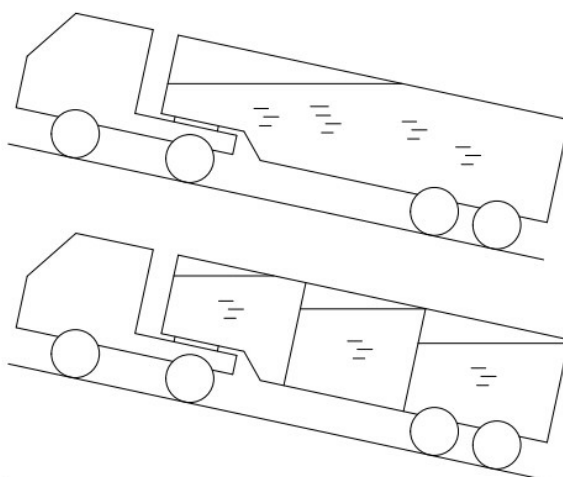
1.3 pav. Skirtingos pieno transportavimo priemonės. A – Cisternos sumontuotos tiek ant krovininio automobilio, tiek ant priekabos rėmo; B – Cisterna sumontuota ant krovininio automobilio rėmo; C – Cisterna sumontuota ant puspriekabės rėmo [4]

Šios priemonės prisideda prie maisto produktų saugos ir kokybės – sąlygų, kurias gali tenkinti tik kokybiškos maisto klasės cisternos. Tokiu būdu galima apsaugoti nuo visuomenės sveikatos rizikos, jei laikomasi maisto produktų cisternų higienos taisyklių, kurias užtikrins šiuolaikiškos valymo ir garinimo mašinos.

1.4.3. Naftos produktų kroviniams

Viena iš įprastų cisternų rūšių, kurias galima dažnai sutikti kelyje, yra skirta naftos produktams. Cisterna naudojama benzinui, dyzelinui ir benzinui gabenti. Jis taip pat naudojamas tam tikrų rūšių degiam ir skystam skysčiui gabenti. Dažnu atveju priekaba ar puspriekabė gali turėti keletą skirtingų skyrių todėl gali vienu metu gabenti keleto skirtingų rūšių skysčių. Tokiu būdu transportuojant galima taupyti degalus, kadangi yra sumažinamas kelionių skaičius. Kiekvieno skysčio gabenimas atskira priekaba ar puspriekabe yra brangesnis ir ne visada efektyvus palyginti su priekabomis turinčiomis keletą skirtingų talpų.

Tokia konstrukcija taip pat padidina stabilumą įkalnėje (1.4 pav.). Kai sunkvežimis važiuoja šlaitu skystis laisvai juda visomis kryptimis. Jeigu skystį gabenanti cisterna yra didelio tūrio, toks skysčio judėjimas sukelia didelius masės centro pozicijos pakitimus. Tai stipriai paveikia ašių apkrovas ir turi įtaką tiek sunkvežimio, tiek pačios puspriekabės stabilumui. Dėl šio nestabilumo puspriekabė gali apvirsti, tapti sunkiai stabdoma ar nenuspėjama. Naudojant keleto skyrių konstrukcijos puspriekabę, šios ašies apkrovos pokyčiai sumažėja ir puspriekabė tampa stabilesnė.



1.4 pav. Vilkiko, su skirtingų konstrukcijų puspriekabėmis, kilimas į kalną [5]

1.4 pav. aiškiai matoma, jog transportuojamas skystis, esant keletui transportavimo kamerų, cisternoje pasiskirsto tolygiau nei cisternoje turinčioje tik 1 kamerą

Autocisternos gali būti gaminamos keleto skirtingų formų bei skirtingų medžiagų. Viskas priklauso nuo cisternos paskirties. Žemiau pateikiama informacijos apie medžiagas, jų teigiamas bei neigiamas savybes taip pat formų ypatybes.

Anglinis plienas bei nerūdijantis plienas

Pagrindiniai šių medžiagų privalumai juos naudojant cisternų gamyboje:

- Plieno kaina yra konkurencinga, todėl plienas yra populiarus besivystančiose šalyse;
- Plienas yra labai stiprus ir nėra lengvai pažeidžiamas;
- Anglinį plieną lengva suvirinti;
- Plienas yra mažiau linkęs įtrūkti, kas yra būdinga aliuminiui;
- Nerūdijantis plienas yra atsparus rūdimis, gali būti naudojamas gabenti maistą;
- Pigesnis už aliuminį.

Pagrindiniai šių medžiagų trūkumai:

- Anglinis plienas reikalauja cinkavimo arba paviršiaus dažymo tam, kad būtų išvengta rūdžių;
- Jų tankis didesnis nei aliuminio lydinio.

Aliuminio lydinys

Aliuminio lydinio naudojimo cisternose privalumai yra šie:

- Jis yra lengvesnis nei plienas;
- Aliuminio cisternos priekaba gali gabenti daugiau skysčio;
- Tokios puspriekabės yra saugesnės;
- Medžiaga yra atspari rūdimis, todėl transportavimo metu ji neužteršia skysčio.

Vieni iš aliuminio trūkumų:

- Aliuminio stiprumas yra beveik per pus mažesnis nei plieno;
- Jis yra stipriai linkęs trūkinėti esant pasikartojantiems įtempimams;
- Aliuminio plokščių suvirinimas yra sudėtingas;
- Jis yra brangesnis nei plienas.

Kaip dar vieną netiesioginį tokios cisternos privalumą galima įvardinti jos mažesnę masę palyginti su plienine cisterna. Tai leidžia sutaupyti vilkikui degalų transportuojant tą patį kiekį skysčio arba tiesiog transportuoti didesnę kiekį skysčio esant tomis pačiomis sąnaudomis, kadangi puspriekabės masė yra mažesnė, todėl jos krova tampa didesnė.

Medžiagos rūšis, naudojama cisternoje, lemia jos kainą ir pakrovimo tūrį. Aliuminio priekaba gali būti lengva ir atspari rūdimis, tačiau jų stiprumas yra mažas, o kaina – aukšta. Renkantis tarp dviejų medžiagų, reikia atsižvelgti į galutinį priekabos naudojimą ir savo biudžetą. Plienas gali būti geriausias pasirinkimas, jei reikalinga mažos kainos didelės talpos cisterna. Tai, kad aliuminis yra lengvesnis ir mažesnio stiprumo nei plienas, dar nereiškia, kad aliuminio priekabos yra silpnos.

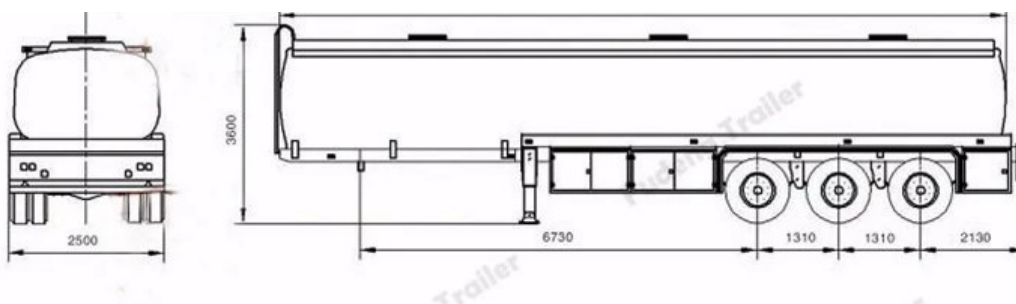
Puspriekabės cisternos skirtos transportuoti degalus ir kitus naftos produktus (1.5 pav.). Tokios cisternos specifikacijos pateikiamos žemiau (1 ir 2 lentelės):

1 lentelė. Degalams vežti skirtos puspriekabės specifikacijos. [5]

Paskirtis:	Puspriekabė degalams	Kilmės šalis:	Kinija
Gamintojas:	„Fudeng heavy fuel oil truck tanker“	Modelis:	FD0125h
Dydis:	Kintamas	Tipas:	Puspriekabė
Medžiaga:	Plienas	Sertifikavimas:	CE
OEM nr.:	„Heavy fuel oil truck tanker 06“	Maksimali krova:	45 – 100 t.
Ašių skaičius:	3	Padangos:	12R22.5 / 11.00R20
Spalva:	Gali būti įvairi	Funkcija:	Degalų cisterna
Ašių gamintojas:	FUWA	Kaina:	8 000 – 24 000\$



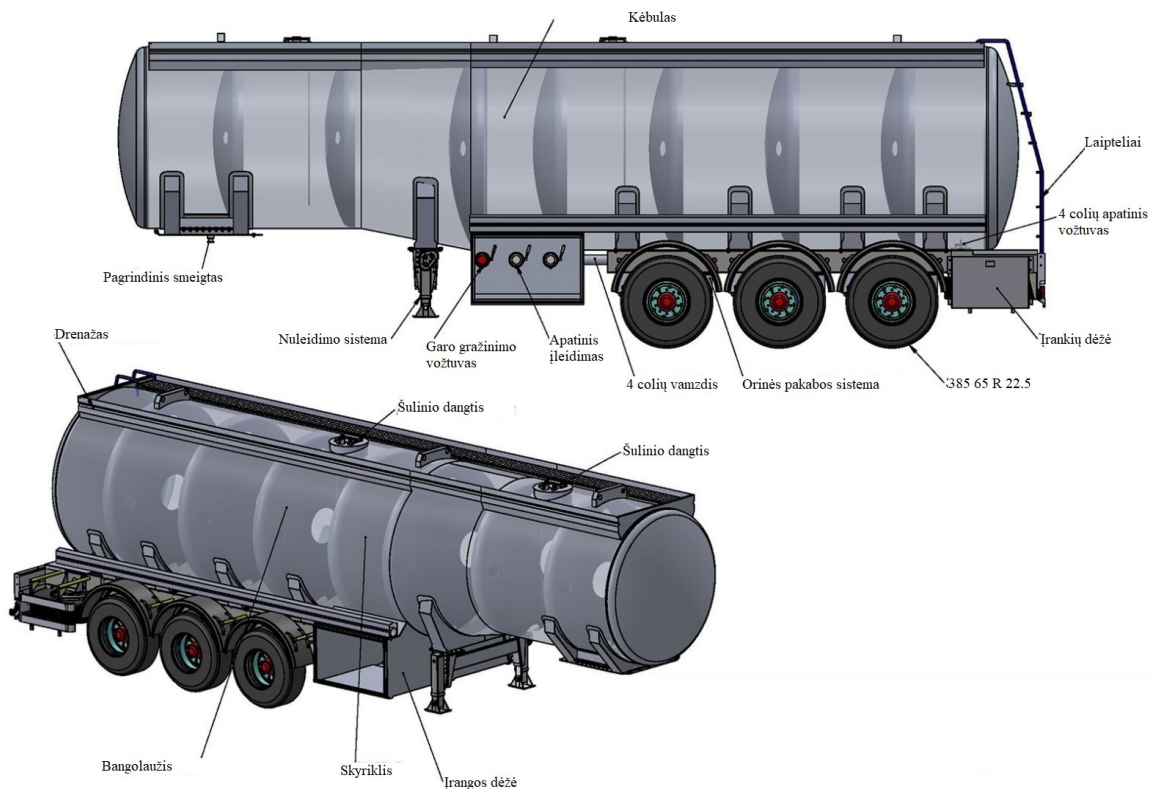
1.5 pav. Degalams skirtos vežti puspriekabės vaizdas iš šono [4]



1.6 pav. Degalams skirtos vežti puspriekabės matmenys [4]

2 lentelė. Degalams skirtos vežti cisternos matmenys. [4]

Forma: Apvali arba kvadratinė;
Matmenys: 12 000mm. x 2 490 mm. x 3 990 mm. arba priklausomai nuo poreikių;
Tuščios puspriekabės masė: Apie 6 000 kg. – 12 000 kg.;
Gamyboje panaudotos medžiagos: 4 – 5 mm. / Q235 anglinis plienas / Q345B / aliuminis / nerūdijantis plienas;
Įleidimo dangtis: aliuminis, 500 mm.;
Pakaba: mechaninė pakaba / vokiško arba amerikietiško tipo / pneumatinė pakaba;
Padangos: 12.00R22.5/315 80R22.5/11.00R20/12.00R20. Gamintojas pasirinktinis.



1.7 pav. Cisternos, turinčios 3 ašis, konstrukcija. Su sumontuotomis pertvaromis [6]

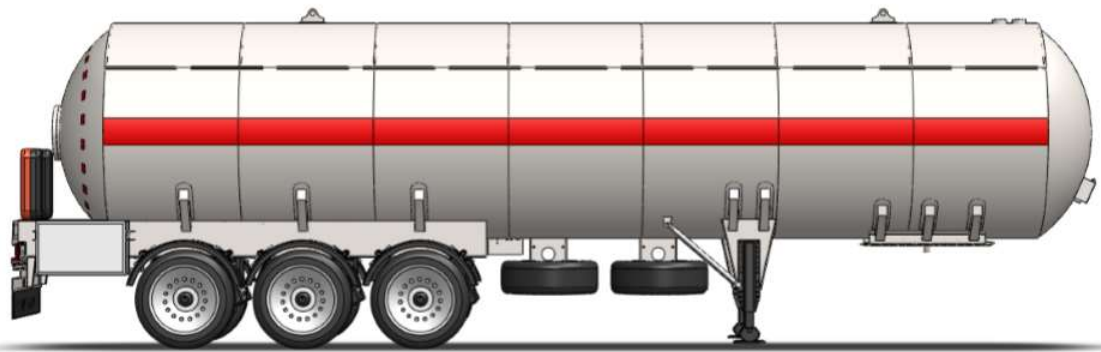
Kas yra bangolaužis ir kam jis reikalingas (1.7 pav.)?

Cisternos viduje sumontuota pertvaros plokštės tam, kad greitėjimo ar stabdymo metu sumažintų skysčio pozicijos pasikeitimą ir taip inicijuodamas didelį masės centro pokytį. Cisternoje ar talpoje gali būti ne daugiau kaip 7500 litrų. Jei cisterna ar rezervuaras yra didesnis nei šis tūris, privalomai turi būti sumontuota pertvaros plokštė.

1.4.4. LPG kroviniams

Suskystintų dujų cisternų puspriekabės (1.8 pav.) naudojamos gabenti įvairias suskystintas dujas, įskaitant skystą amoniaką, propaną, propilena, dimetilo eterį, izobutata ir t.t.. Kitos suskystintos dujos, kurias galima gabenti LPG cisternoje yra metilaminas ir acetaldehidai. Idealiu atveju šio transporterio maksimalus darbinis slėgis yra didesnis nei 0,1 MPa arba jam lygus.

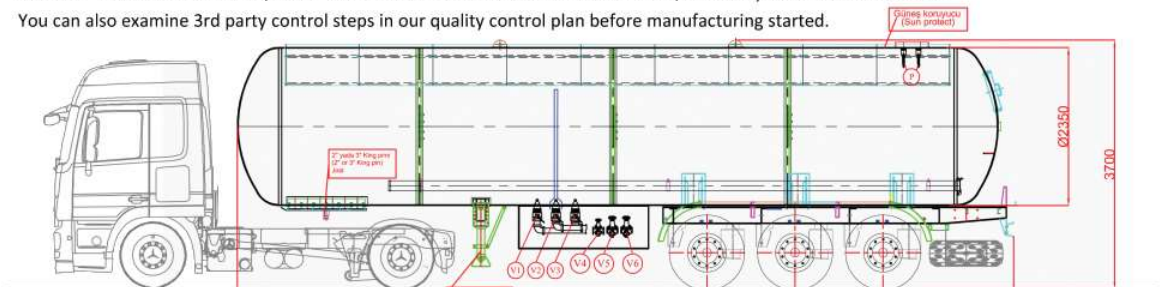
Suskystintųjų dujų pervežimo transporto priemonės, sudarytos iš 2 dalių - cisternos ir važiuoklės. Pagrindiniai slėgio komponentai yra rezervuaro korpusas, galva, šulinio dangtis, flanšai, varžtai. Vis dar šiai kategorijai priklauso žemos temperatūros cisterna, skirta skystam deguoniui, skystam azotui, skystam vandeniliui, skystam argonui, skystam anglies dioksidui ir kitoms medžiagoms gabenti. Rezervuaras pagamintas iš plieno, jo išorinis izoliacijos sluoksnis ir slėginio apvalkalo. Tokiuose modeliuose turi būti tokie saugos priedai avarinio išjungimo įtaisai, elektrostatinis įtaisas, apsauginiai vožtuvai, manometras, skysčio lygio matuoklis ir termometro įtaisas. Rezervuaras gali būti atviras, su izoliacija ar izoliacijos tipu. Svarbiausia, kad cisternos projektavimas, gamyba, naudojimas, gabenimas, apžiūra, remontas, renovacija turi atitikti pagal pramonės standartus ir eismo valdymo taisykles.



Our production shell and end thicknesses are calculated according to EN 12493 : 2008 ADR/TPED transportable pressure vessels directives.

Our production will be examined by our 3rd Party inspection authority. After manufacturing and all relevant tests , they will prepare an "INSPECTION CERTIFICATE" declared that " our products has been manufactured comply with ADR and its referred standard "EN12493 : 2008 ADR/TPED" but Tank will not have certificated with ADR/TPED only certificated with " CE".

You can also examine 3rd party control steps in our quality control plan before manufacturing started.



1.8 pav. Cisternos, skirtos suskystintų dujų transportavimui, konstrukcija [7]

3 lentelė. LPG cisternos specifikacijos [7]

Tūris:	62 m ³ – 62 000 ltr.	Medžiaga:	EN 10028-2 / P355 GH
Dizainas:	AD Merkblatt 2000 – EN12493	Rūšis:	LPG-Propan
Tipas:	Horizontali puspriekabė	Darbinis slėgis:	17.5 Bar.
Hidrostatinio testo slėgis:	22.75 Bar.	Veikimo temperatūra:	- 40° C / +50°C
Bangolaužiai:	4		

Tinkamos LNG ir (arba) LPG puspriekabės pasirinkimas priklauso nuo to, ar pirkėjas žino, kaip gaminama tokia transportavimo įrangą. Didelė dalis projektavimo darbų visiškai priklauso nuo gabenamo produkto pobūdžio. Tai labai subtilus gabenimo procesas, todėl dirbant aplink įvairius cisternos aspektus, reikia būti ypač atsargiems. Jų forma, kuri yra cilindro formos, turėtų būti išlaikyta visą laiką, kad būtų galima saugiai transportuoti. Perkant LNG arba LPG puspriekabę, būtina išsitykite gamintojo brėžinius, kad įsitikinti, jog išigyta įrangą yra saugi. Svarbu įsitikinti, kad visi saugos aparatai veikia taip, kad palengvintų suskystintų dujų perkėlimą iš laikymo rezervuaro į transportavimo baką.

1.4.5. ADR kroviniams

ADR yra Europos sutartis dėl pavojingų krovinių tarptautinio transportavimo keliais. (ADR reiškia The European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road). ADR apima specialias procedūras, susijusias su kelių transportu transportuojamomis pakuotėmis, krovinių draudimu ir pavojingų prekių ženkliniu. Taigi ADR transporto taisyklės, susijusios su pavojingų krovinių vežimu.

Europos susitarimas dėl pavojingų krovinių tarptautinio transportavimo keliais (ADR) buvo sudarytas Ženevoje 1957 m. Rugsėjo 30 d., Globojant Jungtinių Tautų Europos ekonomikos komisijai, ir jis įsigaliojo 1968 m. Sausio 29 d. Pats susitarimas buvo iš dalies pakeistas. Niujorke 1975 m. rugpjūčio 21 d. priimtu Protokolu, iš dalies keičiančiu 14 straipsnio 3 dalį, kuris įsigaliojo 1985 m. balandžio 19 d. Pats susitarimas yra trumpas ir paprastas.

Iš viso yra devynios ADR klasės. Visos pavojingos medžiagos turi savo JT numerį, pagal kurį tiksliai žinoma, kurioms prekėms gresia pavojus ir pagal kokias taisykles reikia gabenti:

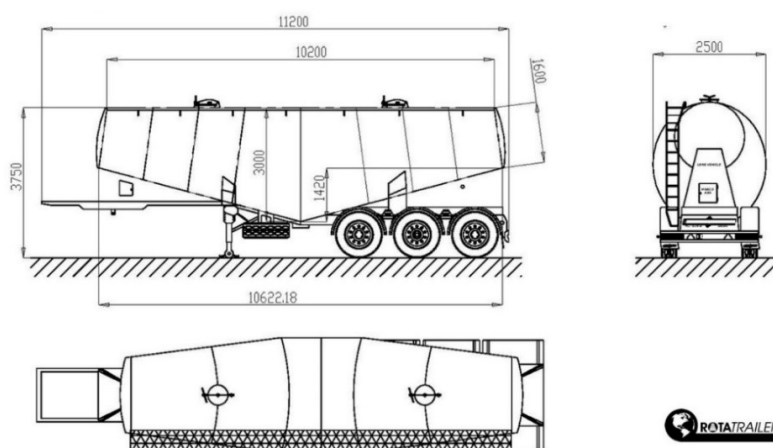
- 1 klasė: Sprogstamosios medžiagos ir daiktai, naudojami sprogimams ir pirotechnikai atlikti;
- 2 klasė: dujos arba skystis;
- 3 klasė: Degūs skysčiai;
- 4 klasė: Degios kietos medžiagos;
- 5 klasė: Oksiduojančios medžiagos;
- 6 klasė: Nuodingos (toksiškos) ir infekcinės medžiagos;
- 7 klasė: Radioaktyviosios medžiagos;
- 8 klasė: Koroduojančios medžiagos;
- 9 klasė: Mišrios pavojingos medžiagos.

Priklausomai nuo ADR klasės, kiekvienam kroviniui privalo būti taikomos skirtingos transportavimo taisyklės.

1.4.6. Biriems kroviniams

Gaminama įvairių tipų birių krovinių puspriekabių. Visus įvairius birius produktus galima gabenti su puspriekabe pritaikyta birių krovinių gabenimui. Cemento, kviečių, miltų, kalkių ir kitų rūšių birių krovinių tinkamas gabenimas gali būti atliktas tik naudojant atitinkamą cisterną (1.9 – 1.10 pav.).

Siūlomas platus puspriekabių asortimentas su skirtingomis specifikacijomis. Taip pat varijuoja ir talpa, galima rinktis su dyzeliniais, elektriniais varikliais ir kompresoriais. „Milenium“ biraus cemento puspriekabė, V tipo birios cemento puspriekabės, „banano“ tipo birios cemento puspriekabės, „Tipping“ birios cemento puspriekabės, miltų pervežimo birių krovinių puspriekabės.



1.9 pav. Cemento ir kitų birių krovinių transportavimo cisternos parametrai [8]

4 lentelė. Birių krovinių cisternos specifikacijos. [8]

Modelis:	V formos puspriekabė skirta transportuoti cementą, plienas, 3 ašių, su elektriniu kompresoriumi;
Tūris:	45 m ³
Tuščio svoris:	12 000 kg, +/- 5%;
Bendra masė:	62 500 kg;
Cisternos storis:	4 mm;



1.10 pav. Cisterna skirta transportuoti birius krovinius [8]

1.5. Autocisternų forma

Cisternų priekabų formos yra skirtingos: apskritimo, elipsės (1.11 pav.) ir stačiakampio. Didelės degalų cisternos yra elipsės ir užapvalinto stačiakampio formos, nes reikia stabilumo. Tokios formos masės centras išlaiko priekabą stabilią. Aukšto slėgio rezervuarai, priešingai, yra kuriami apskritimo formos.



1.11 pav. Elipsės formos autocisterna [5]

Cisternos korpusą sudaro uždariantysis būgnas (1.12 pav.) ir cilindras. Cisterna gaminama sukant ir virinant plieno ar aliuminio plokštes. Galinis būgnas yra suformuotas sukamojo šampavimo proceso metu, jis yra vientisos struktūros. Procesas apima nuolatinį dalinį šampavimą tam tikroje temperatūroje. Kad cilindras ir būgnai būtų tikslūs po suvirinimo, jų apvalumo paklaida turėtų būti mažesnė kaip 3 mm.

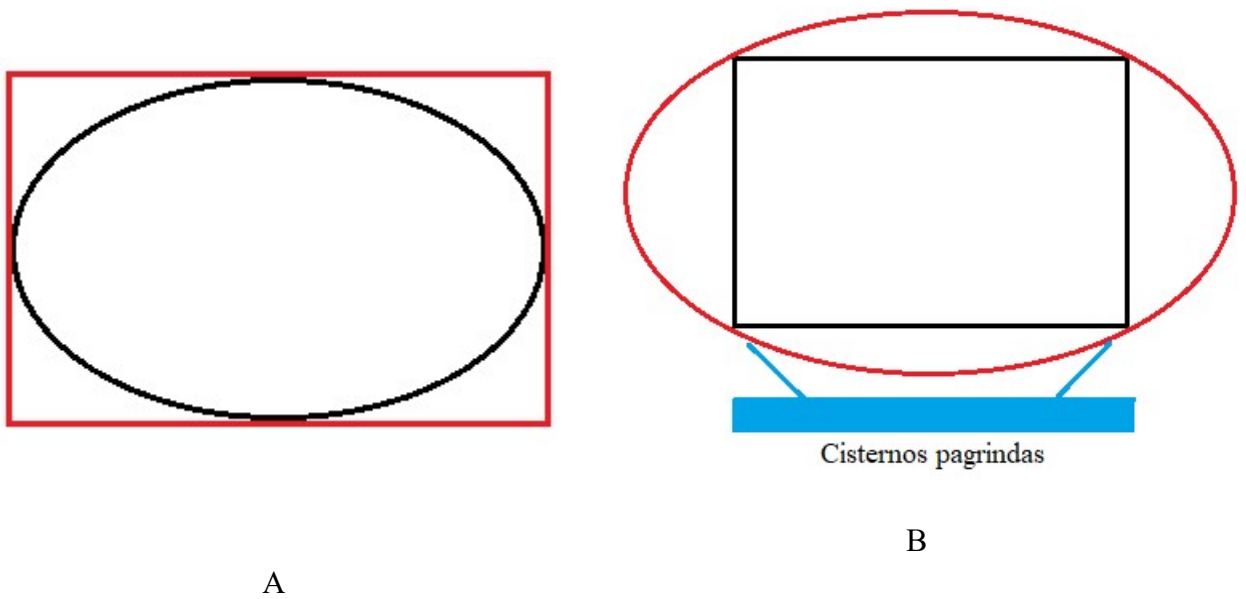


1.12 pav. Cisternos uždariantieji būgnai [5]

Kodėl naftos produktus transportuojančios cisternos būna elipsės formos?

Daugelis cisternų gamintojų teigia, jog elipsinės talpyklos yra suprojektuotos taip, kad užtikrintų didžiausią tūrį ir žemiausią svorio centrą, todėl yra geriausios konstrukcijos, skirtos gabenti didesnius kiekius.

Bet, žinoma, galima spėti, jog stačiakampio skerspjūvio tūris būtų didesnis, tuo pačiu aukščio ir pločio (išlaikant panašų svorio centrą), atsižvelgiant į skerspjūvį, pavaizduotą apačioje (1.13 pav. A).



1.13 pav. Stačiakampio (A) ir elipsinio (B) skerspjūvių palyginimas [9]

Tačiau taip teigti būtų neteisinga, kadangi realybėje vaizdas atrodo taip kaip pateikta 1.13 B paveikslėlyje. Paveikslėlyje 1.14 pateikiamas pavyzdys kaip praplatinus cisternos pagrindą (palyginus su viršutine dalimi) maksimaliai padidinamas tūris ir sužeminamas masės centras.



1.14 pav. Naftos produktams skirta vežti autocisterna [4]

Dar viena priežastis kodėl pasirinkta yra būtent elipsės forma yra ta, jog kiekvieną kartą ištuštinus cisterną yra paliekama šiek tiek likučių (1.15 pav.).

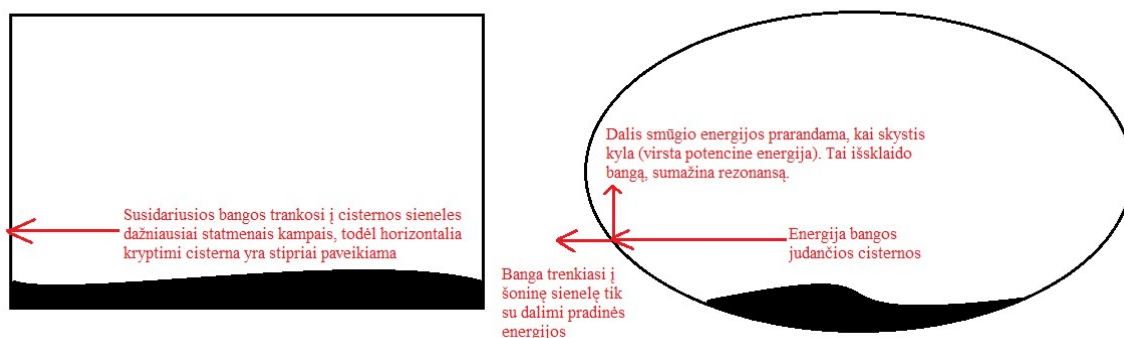


1.15 pav. Likučių susitelkimas: A – kvadratinėje erdvėje; B – elipsės formos erdvėje [9]

Akivaizdžiai galima pastebėti, jog likučių susitelkimas elipsės formos erdvėje (1.15 pav. B) yra gerokai siauresniame ruože, tai leidžia palikti mažiau atliekų.

Trečiasis elipsės formos pranašumas prieš kvadratinę yra tas, jog ji neturi tokių stačių kampų kaip kvadratinė. Tai leidžia maksimaliai sumažinti įtempių koncentracijas visuose konstrukcijos taškuose. Tokiu būdu cisterna tampa atsparesnė nuovargiui, taip pat aukštam slėgiui, iš esmės konstrukcija yra ilgaamžiškesnė.

Ketvirtoji priežastis yra banguojančio skysčio smūgiai į talpyklos sieneles (1.16 pav.).



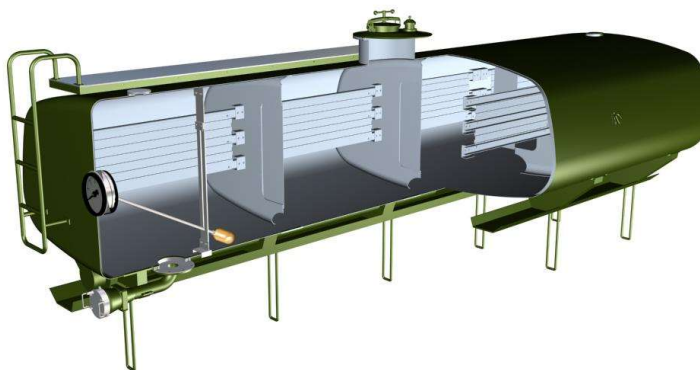
1.16 pav. Skysčio bangavimas esant šoniniam pagreičiui [9]

Akivaizdžiai pastebima, jog elipsės formos cisternoje skystis turi mažesnę poveikį puspriekabės stabilumui vilkikui važiuojant posūkiais bei lėtėjant ar stabdant.

Apibendrinant galima teigti, jog elipsinė cisternos forma yra stabilesnė, tvirtesnė ir ilgaamžiškesnė nei kvadratinė.

1.6. Bangolaužiai

Norint sumažinti skysčio bangavimus cisternoje, visose rezervuaro erdvėse turi būti sumontuotos pertvarų plokštelės (1.17 pav.). Išilginė pertvaros plokštė dedama išilgai rezervuaro ašies, kad būtų sumažinti skersiniai skysčio rezervuare svyravimai. Išilgai skerspjūvio dedama skersinė pertvaros plokštė, kad būtų sumažintas skysčio, esančio rezervuare, ašinis svyravimas. Skersinėse pertvarų plokštėse kiekvienoje plokštėje yra šulinys, kurio skersmuo paprastai yra ne mažesnis kaip 550 mm.



1.17 pav. Cisternos su bangolaužiais pjūvis [5]

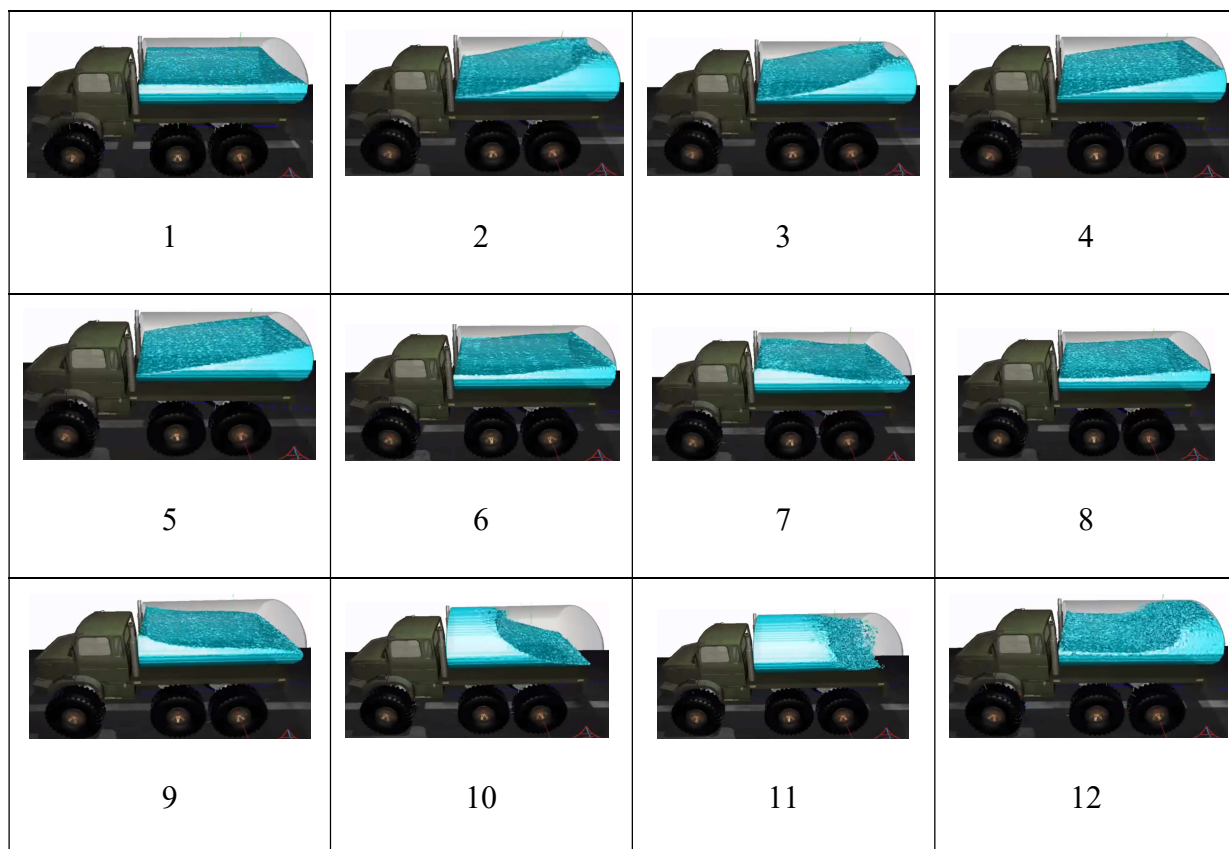


Internal Baffles Prevent Liquid Surging

SafeRack
LOADING RACK TECHNOLOGIES

1.18 pav. Bangolaužių poveikis cisternoje [10]

Bangolaužiai cisternoje tolygiai išsklaido skysčio judėjimo jėgą, kai sunkvežimis įsibėgėja ar stabdo. Stabdant be pertvarų, skystis juda į priekį, ir prisispaudžia prie priekinės rezervuaro sienos, itin stipriai pakeisdamas autocisternos masės centrą ir padidindamas apvirtimo riziką (1.19 pav.). Bangolaužiai tolygiai paskirsto energiją visam sunkvežimiui, todėl sunkvežimį lengviau ir saugiau valdyti.



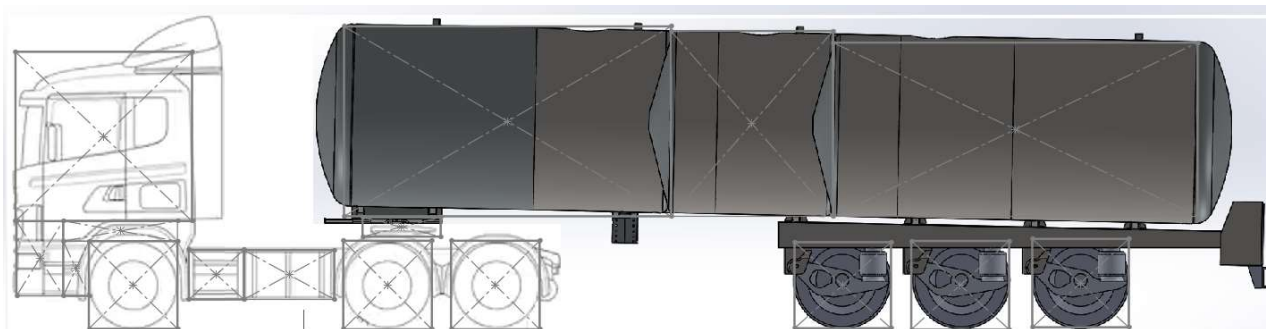
1.19 pav. Skystis judėjimas cisternoje veikian pagreičiams [11]

1. Stovintis sunkvežimis;
2. Atsiranda pagreitis. Sunkvežimis pajuda. Skystis kaupiasi cisternos gale;
3. Pagreitis didėja. Sunkvežimis greitėja. Skystis kaupiasi cisternos gale;
4. Pagreitis nusistovi. Sunkvežimis greitėja tolygiai. Skystis tolygiai nusistovi cisternos gale;
5. Pagreitis nusistovi. Sunkvežimis greitėja tolygiai. Skystis tolygiai nusistovi cisternos gale;
6. Pagreitis tampa lygus 0. Sunkvežimis juda tolygiai. Skystis pradeda stabilizuotis, telkiasi priekyje;
7. Pagreitis lygus 0. Sunkvežimis juda tolygiai. Skystis pradeda stabilizuotis, telkiasi priekyje;
8. Pagreitis lygus 0. Sunkvežimis juda tolygiai. Skystis stabilizuojasi;
9. Prasideda stabdymas. Pagreitis tampa neigiamas;
10. Stabdoma pilnai. Pagreitis neigiamas. Skystis telkiasi cisternos priekyje;
11. Stabdoma pilnai. Pagreitis neigiamas. Skystis visiškai susitelkia cisternos priekyje;
12. Sunkvežimis sustojo. Pagreitis lygus 0. Skystis stabilizuojasi į pradinę būseną (1 iliustracija).

2. Autocisternos dianamikos tyrimai

2.1. Teoriniai judėjimo skaičiavimai

Naudojantis programa „Mas1“ apskaičiuojamas sąstato masės centras esant skirtingoms cisternos apkrovimo situacijoms. Cisterna suskirstyta į 3 sekcijas. Pirmasis skyrius – 11 000l.; antrasis – 7 500l.; trečiasis – 14 500l. Pirmuoju atveju cisterna pripildoma maksimaliai.



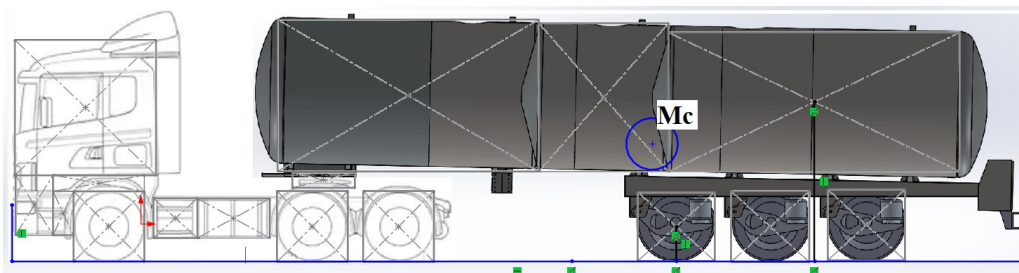
2.1 pav. Sąstato vaizdas iš šono

Naudojant programą „Mas1“ gauti rezultatai pateikti žemiau esančiamei 2.2 paveikslėlyje.

Bazė, mm			Masė, kg	Atstumas nuo buferio iki priekinės ašies, mm	Rezultatai	
1949			42485	1500	Masė, kg	42485
					Xc, mm	9863.1
					Zc, mm	1810.5
					a, mm	8363.1
					b, mm	-6414.1
					bazė I, mm	1949
					hc, mm	1810.5
					R1, N %	-1371605.8
					R2, N %	1788383.6
						-329.1
						429.1

Nr.	Pavadinimas	masė, kg	Agregatas	
			x, koordinatė, mm	z, koordinatė, mm
1	Vairuotojas	100	1033	1990
2	Radiatorius	100	330	650
3	Variškis	800	1270	720
4	Greičių dėžė	600	2830	720
5	Kėbulas 1	1100	1440	1990
6	Sunkvežimio rėmas	2300	3100	350
7	Galinė ašis ir ratai	2200	5280	540
8	ratai	900	1500	540
9	Balnas	300	4800	1250
10	Puspriekabės kojos	150	7500	1000
11	I ašis	700	10200	540
12	II ašis	700	11600	540
13	III ašis	700	13100	540
14	1 cisternos sekcija	9000	6100	2400
15	2 cisternos sekcija	6200	9070	2400
16	3 cisternos sekcija	11800	12300	2400

2.2 pav. „Mas1“ rezultatai gauti esant pilnai pripildytai cisternai



2.3 pav. Šašto masės centras pažymėtas raidėmis „Mc“

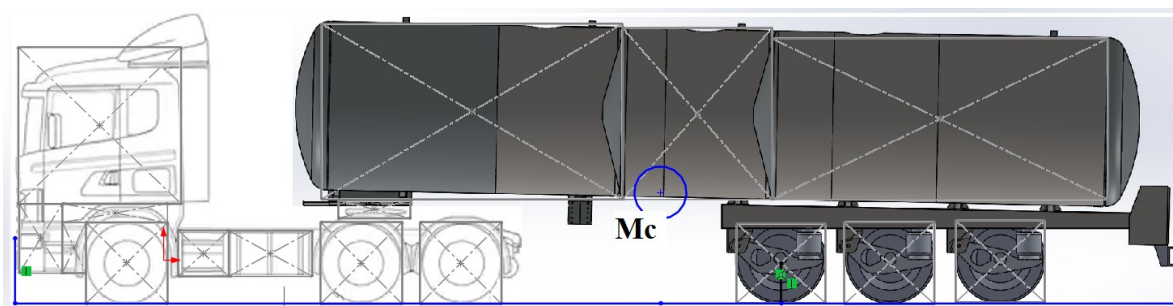
Antroje situacijoje pilnai užpildoma tik 1 ir 3 cisternos sekcijos.

Bazė, mm	Masė, kg	Atstumas nuo buferio iki priekinės ašies, mm
1949	42485	1500

Rezultatai	
Masė, kg	42485
Xc, mm	8582.2
Zc, mm	1471.6
a, mm	7082.2
b, mm	-5133.2
bazė l, mm	1949
hc, mm	1471.6
R1, N %	-1097690.9
R2, N %	1514468.7
	-263.4
	363.4

Nr.	Pavadinimas	masė, kg	Agregatas	
			x, koordinatė, mm	z, koordinatė, mm
1	Vairuotojas	100	1033	1990
2	Radiatorius	100	330	650
3	Variklis	800	1270	720
4	Greičių dėžė	600	2830	720
5	Kebulas 1	1100	1440	1990
6	Sunkvežimio rėmas	2300	3100	350
7	Galinė ašis ir ratai	2200	5280	540
8	ratai	900	1500	540
9	Balnas	300	4800	1250
10	Puspriekabės kojos	150	7500	1000
11	I ašis	700	10200	540
12	II ašis	700	11600	540
13	III ašis	700	13100	540
14	1 cisternos sekcija	9000	6100	2400
15	2 cisternos sekcija	200	9070	2400
16	3 cisternos sekcija	11800	12300	2400

2.4 pav. „Mas1“ rezultatai gauti esant pripildytoms tik 1 ir 3 sekcijoms



2.5 pav. Šašto masės centras pažymėtas raidėmis „Mc“

Stabdymo atstumo ir laiko teorinis apskaičiavimas:

Laikoma, jog sąstatas važiuoja 90 km/h arba 25 m/s ir 50 km/h arba 13.8 m/s greičiais, o bendra sunkvežimio su cisterna masė lygi 42 485 kg. Atliekamas vidutinio stiprumo stabdymas, sukibimo koeficientas priimamas 0,6 esant sausam asfaltui.

Pagrindinės formulės:

$$N = m \times g;$$

Čia:

N – sunkio jėga, N ;

M – masė, kg ;

g – laisvo kritimo pagreitis, m/s^2 ;

$$F_{tr} = \mu \times N;$$

Čia:

F_{tr} – trinties jėgai, kuri veikia stabdymo metu;

μ – sukibimo koeficientas.

$$S_{st} = \frac{m \times v^2}{2 \times F_{tr}};$$

Čia:

S_{st} – Stabdymo kelias, m ;

v – greitis, m/s ;

$$t_{st} = \frac{m \times v}{F_{tr}};$$

Čia:

t_{st} – stabdymo laikas.

$$a_{l\grave{e}t} = \frac{v_{gal} - v_{prad}}{\Delta t};$$

Čia:

$a_{l\grave{e}t}$ – lėtijimo pagreitis, m/s^2 ;

v_{gal} – galinis greitis, m/s ;

v_{prad} – pradinis greitis, m/s ;

Δt – laiko pokytis.

Sąstatui judant 90km/h greičiu ir stabdant:

$$F_{tr} = \mu \times m \times g = 0.6 \times 42485 \times 9.81 = 250067 \text{ N};$$

$$S_{st} = \frac{m \times v^2}{2 \times F_{tr}} = \frac{42485 \times 25^2}{2 \times 250067} = \frac{26553125}{500134} = 53,09 \text{ m.};$$

$$t_{st} = \frac{m \times v}{F_{tr}} = \frac{42485 \times 25}{250067} = 4,2 \text{ s.};$$

$$a_{lët} = \frac{v_{gal} - v_{prad}}{\Delta t} = \frac{0 - 25}{4,2} = 6 \text{ m/s}^2;$$

Sąstatui judant 50km/h greičiu ir stabdant:

$$F_{tr} = \mu \times m \times g = 0.6 \times 42485 \times 9.81 = 250067 \text{ N};$$

$$S_{st} = \frac{m \times v^2}{2 \times F_{tr}} = \frac{42485 \times 13,8^2}{2 \times 250067} = \frac{8090843}{500134} = 16,2 \text{ m};$$

$$t_{st} = \frac{m \times v}{F_{tr}} = \frac{42485 \times 13,8}{250067} = 2,3 \text{ s};$$

$$a_{lët} = \frac{v_{gal} - v_{prad}}{\Delta t} = \frac{0 - 13,8}{2,4} = 5,75 \text{ m/s}^2;$$

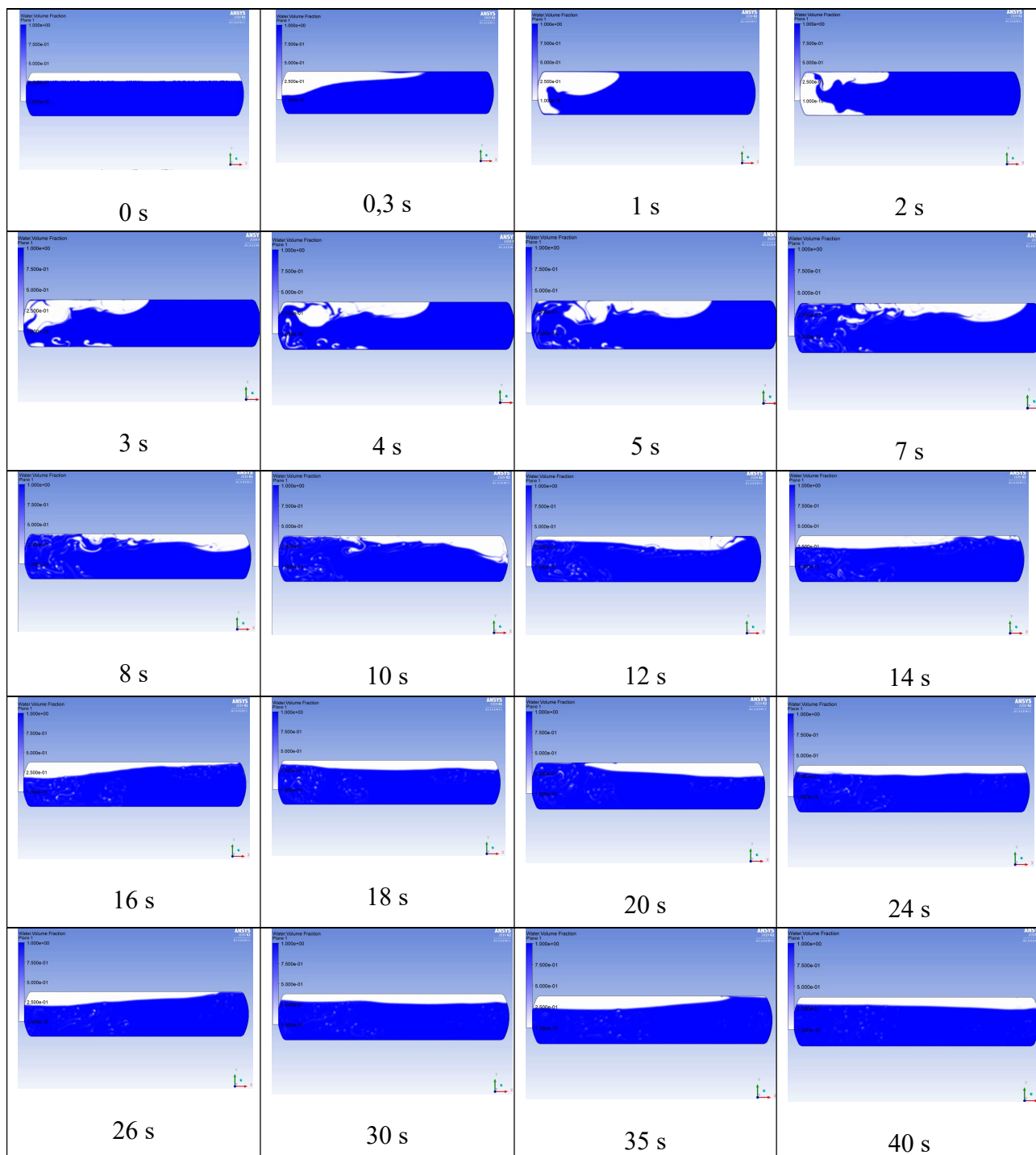
5 lentelė. Apskaičiuoti sąstato stabdymo rezultatai

Pradinis greitis	Stabdymo distancija, m	Stabdymo laikas, s
50 km/h arba 25 m/s	16,2	2,3
90 km/h arba 13,8 m/s	53,09	4,2

2.2. Skysčio teliuškavimo skirtingų tipų cisternose simuliacijos

2.2.1. Skysčio teliuškavimas cisternoje be pertvarų

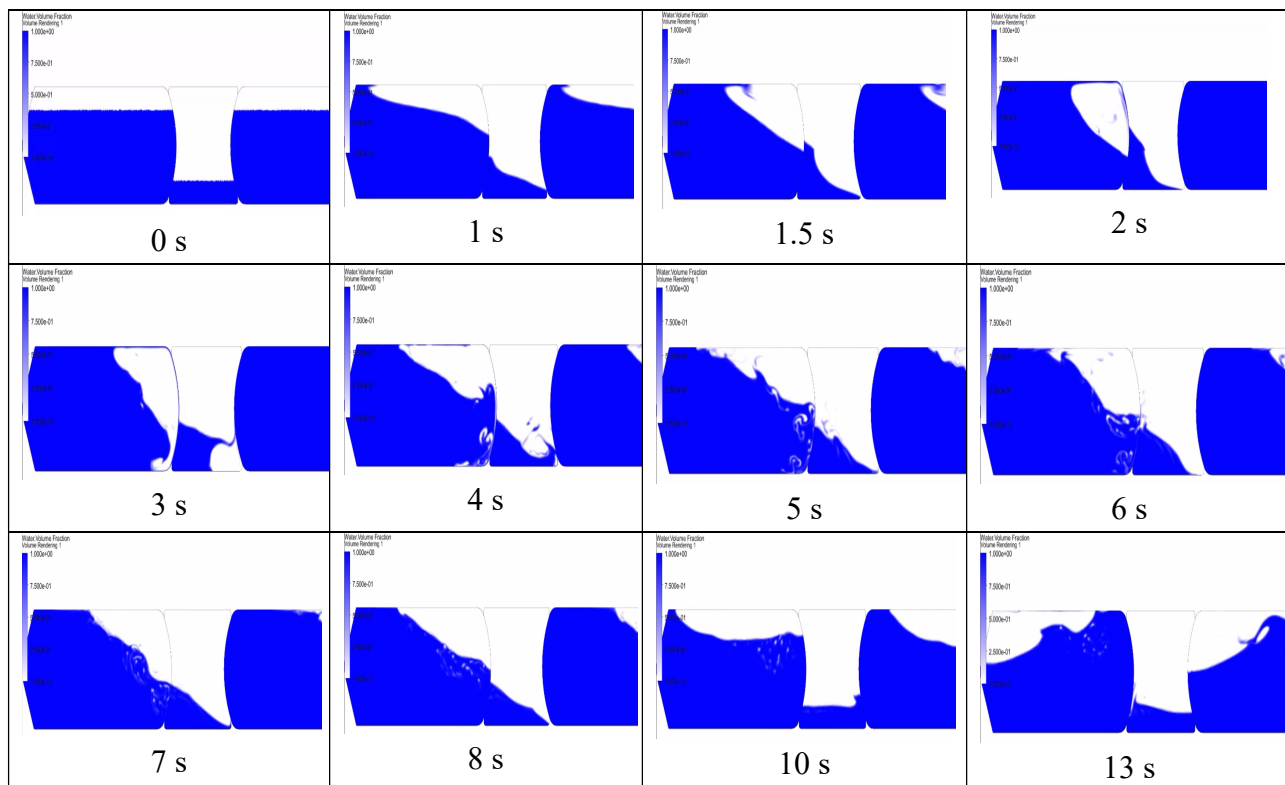
Žemiau pateikiama skysčio judėjimas cisternoje be pertvarų, kai cisterną veikia trumpalaikis pagreitis ašine kryptimi:



2.6 pav. Skysčio teliuškavimas cisternoje neturinčioje pertvarų

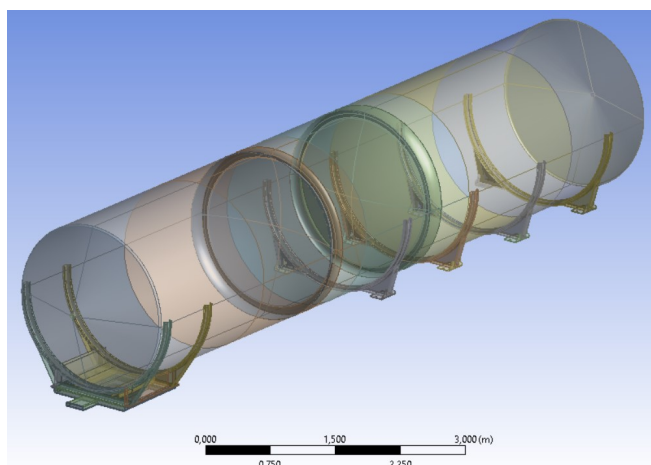
2.2.2. Skysčio teliuškavimas simetriškoje cisternoje

Žemiau pateikta skysčio, esančio simetriškoje cisternoje, padalintoje į 3 atskirus skyrius, reakcija į ašine kryptimi veikusį pagreitį.



2.7 pav. Skysčio teliuškavimas cisternoje su pertvaromis

2.3. Skysto krovinio poveikis autocisternos konstrukcijai pagreičio metu



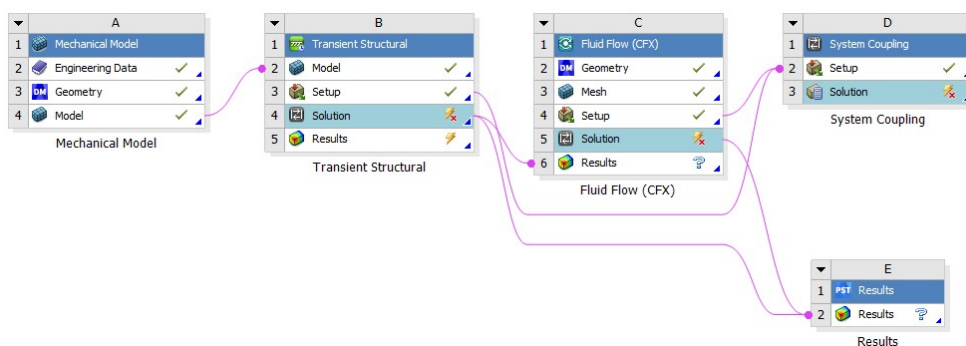
2.8 pav. Pasirinkta skaičiuojamoji cisternos konstrukcija

Šios cisternos yra gaminamos iš maisto pramonei skirto Duplex plieno. Duplex nerūdijantis plienas yra ypač atsparus korozijai. Jo mikrostruktūra susideda iš austenito ir ferito fazių mišinio. Dėl

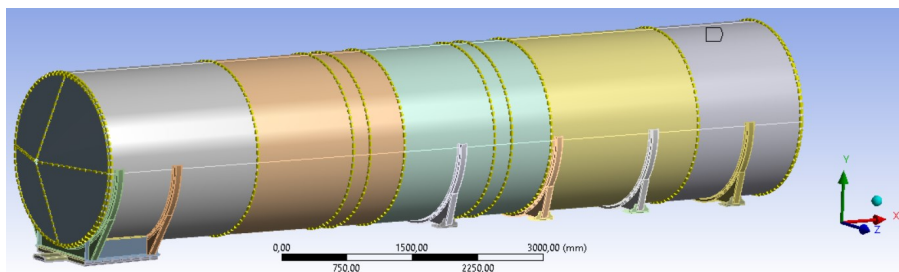
to šis nerūdijantis plienas pasižymi savybėmis, būdingomis tiek austenitiniam, tiek feritiniam nerūdijančiam plienui.

6 lentelė. Plieno Duplex 2205 savybės [10]

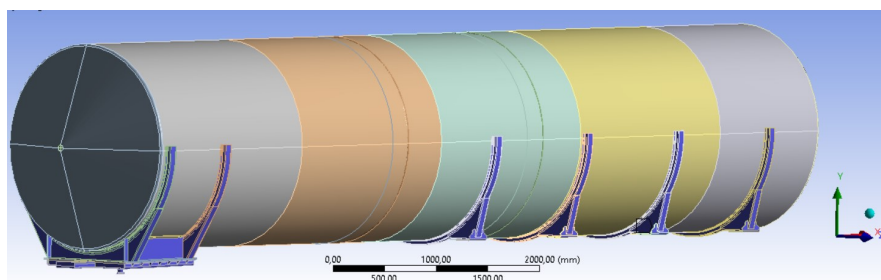
Takumo riba	450 MPa
Pailgėjimas %	25
Tankis (g/cm ³)	7,805
Elastingumo modulis (GPa)	200



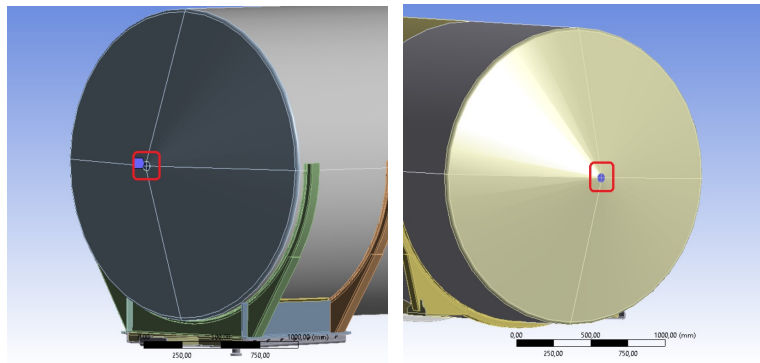
2.9 pav. Skaiciavimo schema Ansys kompiuterinėje programoje



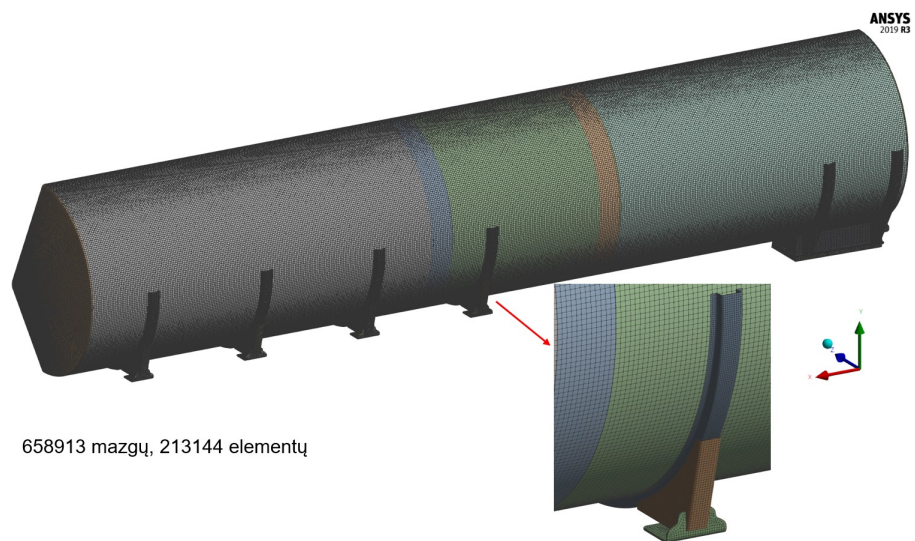
2.10 pav. Geltona spalva pažymėtose vietose BEM elementų dydis yra 80 mm



2.11 pav. Mėlyna spalva pažymėtose vietose BEM elementų dydis yra 25 mm

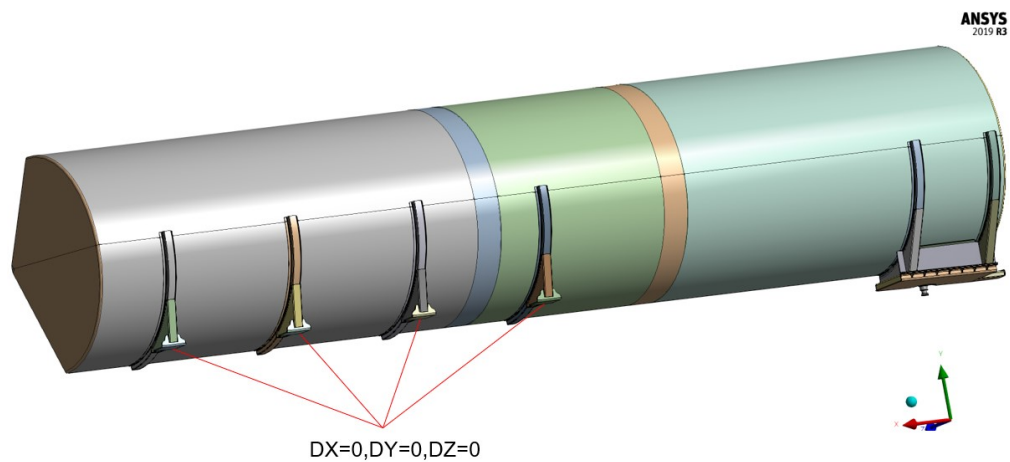


2.12 pav. Cisterną uždarančiuose galuose BEM elementų dydis yra 5 mm

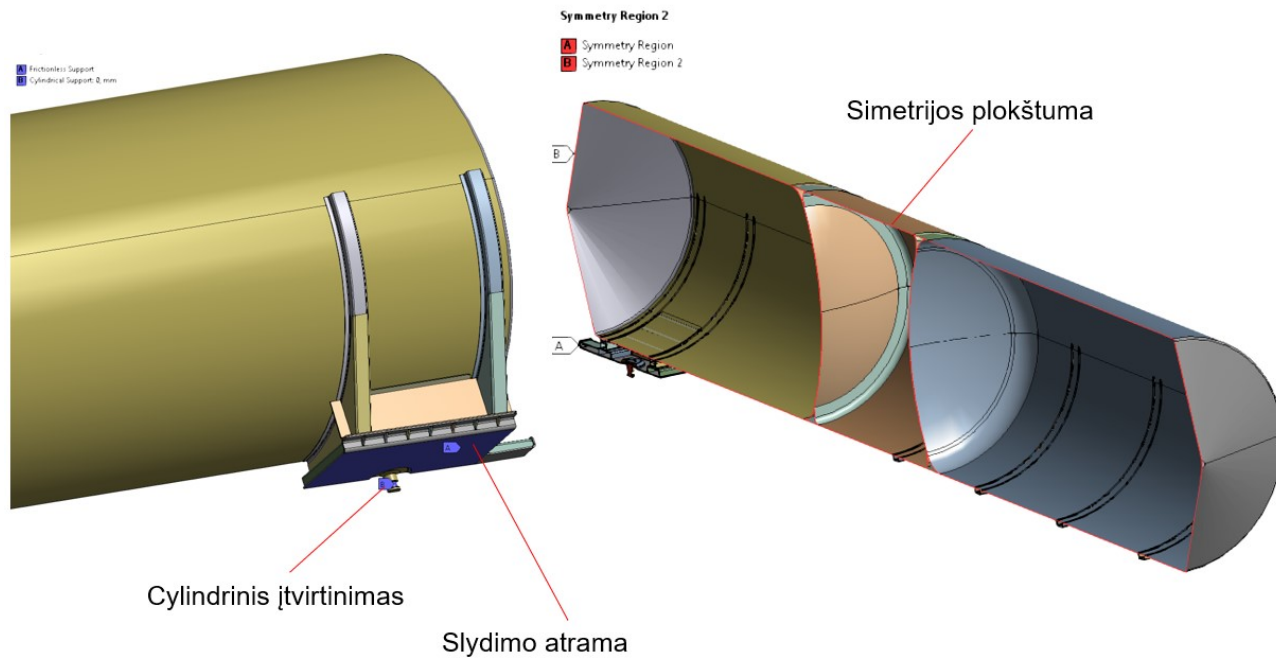


2.13 pav. Sudaromas BEM tinklelis turintis 658913 mazgų ir 213144 elementų

Kraštinės sąlygos



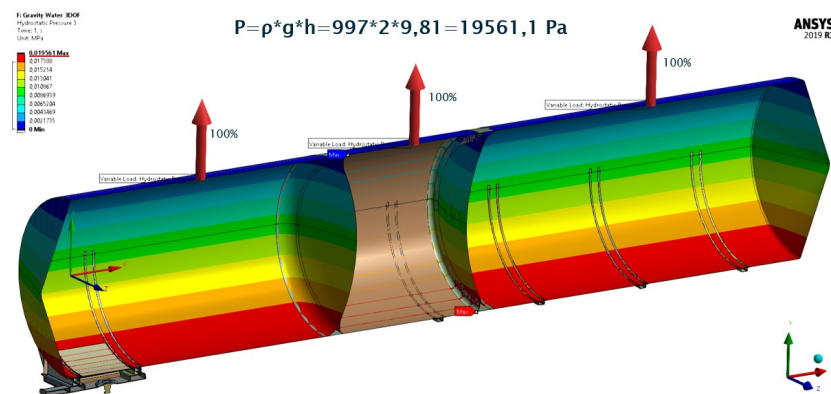
2.14 pav. Gale esančios 8 tvirtinimo plokštumos įtvirtinamos nejudamai visomis kryptimis



2.15 pav. Įtvirtinimai leidžiantys cisternai judėti tik ašine kryptimi

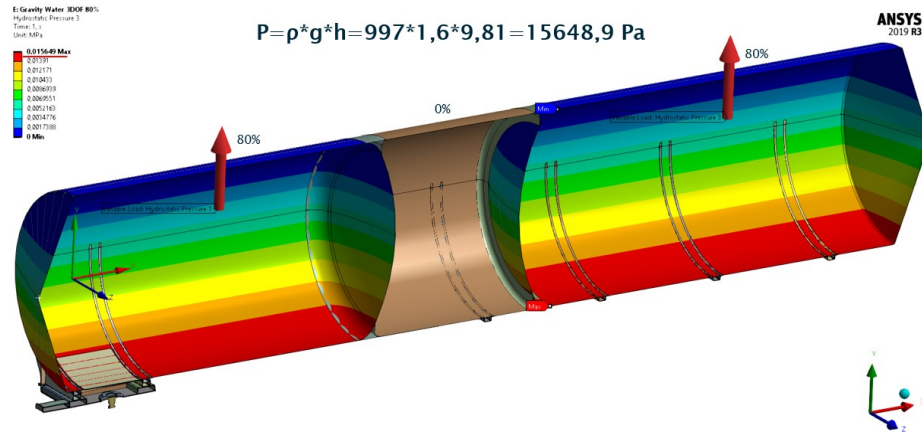
Tolimesni skaičiavimai atliekami 1 ir 3 cisternos dalis pilnai užpildžius. Užpildantis skystis – vanduo, kurio tankis yra 997 kg/m^3 . (2.16 pav.)

Gauti rezultatai:



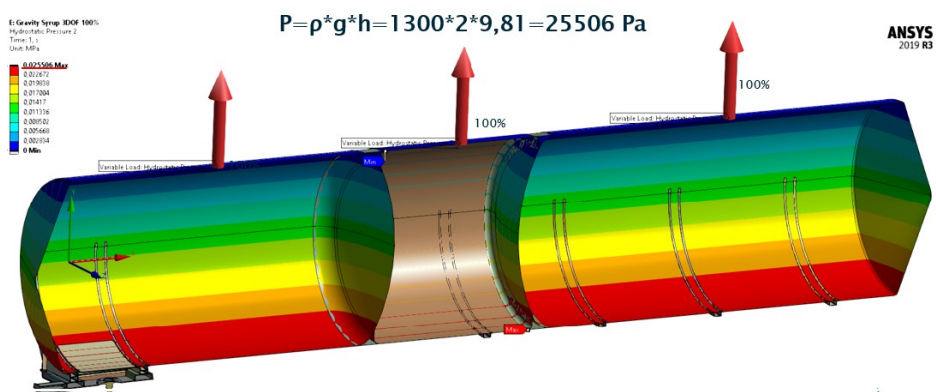
2.16 pav. Hidrostatinio slėgio pasiskirstymas. Gaunamas maksimalus 19561,1 Pa slėgis

Tolimesni skaičiavimai atliekami 1 ir 3 cisternos dalis užpildžius 80%. Užpildantis skystis – vanduo, kurio tankis yra 997 kg/m^3 . (2.17 pav.)



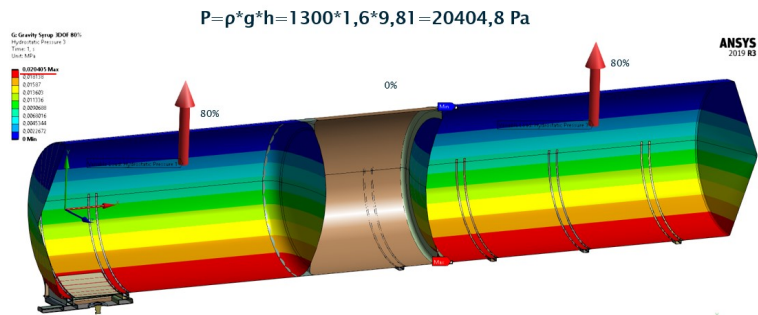
2.17 pav. Hidrostatinio slėgio pasiskirstymas. Gaunamas maksimalus 15648,9 Pa slėgis

Tolimesni skaičiavimai atliekami 1 ir 3 cisternos dalis užpildžius 100%. Užpildantis skystis – sirupas, kurio tankis yra 1300 kg/m^3 . (2.18 pav.)



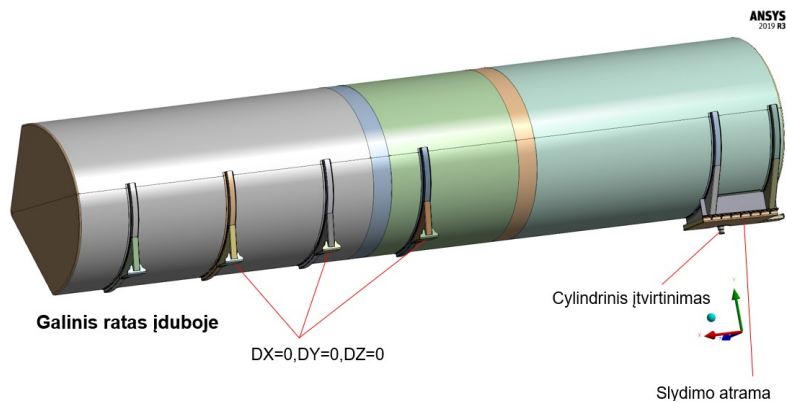
2.18 pav. Hidrostatinio slėgio pasiskirstymas. Gaunamas maksimalus 25506 Pa slėgis

Tolimesni skaičiavimai atliekami 1 ir 3 cisternos dalis užpildžius 80%. Užpildantis skystis – sirupas, kurio tankis yra 1300 kg/m^3 (2.19 pav.).

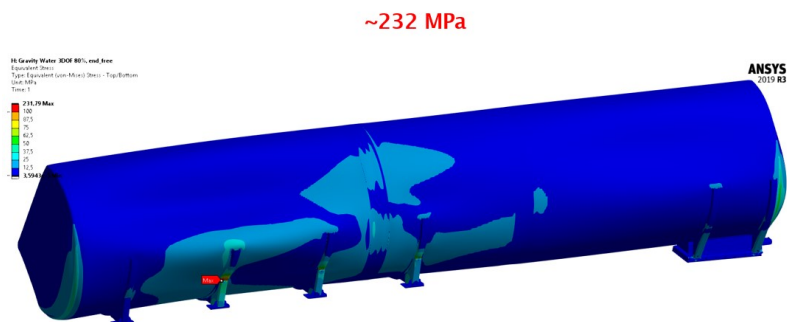


2.19 pav. Hidrostatinio slėgio pasiskirstymas. Gaunamas maksimalus 20404,8 Pa slėgis

Sekančiame skaičiavime pakeičiamos įtvirtinimo sąlygos (2.20 pav.). skaičiavimai atliekami 1 ir 3 cisternos dalis užpildžius 80%. Užpildantis skystis – vanduo, kurio tankis yra 997 kg/m^3 .



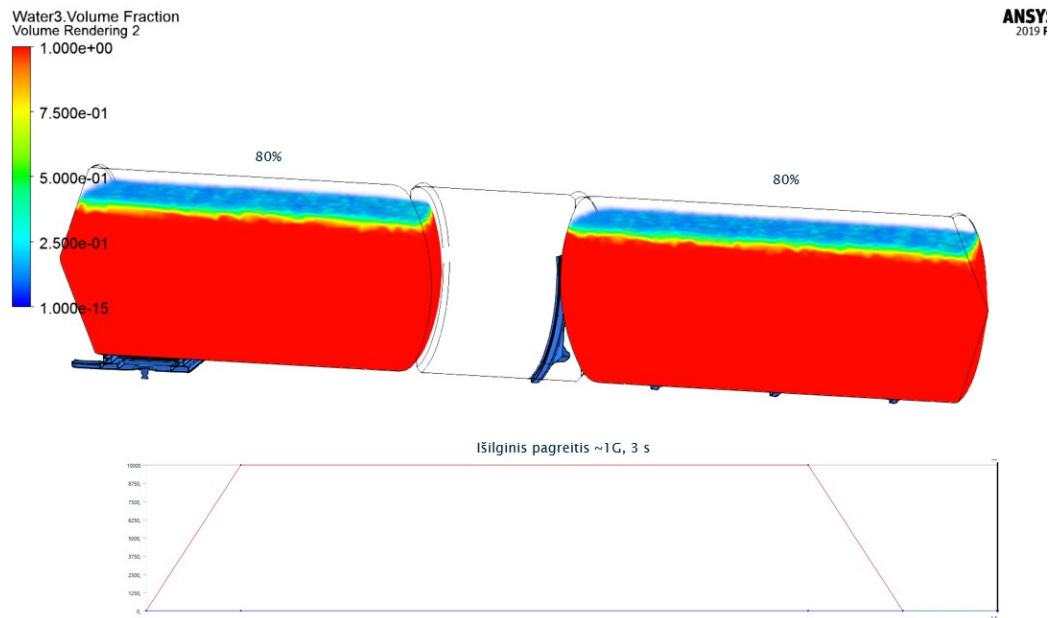
2.20 pav. Pakeistos įtvirtinimo sąlygos. Galinė ašis neliečia žemės



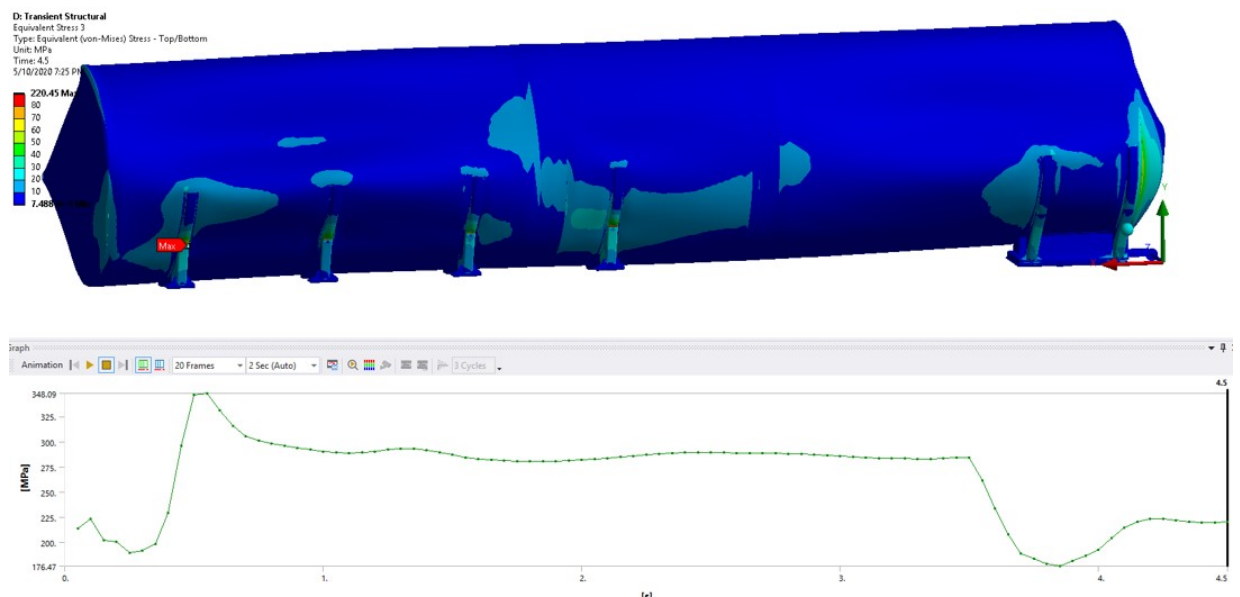
2.21 pav. Įtempių pasiskirstymas konstrukcijoje. Didžiausi gaunami įtempiai yra $\sim 232 \text{ MPa}$

Vandens teliuškavimas 3d cisternoje

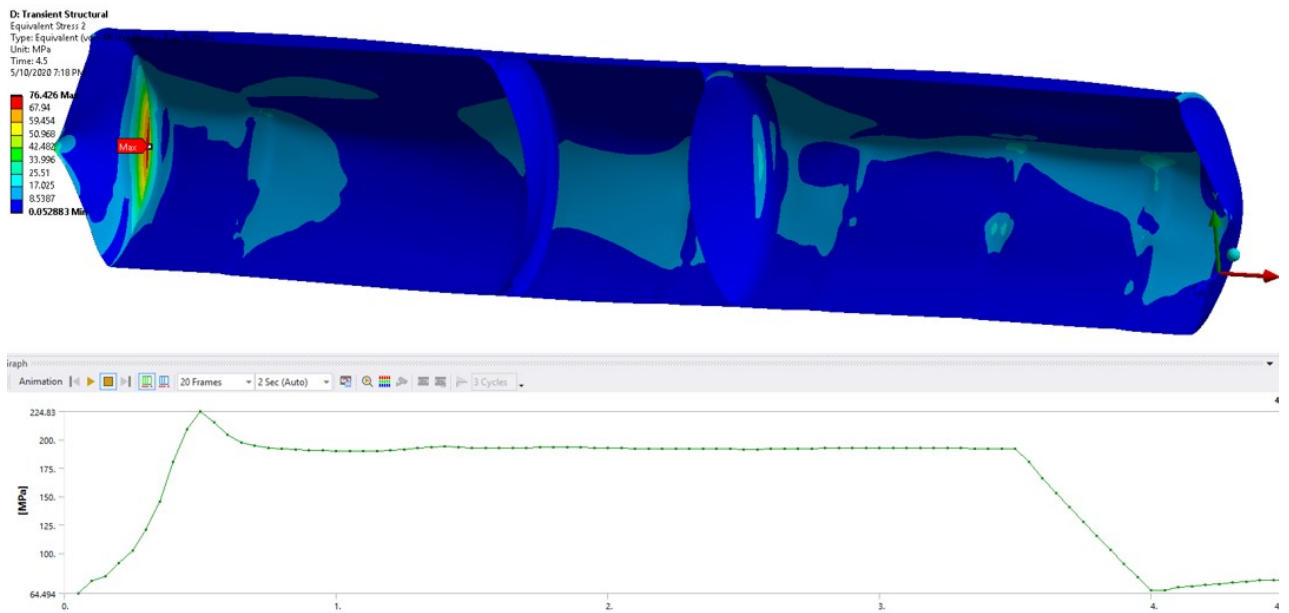
Visų skaičiavimų metu cisternai suteikiamas $9,81 \text{ m/s}^2$ pagreitis. Sunkiasvorei transporto priemonei stabdant realioje situacijoje, naudojant ABS generuojamas $\sim 0,6 \text{ g}$ lėtėjimo pagreitis. (2.22 pav.)



2.22 pav. Vandens užpildymas ir pagreičio grafikas



2.23 pav. Konstrukcijos įtempių priklausomybė nuo laiko

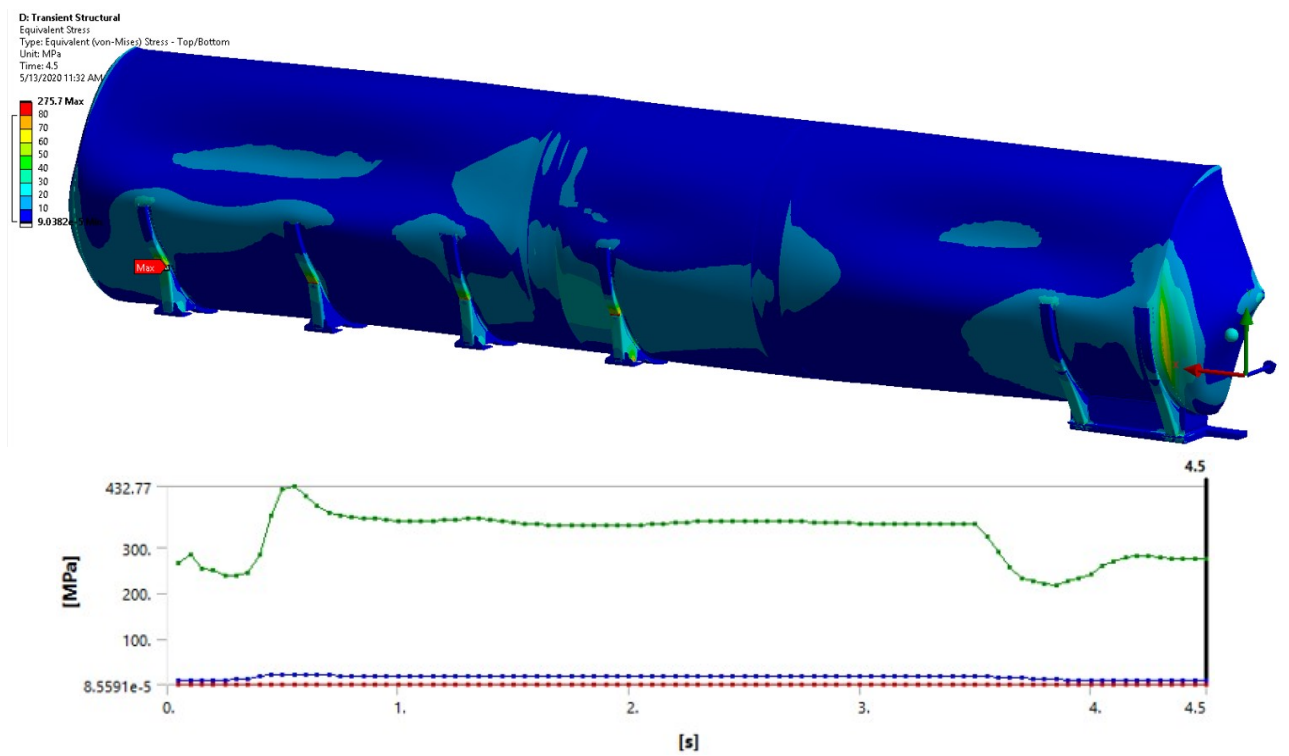


2.24 pav. Kevalų įtempių priklausomybė nuo laiko

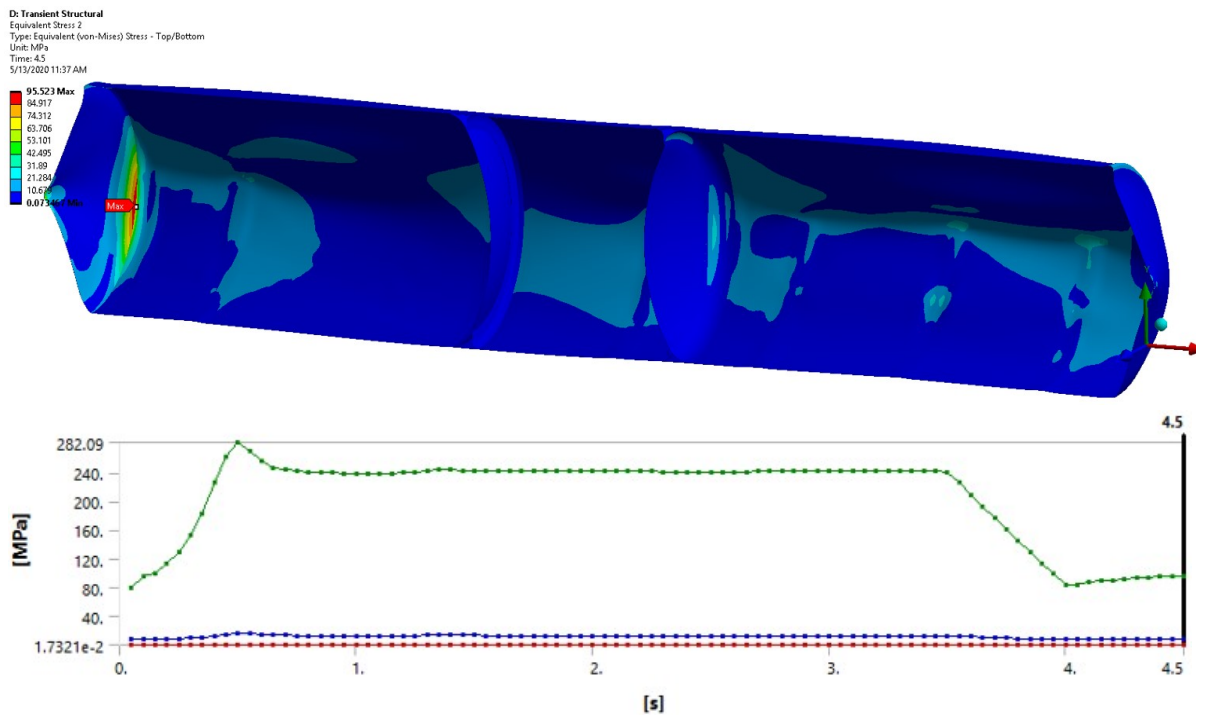
Sirupo teliškavimas 3d cisternoje

Išlaikomos tokios pačios užpildymo sąlygos.

Rezultatai:



2.25 pav. Konstrukcijos įtempių priklausomybė nuo laiko



2.26 pav. Kevalų įtempių priklausomybė nuo laiko

Gauti rezultatai:

7 lentelė. Statinio bandymo rezultatai

Skystis	Užpildymo sąlygos	Maks. įtempiai	Maks. poslinkis
Vanduo	100% / 0% / 100%	~210 MPa	~1,3 mm
	80% / 0% / 80%	~185 MPa	~1,7 mm
Sirupas	100% / 0% / 100%	~272 MPa	~1,7 mm
	80% / 0% / 80%	~238 MPa	~2,1 mm

8 lentelė. Dinaminio bandymo rezultatai

Skystis	Užpildymas	Maks. įtempiai	Laiko momentu
Vanduo	80% / 0% / 80%	~349 MPa	~0,5 s
Sirupas	80% / 0% / 80%	~433 MPa	~0,5 s

Rezultatų apibendrinimas

Atlikus sąstato masės centro skaičiavimus paaiškėjo, jog pripildžius cisterną 80% / 0% / 80% masės centras gaunamas apytiksliai sąstato centre. Tokia jo vieta leidžia išlaikyti maksimaliai didelį dinaminį stabilumą. Po dinaminių sąstato lėtėjimo parametrų nustatymų, gauta jog priėmus bendrą vilkiko bei autocisternos su kroviniu masę 42 485 kg, gaunamas maksimalus lėtėjimo pagreitis yra 6 m/s^2 , kas yra $\sim 0,61 \text{ g}$. Apskaičiavus teorinį stabdymą, gauti rezultatai pateikiami žemiau:

Apskaičiuoti sąstato stabdymo rezultatai

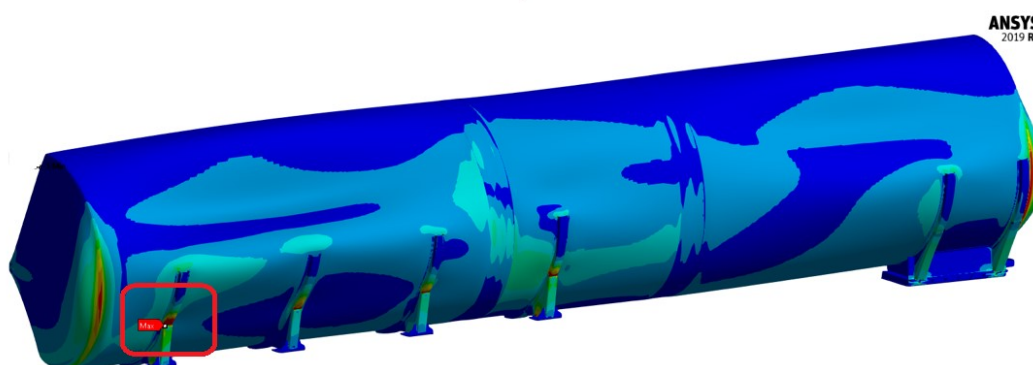
Pradinis greitis	Stabdymo distancija, m	Stabdymo laikas, s
50 km/h arba 25 m/s	16,2	2,3
90 km/h arba 13,8 m/s	53,09	4,2

Remiantis gautais rezultatais atliekami tolimesni dinaminiai skaičiavimai apskaičiuoti autocisternoje susidarantiems įtempiams.

Hidrostatinio bandymo metu gauti rezultatai parodė, jog didžiausi konstrukcijoje susidarantys įtempiai siekia $\sim 272 \text{ MPa}$, sirupui esant kaip užpildančiajam skysčiui. Jautriausia konstrukcijos vieta pažymėta 2.25 pav..

Atlikus dinaminį konstrukcijos bandymą, didžiausi gauti įtempiai yra $\sim 433 \text{ MPa}$, sirupui esant kaip užpildančiajam skysčiui. Maksimalių įtempių lokacija sutampa su statinio bandymo metu gauta vieta.

Duplex plieno takumo riba yra $\sim 450 \text{ MPa}$. Tyrimo rezultatuose gauti maksimalūs įtempiai yra $\sim 433 \text{ MPa}$. Simuliacija buvo vykdoma esant 1 g pagreičiui, kai tuo tarpu, realiomis sąlygomis, autocisternos sąstatas stabdant naudojantis ABS sistemą gali pasiekti $0,6 \text{ g}$. Todėl galima teigti, jog autocisterna yra pakankamai tvirta, tačiau norint dar labiau optimizuoti jos konstrukciją yra reikalingi papildomi tyrimai.



2.27 pav. Silpniausia konstrukcijos vieta

Išvados

1. Išanalizavus literatūrą aiškinančią autocisternų konstrukcijos ypatybes, pasirinktos 2 populiariausios skysčio transportavimo cisternos – be pertvarų ir suskirstyta į 3 sekcijas;
2. Apžvelgta literatūra matematiškai aiškinanti laisvo skysčio paviršiaus judėjimo prognozavimą. Atliktos skysčio judėjimo simuliacijos skirtingos konstrukcijos cisternose;
3. Teoriškai apskaičiuotas sąstato stabdymo kelias, kuris yra 16,2 m (50 km/h) / 53,09 m (90 km/h) bei laikas – 2,3 s (50 km/h) ir 4,2 s (90 km/h);
4. Atlikti hidrostatiniai bei dinaminiai skysčio teliuškavimo cisternoje bandymai. Duplex plieno takumo riba yra ~450 MPa. Tyrimo rezultatuose gauti maksimalūs įtempiai yra ~433 MPa;
5. Simuliacija buvo vykdoma esant 1g pagreičiui, kai tuo tarpu, realiomis sąlygomis, autocisternos sąstatas stabdant naudojantis ABS sistema gali pasiekti 0,6 g. Todėl galima teigti, jog autocisterna yra pakankamai tvirta, tačiau norint dar labiau optimizuoti jos konstrukciją yra reikalingi papildomi tyrimai.

Informacijos šaltinių sąrašas

1. Belhaq, M., Recent Trends in Applied Nonlinear Mechanics and Physics (2016). [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2020-01-03]. Internetinė prieiga - <https://books.google.lu/books?id=bvM-DwAAQBAJ&pg=PA45&lpg=PA45&dq=ranganathan+sloshing&source=bl&ots=E3rXIHFFWY&sig=ACfU3U2HDU2EFqGRq0YSmHyRwWEsIU-6MA&hl=en&sa=X&ved=2ahUKewitk462yfpAhVBOhoKHa1DDMEQ6AEwAHoECAgQAQ#v=onepage&q&f=false>
2. Mohammadi, M.M., Hasheminejad., Seyyed M (2010). Effect of anti-slosh baffles on free liquid oscillations in partially filled horizontal circular tanks. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2020-01-17]. Internetinė prieiga - <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0029801810002088>
3. Kompanijos „JAASTRA-WAM“ pramoninių įrenginių gamintojo internetinis puslapis. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-11-22]. Internetinė prieiga - <http://www.jaastrawam.lt/lt/technologiniu-irengimu-katalogas/4-autocisternos>
4. Internetinė parduotuvė. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-11-22]. Internetinė prieiga - https://www.alibaba.com/product-detail/40000-liters-transport-petrol-trailer-heavy_60432590293.html
5. Kompanijos „Anstertrailer“ prekiaujančios priekabomis bei puspriekabėmis, gamintojo internetinis puslapis. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-11-22]. Internetinė prieiga – <https://www.anstertrailer.com/tank-trailer-designs-specifications/>
6. Kompanijos „RotaTrailer“ prekiaujančios priekabomis bei puspriekabėmis, gamintojo internetinis puslapis. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-11-22]. Internetinė prieiga - <https://rotatrailer.com/14/tanker-semi-trailer-3-axle>
7. Kompanijos „RotaTrailer“ prekiaujančios priekabomis bei puspriekabėmis, gamintojo internetinis puslapis. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-11-22]. Internetinė prieiga - <https://rotatrailer.com/6/lpg-tanker-trailer>
8. Kompanijos „RotaTrailer“ prekiaujančios priekabomis bei puspriekabėmis, gamintojo internetinis puslapis. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-11-22]. Internetinė prieiga - <https://rotatrailer.com/4/bulk-cement-semi-trailer>
9. Internetinis žinynas. Avinash Singh. Lapkričio 10, 2015. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-11-22]. Internetinė prieiga - <https://www.quora.com/Why-are-liquid-carrying-tankers-like-fuel-and-water-cylindrical-in-shape>
10. Internetinis puslapis aiškinantis autocisternų konstrukciją. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-11-22]. Internetinė prieiga - <https://www.saferack.com/road-tanker-safety-design-equipment-human-factor/>
11. Vaizdo įrašų dalinimosi platforma. „Coupled Multibody dynamics - SPH simulation of a tanker truck undergoing a braking test“. Asciencecom. 2014-02-18. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2019-11-22]. Internetinė prieiga - <https://www.youtube.com/watch?v=jqpl4ME6rRY&list=WL&index=182&t=0s>
12. Aalco – juodųjų ir spalvotųjų metalų prekyvietė (2019, Birželio 27). Stainless Steels - Duplex Stainless Steels Properties, Fabrication and Applications (Nerūdijantys plienai – Duplex nerūdijantys plienai, plienų savybės, gamyba ir taikymas. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2020-05-01]. Internetinė prieiga - <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2870>

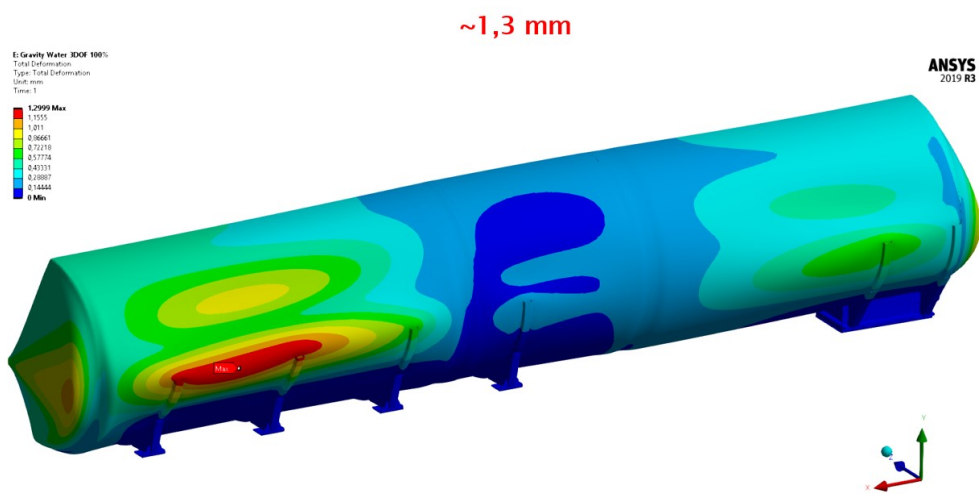
13. Dahlberg, E. (2000), A Method Determining the Dynamic Rollover Threshold of Commercial Vehicles. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2020-01-17]. Internetinė prieiga - https://www.jstor.org/stable/44650818?seq=1#metadata_info_tab_contents
14. Dahlberg, E., Stenenson, A. (2006), The dynamic rollover threshold - a heavy truck sensitivity study. International Journal of Vehicle Design. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2020-01-17]. Internetinė prieiga - <https://www.inderscienceonline.com/toc/ijvd/current>
15. Gertsch, J., Eichelhard, O. (2003), Simulation of Dynamic Rollover Threshold for Heavy Trucks. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2020-01-17]. Internetinė prieiga – <https://www.inderscienceonline.com/toc/ijvd/current>
16. Ervin ir Mathew (1988), Regulation of Weights, Lengths, and Widths of Commercial Motor Vehicles. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2020-01-17]. Internetinė prieiga - <https://books.google.lu/books?id=ngmfAwAAQBAJ&pg=PA162&lpg=PA162&dq=Ervin+and+Mathew+1988&source=bl&ots=v09sfzWvV&sig=ACfU3U0vTvRi1YbpKOZk74kheIQsO146w&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwi23LTa0aHpAhUHCuwKHa7VDnoQ6AEwCnoECAsQAQ#v=onepage&q=Ervin%20and%20Mathew%201988&f=false>
17. Abramson, H. Norman (1966), The Dynamic Behavior of Liquids in Moving Containers, with Applications to Space Vehicle Technology. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2020-01-17]. Internetinė prieiga - <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19670006555.pdf>
18. BaoZeng, Y. (2008), Large-scale amplitude liquid sloshing in container under pitching excitation, Chinese Science Bulletin. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2020-01-17]. Internetinė prieiga - <https://dokumen.tips/documents/large-scale-amplitude-liquid-sloshing-in-container-under-pitching-excitation.html>
19. Bastian, P., Birken, K., Johannsen, K., Lang, S., Neuß, N., Rentz-Reichert, H., Wieners, C. (1997), A flexible software toolbox for solving partial differential equations, Computing and Visualization in Science. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2020-01-22]. Internetinė prieiga - https://www.researchgate.net/publication/225383360_UG-A_Flexible_Software_Toolbox_for_Solving_Partial_Differential_Equations
20. Ibrahim, A. R. (2005), Liquid Sloshing Dynamics: Theory and Applications. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2020-01-22]. Internetinė prieiga – https://books.google.lu/books?id=ctvhvH74ZzEC&pg=PA881&lpg=PA881&dq=ibrahim+2001+sloshing&source=bl&ots=z0NSsu_1u0&sig=ACfU3U3cHQ3w8fxrtEzG53AwphPMZRREg&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwj8r4OsganpAhXOzaQKHUc0DYAQ6AEwA3oECAgQAQ#v=onepage&q=ibrahim%202001%20sloshing&f=false
21. Timokha, A. (2010), A multimodal method for liquid sloshing in a two-dimensional circular tank. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2020-01-22]. Internetinė prieiga – https://www.researchgate.net/profile/Alexander_Timokha/publication/253628700_A_multimodal_method_for_liquid_sloshing_in_a_two-dimensional_circular_tank/links/542ac3540cf277d58e892b16/A-multimodal-method-for-liquid-sloshing-in-a-two-dimensional-circular-tank.pdf
22. Billing, J. R. and Patten, J. D. (2005), An assessment of tank truck roll stability, Report TP 14237 E, Centre for Surface Transportation Technology, National Research Council for Transport Canada, Transport Dangerous Goods Directorate, Ottawa. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2020-01-26]. Internetinė prieiga –

<http://road-transport-technology.org/Proceedings/9%20-%20ISHVWD/Session%208/An%20Assessment%20of%20Tank%20Truck%20Roll%20Stability%20-%20Billing.pdf>

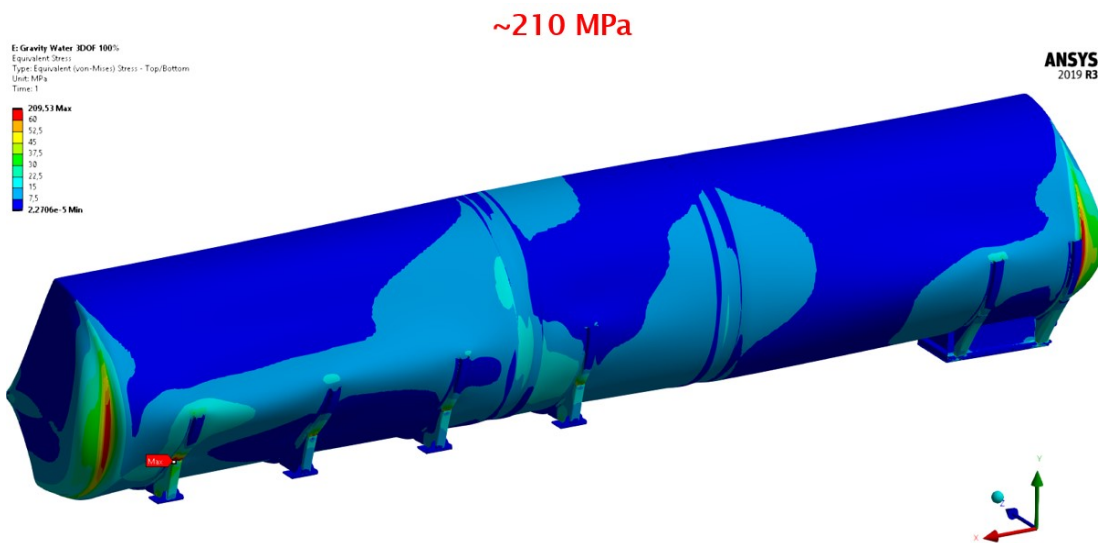
23. Wang Zhanqi S. Rakheja Sun Cunzhen (1995), Influence of Partition Location on the Braking Performance of a Partially-Filled Tank Truck. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2020-01-26]. Internetinė prieiga – https://www.researchgate.net/publication/29666774.8_Influence_of_Partition_Location_on_the_Braking_Performance_of_a_Partially-Filled_Tank_Truck
24. Budiansky, B. (1960), Sloshing of liquids In Circular Canals and Spherical Tanks, Journal of the Aerospace Sciences. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2020-01-26]. Internetinė prieiga – <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/801718.pdf>
25. Popov, G., S. Sankar, and T. Sankar, (1993). Dynamics of liquid sloshing in baffled and compartmented road containers. Journal of fluids and structures, [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2020-01-27]. Internetinė prieiga – <https://spectrum.library.concordia.ca/3081/1/NN68710.pdf>.
26. Jing-Han Wang ur Shi-Li Sun (2019). Study on liquid sloshing characteristics of a swaying rectangular tank with a rolling baffle. [Interaktyvus]. [Žiūrėta 2020-01-26]. Internetinė prieiga – <https://link.springer.com/article/10.1007/s10665-019-10017-7>

Priedai

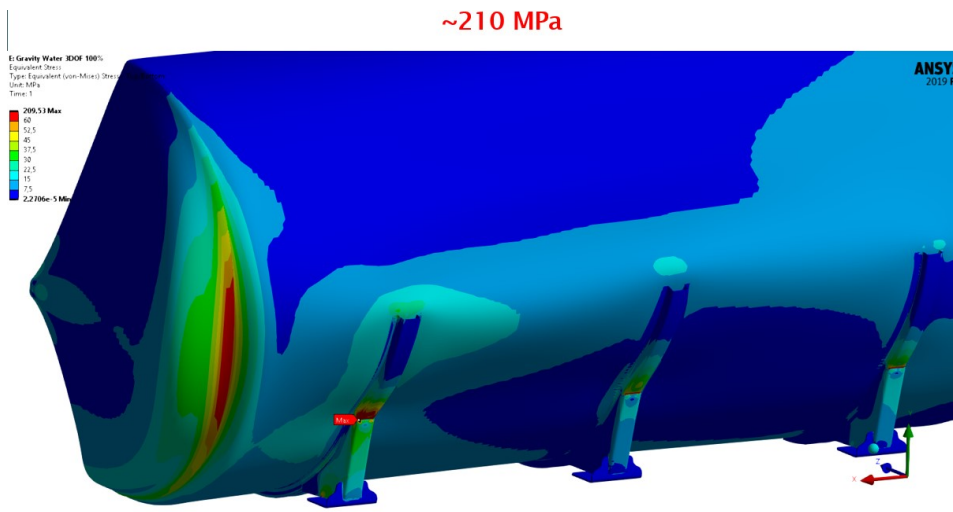
1. „Ansys“ programos rezultatai, kai 1 ir 3 cisternos dalis pilnai užpildžius. Užpildantis skystis – vanduo, kurio tankis yra 997 kg/m^3 : Poslinkių pasiskirstymas (a). Didžiausi gauti poslinkiai yra $\sim 1,3 \text{ mm}$; Įtempių pasiskirstymas konstrukcijoje (b). Didžiausi gautami įtempiai yra $\sim 210 \text{ MPa}$; Silpniausia konstrukcijos vieta iš arčiau (c); Įtempiai cisternos uždarančiuose galuose (d). Cisternos priekinėje dalyje (kairėje) įtempiai siekia $\sim 108 \text{ MPa}$, galinėje dalyje (dešinėje) siekia $\sim 90 \text{ MPa}$; Kevalams tenkančių įtempių pasiskirstymas (e). Didžiausia įtempių koncentracija, $\sim 109 \text{ MPa}$, susidaro kevalų priekinėje dalyje; Įtempių pasiskirstymas galinėje kevalų dalyje (f). Didžiausi gautami įtempiai yra $\sim 98 \text{ MPa}$.



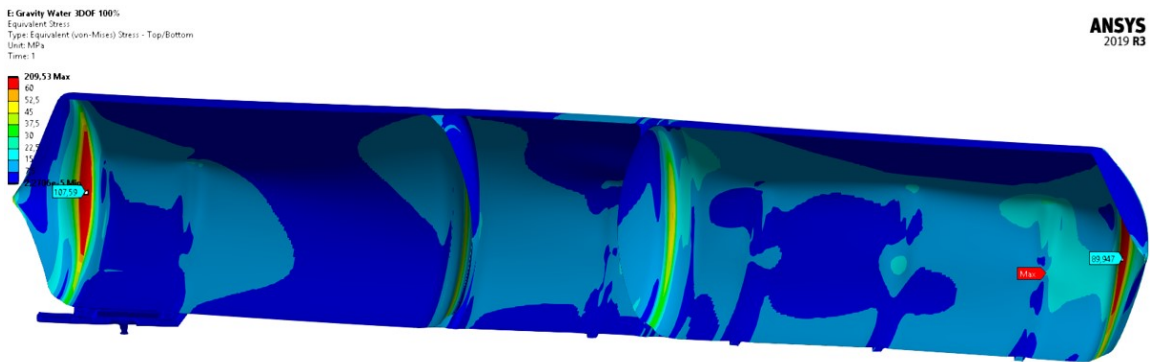
a).



b).

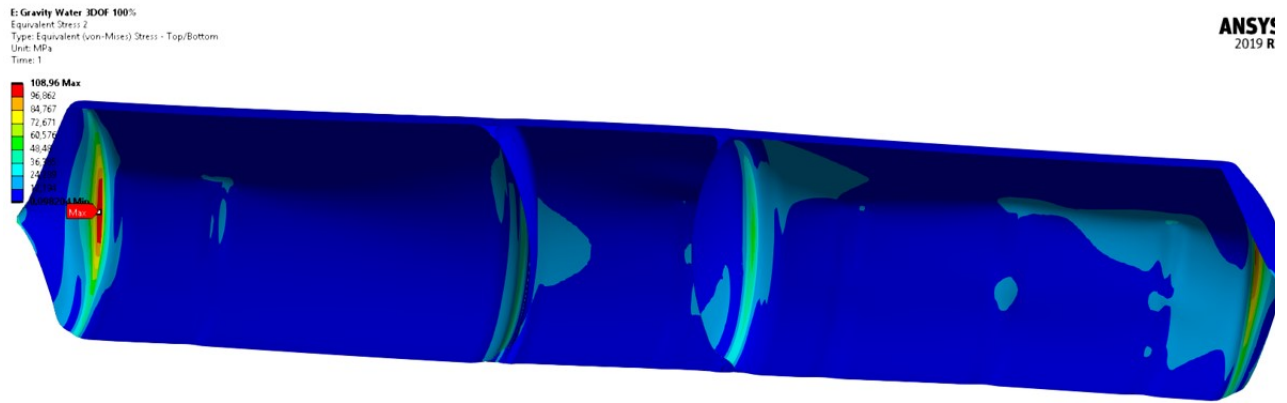


c)



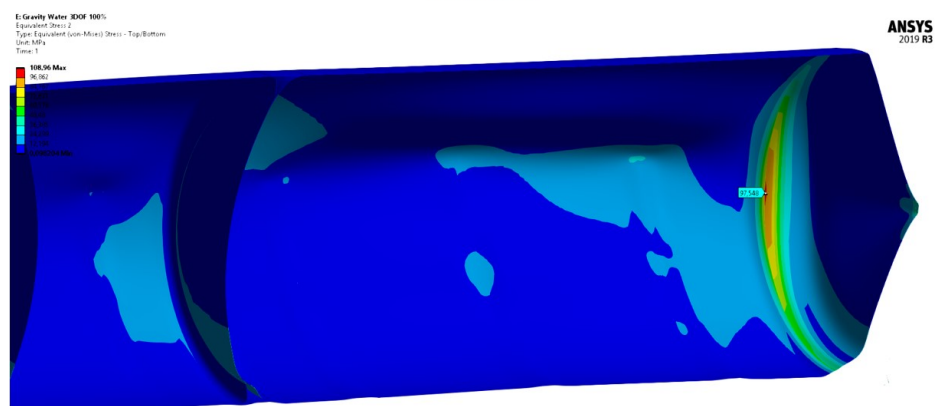
d)

~109 MPa



e)

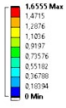
~98 MPa



f)

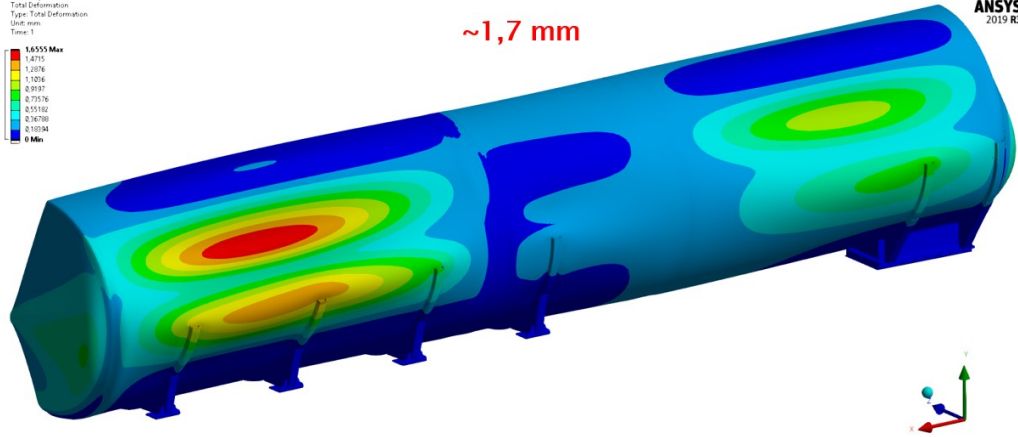
2. „Ansys“ programos rezultatai, kai skaičiavimai atliekami 1 ir 3 cisternos dalis užpildžius 80%. Užpildantis skystis – vanduo, kurio tankis yra 997 kg/m^3 . Poslinkių pasiskirstymas (a). Didžiausi gauti poslinkiai yra $\sim 1,7 \text{ mm}$.; Įtempių pasiskirstymas konstrukcijoje (b). Didžiausi gaunami įtempiai yra $\sim 185 \text{ Mpa}$.; Silpniausia konstrukcijos vieta iš arčiau (c); Kevalams tenkančių įtempių pasiskirstymas (d). Didžiausia įtempių koncentracija, $\sim 83 \text{ MPa}$, susidaro kevalų priekinėje dalyje; Silpniausia kevalų vieta iš arčiau (e).

E: Gravity Water 3DOF 80%
Total Deformation
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 1



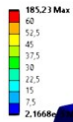
~1,7 mm

ANSYS
2019 R3



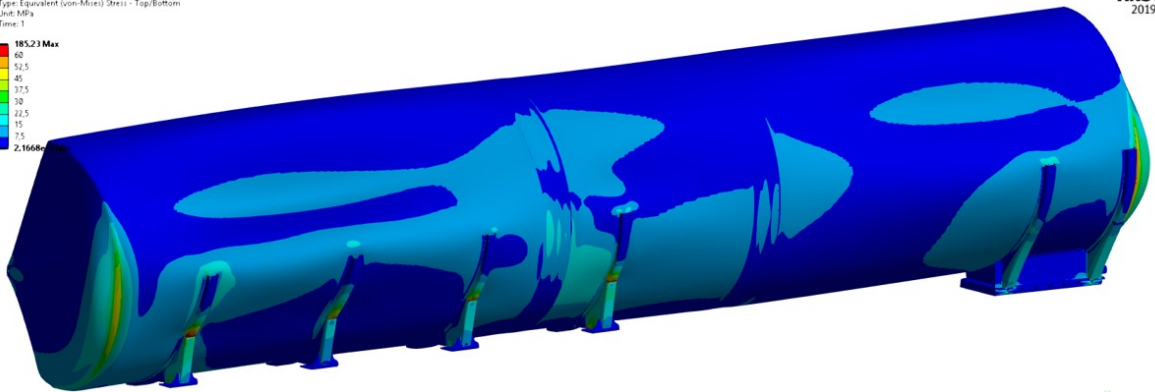
a)

E: Gravity Water 3DOF 80%
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1



~185 MPa

ANSYS
2019 R3



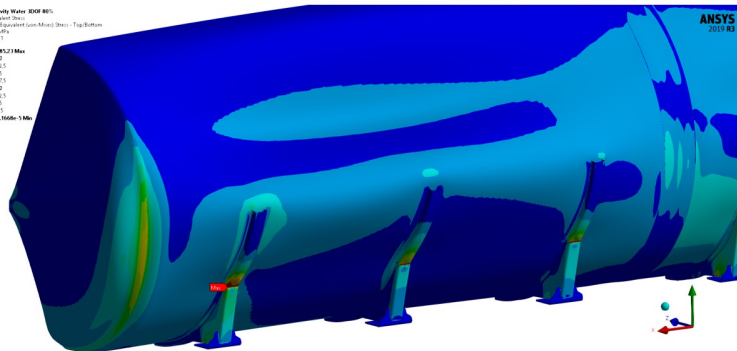
b)

~185 MPa

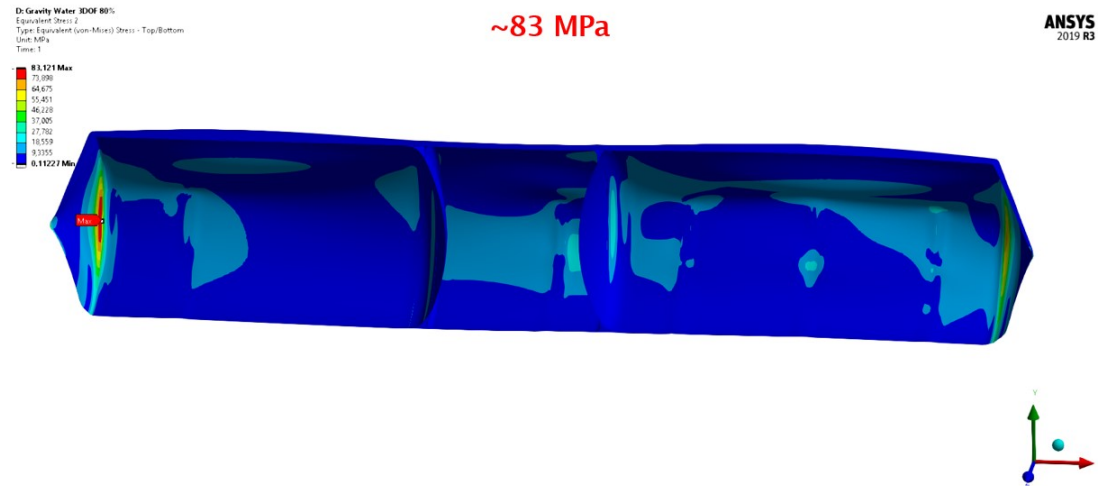
E: Gravity Water 3DOF 80%
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1



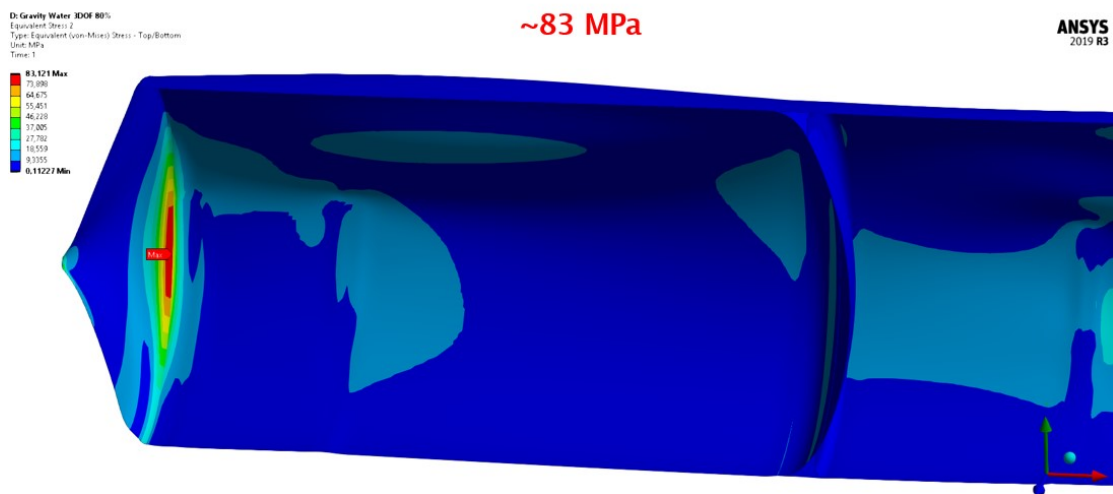
ANSYS
2019 R3



c)

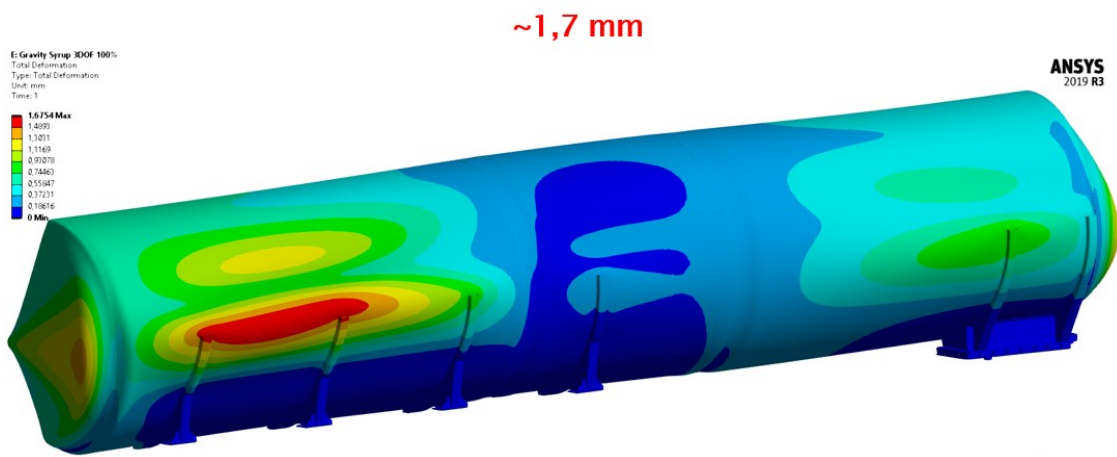


d)

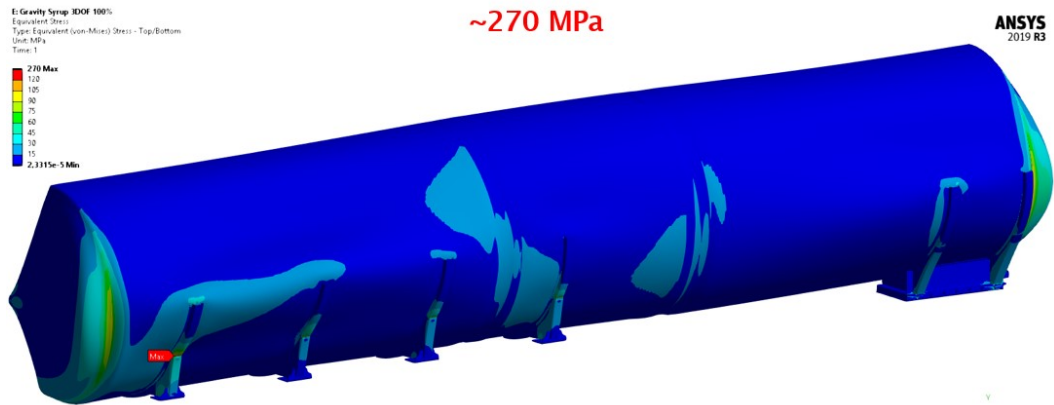


e)

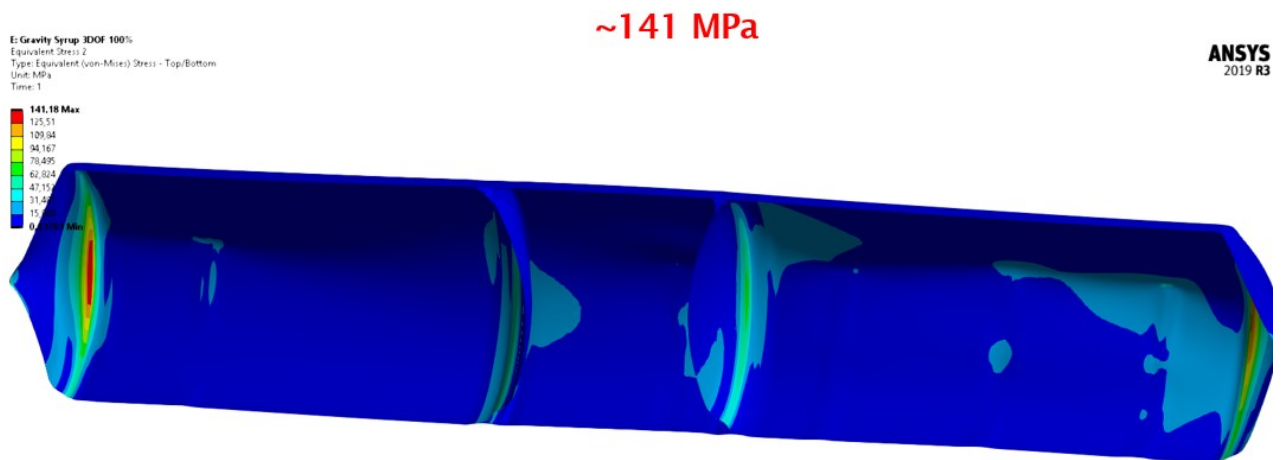
3. „Ansys“ programos rezultatai, kai skaičiavimai atliekami 1 ir 3 cisternos dalis užpildžius 100%. Užpildantis skystis – **sirupas**, kurio tankis yra **1300 kg/m³**. Poslinkių pasiskirstymas (a). Didžiausi gauti poslinkiai yra ~1,7mm.; Įtempių pasiskirstymas konstrukcijoje (b). Didžiausi gaunami įtempiai yra ~270 Mpa; Kevalams tenkančių įtempių pasiskirstymas (c). Didžiausia įtempių koncentracija, ~141 MPa, susidaro kevalų priekinėje dalyje.



a)

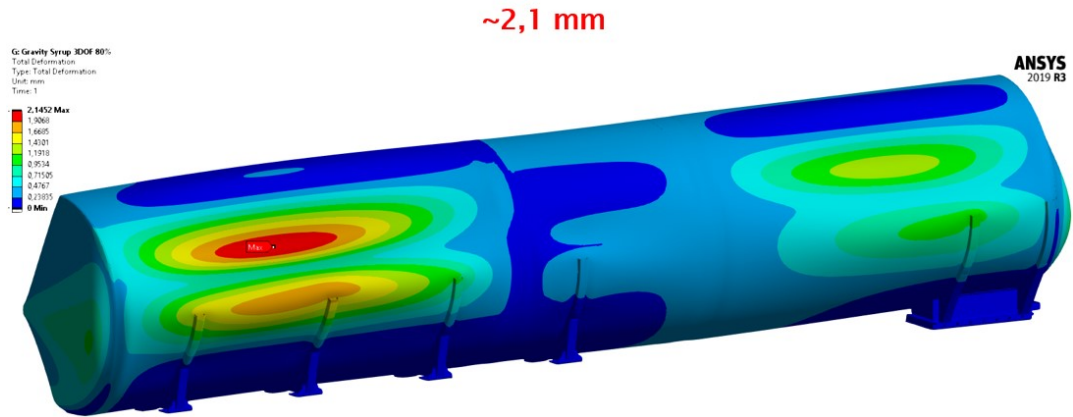


b)

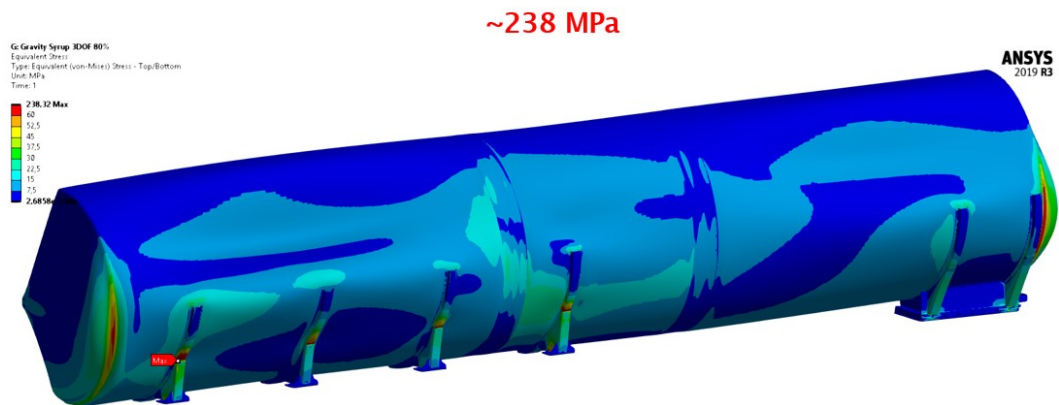


c)

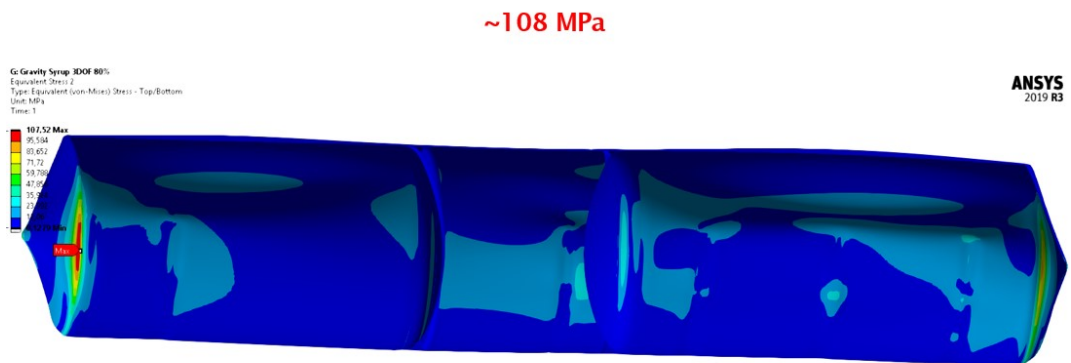
4. „Ansys“ programos rezultatai, kai skaičiavimai atliekami 1 ir 3 cisternos dalis užpildžius 80%. Užpildantis skystis – **sirupas**, kurio tankis yra **1300 kg/m³**. Poslinkių pasiskirstymas (a). Didžiausi gauti poslinkiai yra ~2,1mm.; Įtempių pasiskirstymas konstrukcijoje (b). Didžiausi gaunami įtempiai yra ~238 MPa; Kevalams tenkančių įtempių pasiskirstymas (c). Didžiausia įtempių koncentracija, ~108 MPa, susidaro kevalų priekinėje dalyje.



a)

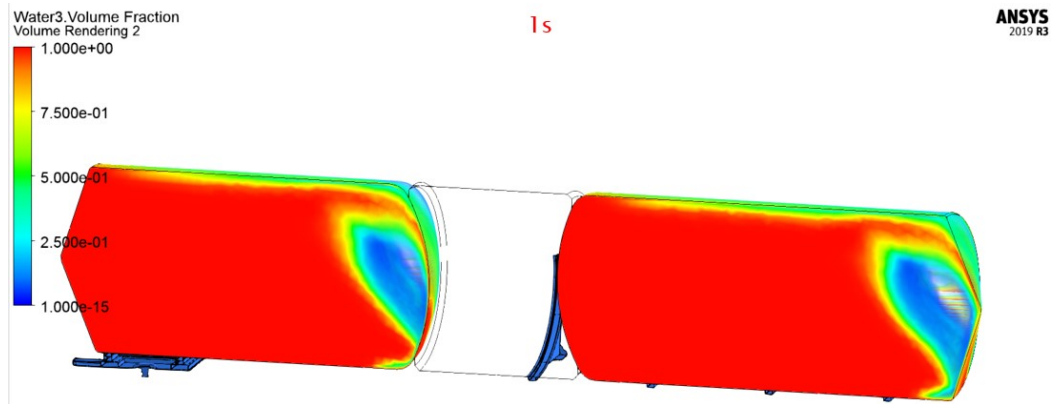


b)



c)

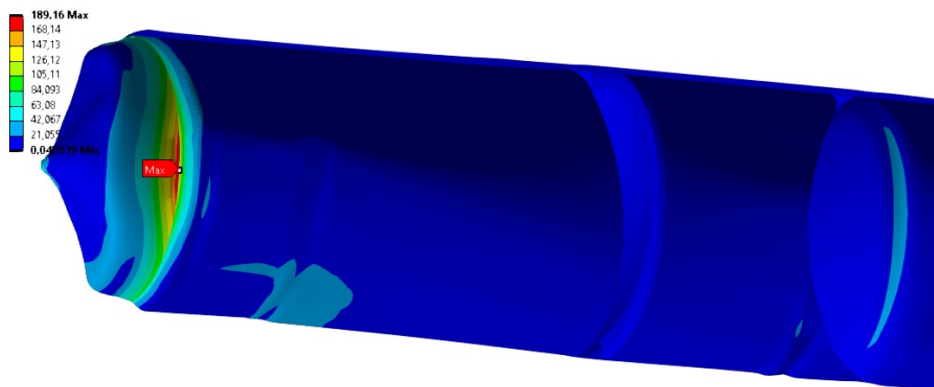
5. „Ansys“ programos rezultatai. Vandens teliuškavimas 3d cisternoje. Skysčio pasiskirstymas laiko momentu – 1s (a); Didžiausi įtempiai – 190 MPa, laiko momentu – 1s. (b); Skysčio pasiskirstymas laiko momentu – 2s. (c); Didžiausi įtempiai – 192 MPa, laiko momentu – 2s. (d); Skysčio pasiskirstymas laiko momentu – 4.5s. (e); Didžiausi įtempiai – 220 MPa, laiko momentu – 4.5s. (f); Didžiausi kevalų įtempiai – 76 MPa, laiko momentu – 4.5s (g).



a)

D: Transient Structural
Equivalent Stress 2
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 1

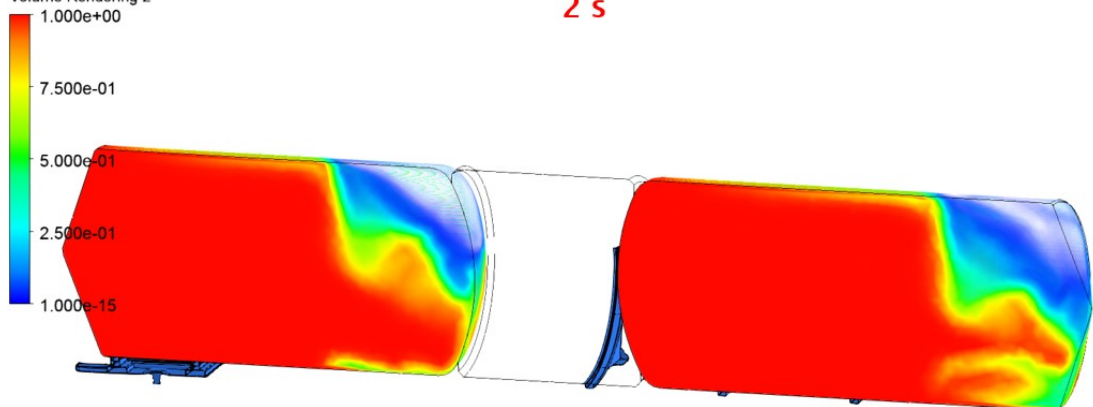
1 s, ~190 MPa



b)

Water3.Volume Fraction
Volume Rendering 2

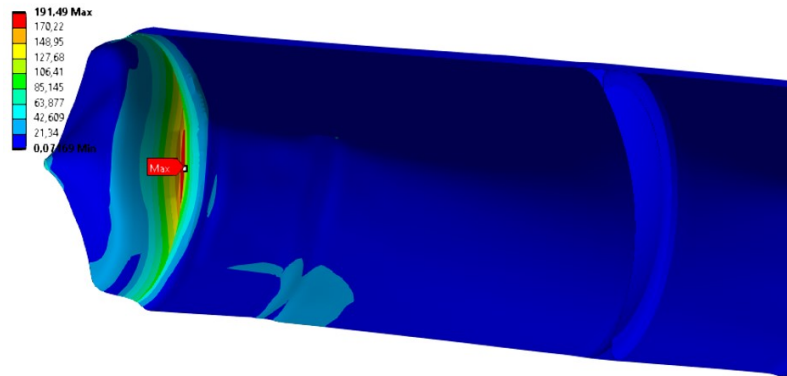
2 s



c)

D: Transient Structural
Equivalent Stress 2
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 2

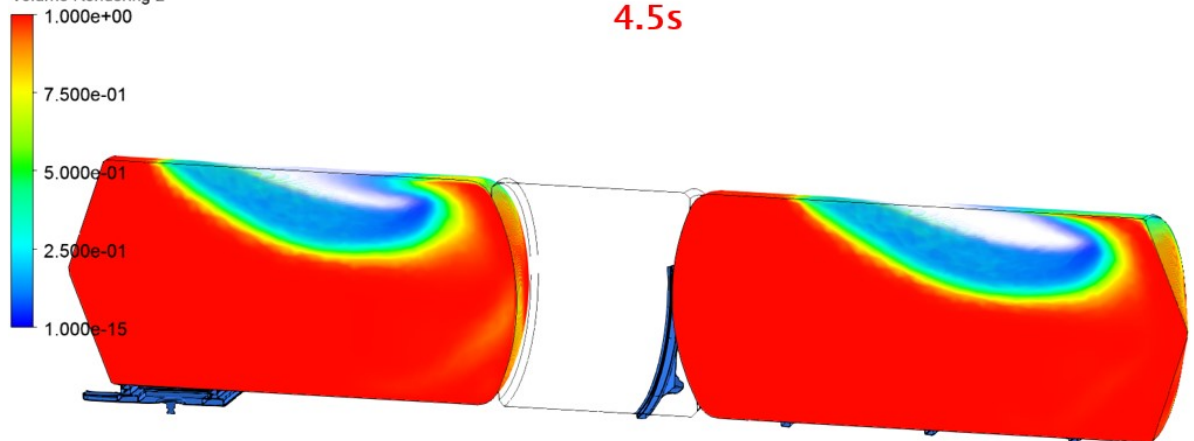
2 s, ~192 MPa



d)

Water3_Volume Fraction
Volume Rendering 2

4.5s

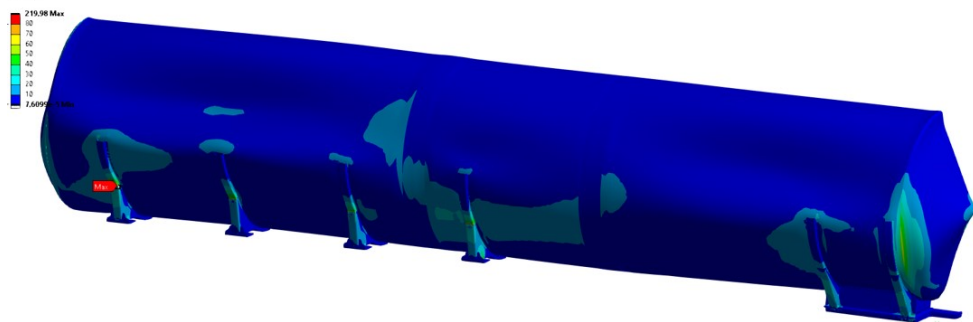


e)

D: Transient Structural
Equivalent Stress
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 4.5

4.5 s, ~220 MPa

ANSYS
2019 R3

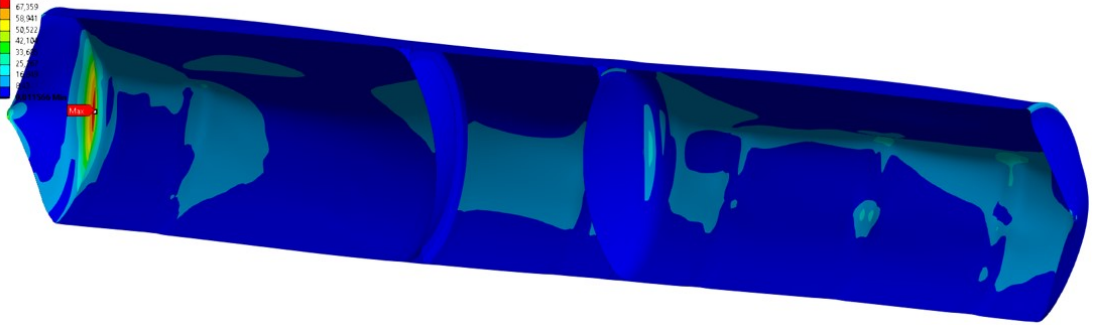
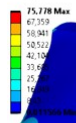


f)

4.5 s, ~76 MPa

ANSYS
2019 R3

D: Transient Structural
Equivalent Stress 2
Type: Equivalent (von-Mises) Stress - Top/Bottom
Unit: MPa
Time: 4.5



g)