

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS  
REGIONŲ PLĖTROS INSTITUTAS  
MECHANIKOS INŽINERIJA

Tomas Radžius

# **SLOPINTUVO PARAMETRŲ TYRIMAS**

Magistro darbas

ŠIAULIAI, 2019

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS  
REGIONŲ PLĖTROS INSTITUTAS  
MECHANIKOS INŽINERIJA

**TVIRTINU**

Inžinerinių studijų programų komiteto  
pirmininkas dr. Dainius Balbonas

2019-05-31

**SLOPINTUVO PARAMETRŲ TYRIMAS**

Magistro darbas

**Vadovas**

dr. A. Sabaliauskas

2019-05-31

**Recenzentas**

doc. dr. D. Čikotienė

2017-05-31

**Atliko**

MM-16 gr. stud.

T. Radžius

2019-05-31

ŠIAULIAI, 2019

TVIRTINU  
Inžinerinių studijų programų komiteto pirmininkas

Dainius Balbonas

2018 m. gruodžio mėn. 11 d.

## MAGISTRO DARBO UŽDUOTIS

Išduota magistrantui: Tomas Radžius

Darbo tema:

SLOPINTUVO PARAMETRŲ TYRIMAS

Patvirtinta katedros posėdžio protokolu Nr. INZK-3-18.

### 1. Darbo tikslas


Analizuoti šūvio, naudojant garso slopinimo įtaisą ir nenaudojant jo, metu sukuriama garso galią, palyginti skaitinio modeliavimo rezultatus su eksperimentinių tyrimų duomenimis.

### 2. Darbo struktūra

1. Įvadas
2. Tiriamų garso slopinimo įtaisų ir vidinės balistikos analizė
3. Garso slopintuvo efektyvumo skaitmeninis modeliavimas
4. Eksperimentinių bandymų ir skaitinio modelio rezultatų palyginimas
5. Išvados.
6. Literatūra.
7. Priedai.

Darbo pateikimo terminas 2019 m. gegužės mėn. 31 d.

Užduotį gavau \_\_\_\_\_  
Tomas Radžius  
(magistranto vardas, pavardė)

 \_\_\_\_\_ 2018-12-11  
(parašas, data)

Vadovas \_\_\_\_\_  
Artūras Sabaliauskas  
(pareigos, vardas, pavardė)

\_\_\_\_\_ 2018-12-11  
(parašas, data)

## TURINYS

SANTRAUKA .....	5
SUMMARY .....	6
LENTELIŲ SĄRAŠAS .....	7
PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS .....	8
1. ĮVADAS.....	10
2. TIRIAMŲ GARSO SLOPINIMO ĮTAISŲ IR VIDINĖS BALISTIKOS ANALIZĖ.....	12
2.1. Slopintuvų tipų ir konstrukcijų aprašymas .....	12
2.2. Šūvio balistika.....	16
2.3. Šūvio balistikos teorinių skaičiavimų tyrimas .....	20
2.4. Praktinis šūvio balistikos parametrų tyrimas M-16 ginklu.....	27
3. GARSO SLOPINTUVO EFEKTYVUMO SKAITMENINIS MODELIAVIMAS .....	32
3.1. Projektuoto slopintuvo modelis .....	32
3.2. Slopintuvo skaitinis modelis .....	35
3.3. Tinklelio sudarymas ir skaičiuotinių rezultatų parinkimas .....	39
4. EKSPERIMENTINIŲ BANDYMŲ IR SKAITINIO MODELIO REZULTATŲ PALYGINIMAS.....	42
4.1. Skaitinio modeliavimo rezultatai .....	42
4.2. Modeliuoto garso slopintuvo ekonominis savikainos vertinimas.....	46
5. IŠVADOS.....	52
LITERATŪRA .....	54
PRIEDAI .....	55

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS  
REGIONŲ PLĖTROS INSTITUTAS  
MECHANIKOS INŽINERIJA

Tomas Radžius. SLOPINTUVO PARAMETRŲ TYRIMAS. Magistranto baigiamasis darbas / vadovas dr. Artūras Sabaliauskas.

**SANTRAUKA**

Darbe pateikiami realūs garso galios matavimų rezultatai atliekant šūvius ginklu su garso slopinimo įtaisu ir be jo, taip pat eksperimentinių tyrimų ir skaičiavimų, naudojant skaitinius metodus rezultatai. Modeliavimas atliktas programa DS Solidworks flow simulation. Nustatyti garso galios ir dinaminio slėgio pasiskirstymų laukai atliekant šūvį su slopinimo įtaisu ir be jo. Projektuoto garso slopinimo įtaiso teorinių garso galios slopinimo kreivių sutapimas su eksperimentinėmis gautas sąlyginai geras su nežymiomis nuokrypomis. Teorinių ir eksperimentinių dinaminio slėgių kreivių grafikai pakankamai tiksliai sutapo ir nebuvo pastebėta didelių nuokrypių. Pateikta slopintuvo skaitinio modeliavimo metodika gali būti pritaikoma tiriant garso slopintuvų charakteristikas.

**Reikšminiai žodžiai:** garso galios slopinimas, inertinių dujų pasiskirstymas slopintuve, garso slopintuvo charakteristika

ŠIAULIŲ UNIVERSITETAS  
REGIONŲ PLĖTROS INSTITUTAS  
MECHANIKOS INŽINERIJA

Tomas Radžius. PARAMETRIC ANALYSIS OF THE SUPPRESSOR. Master's degree final work / research advisor Dr. Artūras Sabaliauskas.

**SUMMARY**

The topic of Master thesis is research of sound suppressor of rifle. In thesis are compared results of performed field tests of rifle shoots with and without sound suppressor. Also performed calculations of internal ballistics and gas extension processes. Performed 3D modelling of sound suppressor and performed flow simulation of gases with DS Solidworks flow simulation program. Determined sound power and pressure level distribution in models when shot performed with and without sound suppressor. Results of numerical models compared to theoretical models and real tests were relatively accurate. Numerical modeling method is suitable and accurate enough for use in research of sound suppressor characteristics.

**Keywords:** suppression of sound power, distribution on inert gas in suppressor, characteristics of sound suppressor

## LENTELIŲ SĄRAŠAS

2.1 Lentelė. Teorinių skaičiavimų įvestiniai duomenys .....	20
2.2 Lentelė. Įvestiniai duomenys .....	21
2.3 Lentelė. STANAG 4367 programos išvestiniai duomenys .....	22
2.4 Lentelė. M-16 tipo ginklą apibūdinantys duomenys .....	27
2.5 Lentelė. 5,56x45 NATO šaudmenį apibūdinantys duomenys .....	27
2.6 Lentelė. Slėgio jutiklį apibūdinantys duomenys.....	28
2.7 Lentelė. Tyrimo rezultatai .....	31
3.1 Lentelė. Aliuminio lydinių fizikinės charakteristikos .....	33
3.2 Lentelė. Skaitinio modeliavimo rezultatai.....	41
4.1 Lentelė. Skaitinių modeliavimų rezultatų palyginimas .....	45
4.2 Lentelė. Medžiagų kiekių žiniaraštis .....	47
4.3 Lentelė. Ruošinių iš AW 6060 T6 strypo kaina .....	50
5.1 Lentelė. Tyrimų metodų rezultatų palyginimas.....	52

## PAVEIKSLŲ SĄRAŠAS

2.1 Pav. Ginklo šūvio garso galia .....	12
2.2 Pav. Garso slopintuvų vidinės sandaros konstrukcijų įvairovė .....	13
2.3 Pav. Vieno taško tvirtinimas, atrama į plokštumą .....	14
2.4 Pav. Vieno taško tvirtinimas, atrama į cilindrinę dalį .....	14
2.5 Pav. Tvirtinimas dviem taškais, atrama į plokštumą ir cilindrinę dalį .....	14
2.6 Pav. Ginklo sistemos skerspjūvis .....	17
2.7 Pav. Slėgio kitimo grafikas ginklo vamzdyje .....	19
2.8 Pav. STANAG 4367 programos langas .....	22
2.9 Pav. Šaudmens greičio ir nuskrieto atstumo grafikas .....	23
2.10 Pav. Šaudmens greičio ir laiko grafikas .....	23
2.11 Pav. Slėgio už šaudmens ir nuskrieto atstumo grafikas .....	24
2.12 Pav. Slėgio už šaudmens ir laiko grafikas .....	24
2.13 Pav. Nuskrieto kelio ir temperatūros kitimo grafikas .....	25
2.14 Pav. Laiko ir temperatūros kitimo grafikas .....	26
2.15 Pav. 5,56x45 NATO šaudmuo .....	28
2.16 Pav. Kistler 6215 slėgio jutiklio schema .....	29
2.17 Pav. Įtaisų įtvirtinimo ir pozicionavimo schema .....	30
2.18 Pav. Slėgio kitimas ginklo vamzdyje naudojant 5,56x45 NATO šaudmenis .....	31
3.1 Pav. Slėgio priklausomybė nuo tūrio esant įvairioms temperatūroms .....	32
3.2 Pav. Projektuotas vidinis segmentas .....	34
3.3 Pav. Slopintuvo kompiuterinis modelis .....	34
3.4 Pav. Slopintuvo, ginklo vamzdžio ir aplinkos erdvės skaitinis modelis .....	36
3.5 Pav. Anglies dvideginio dinaminė klampa .....	37
3.6 Pav. Anglies dvideginio savitoji šiluma .....	37
3.7 Pav. Inertinių dujų slėgio impulsas kraštinėje sąlygoje .....	38
3.8 Pav. Ginklo vamzdžio ir aplinkos erdvės skaitinis modelis .....	39
3.9 Pav. Bazinis tinklelis .....	40
3.10 Pav. Skaitinio modeliavimo vizualus atvaizdavimas .....	41
3.11 Pav. Skaitinio modeliavimo vizualus atvaizdavimas .....	41
4.1 Pav. Dinaminio slėgio ir garso galios laukų pasiskirstymas be slopintuvo .....	43
4.2 Pav. Dinaminio slėgio pasiskirstymas be slopintuvo .....	43
4.3 Pav. Dinaminio slėgio ir garso galios laukų pasiskirstymas su slopintuvu .....	44
4.4 Pav. Dinaminio slėgio pasiskirstymas su slopintuvu .....	44



4.5 Pav. Slėgio kitimo grafikas.....	46
4.6 Pav. Skaitinio garso slopintuvo modelio pjūvis .....	47
4.7 Pav. Slopintuvo vidinis segmentas .....	48
4.8 Pav. Slopintuvo tvirtinimo flanšas.....	49
4.9 Pav. Slopintuvo pirminė išsiplėtimo kamera.....	49
4.10 Pav. Slopintuvo fiksacinis flanšas .....	50
4.11 Pav. Slopintuvo išorinis korpusas.....	51

## 1. ĮVADAS

**Darbo temos aktualumas.** Garso slopinimas šūvio metu kaip reiškinys mechanikos inžinerijos moksluose jau nėra naujas ir netikėtas tyrimų objektas (tiesa, iki šiol jį aktyviau galbūt tyrė balistikos srities atstovai). Garso slopinimas dėl griežtėjančių bet kokio įtaiso ar įrenginio skleidžiamo garso reglamentuojančių teisės normų (o paskutiniu metu – ypač aktyviai) tiriamas įvairiausių sričių mokslininkų, pavyzdžiui, tyrimai atliekami balistikos (Быков Н.В.; Владимиров В.С.; Зеленоцов В.В. Численное моделирование внутренней баллистики цилиндроконических стволов с использованием пластических снарядов, *Наука и Образование*, #3, 2012), karo pramonės (USAMS. 1968. *Engineering design handbook. Gun series. Muzzle devices*. Headquarters, U.S. army material command) srityse. Kuriami ir patentuojami modernesni ir geresnėmis garso slopinimo savybėmis pasižymintys slopintuvai ir garso slopinimo būdai (Burdyko, M. 2010. *Šūvio garso slopinimo būdas ir slopintuvas*. Patentas. Lietuvos Respublikos Valstybinis patentų biuras). Tyrimų temų, susijusių su garso slopinimu spektras platus, pradedant statybinių vinių šaudyklių slopintuvais ir baigiant šaunamųjų ginklų slopintuvais.

**Darbo temos naujumas.** Preliminariais duomenimis (Wanda Embar, 2016) pasaulyje iš viso yra ~875 milijonų legaliai išduotų šaunamųjų ginklų, kurių 22,9 % priklauso kariuomenėms, o net 74,3 % priklauso civiliams gyventojams, kurie šaunamuosius ginklus naudoja savigynai, medžioklei ar sportui. Šūvio metu ginklo, be garso slopinimo įtaiso, sukuriama garso galia gali siekti nuo 120dB iki 170dB ir gali sukelti psichologinį, fiziologinį poveikį ar net akustinę traumą bei šoką (Visuomenės sveikatos biuras). Kaip skelbia užsienio spauda Nick Wing, Jessica Carro The Huffington Post vien Jungtinėse Amerikos Valstijose 2016 m. buvo registruota 1,3 milijono legalių šaunamųjų ginklų slopintuvų, kurie naudojami sportui ar medžioklei.

Lietuvoje šaunamųjų ginklų garso slopintuvai ir jų parametrai tyrinėti ir nagrinėti menkai. Todėl šiame kontekste poreikis atskleisti šaunamųjų ginklų garso slopintuvų sandaros, struktūros įtaką kokybiniais parametrams sąlygoja temos aktualumą, o pasirinktas skaitinio modeliavimo tyrimo tipas sąlygoja ir tyrimo naujumą.

**Tyrimo objektas.** Šaunamojo ginklo garso slopinimo įtaisas, jo konstrukcinių sprendinių įtaka kokybiškam šūvio metu sukuriamos garso galios slopinimui.

**Tyrimo tikslas.** Analizuoti šūvio, naudojant garso slopinimo įtaisą ir nenaudojant jo, metu sukuriamą garso galią, palyginti skaitinio modeliavimo rezultatus su eksperimentinių tyrimų duomenimis.

### ***Tyrimo uždaviniai:***

1. Išsiaiškinti šūvio ginklu metu sukuriamos garso galios ir kitų parametrų priklausomybę ir skaičiavimo metodikas nuo ginklo, šaudmens ir slopinimo įtaiso parametrų.
2. Atlikti tiriamo slopintuvo skaitinį modeliavimą.
3. Palyginti skaitinio modeliavimo rezultatus su eksperimentiniais duomenimis.
4. Pagrįsti skaitinio modeliavimo naudas lyginant su realiais eksperimentais.

***Tyrimo metodai.*** Magistro baigiamajame darbe taikyti tokie tyrimo metodai:

1. Mokslinės literatūros analizė: išsiaiškinta ir nustatyta ginklo, šaudmens ir slopintuvo parametrų įtaka šūvio metu sukuriamai garso galiai ir kitiems parametrams.
2. Dokumentų turinio analizė: išanalizuoti patentai, komercinė informacija apie šaudmenis, ginklus, slopintuvus bei jų charakteristikas, parametrų priklausomybes ir leistinus nuokrypius.
3. Kompiuterinis ir skaitinis modeliavimas: kompiuterinio ir skaitinio modeliavimo programos SolidWorks Flow Simulation terpėje sukurti slopintuvo kompiuteriniai ir skaitiniai modeliai, kuriais remiantis atliekamas tyrimas. Gauti skaitinio modeliavimo duomenys analizuojami ir lyginami su realių eksperimentinių bandymų rezultatais norint įsitikinti pasirinkto modeliavimo būdo rezultatų tikslumu.

### ***Praktinė darbo reikšmė***

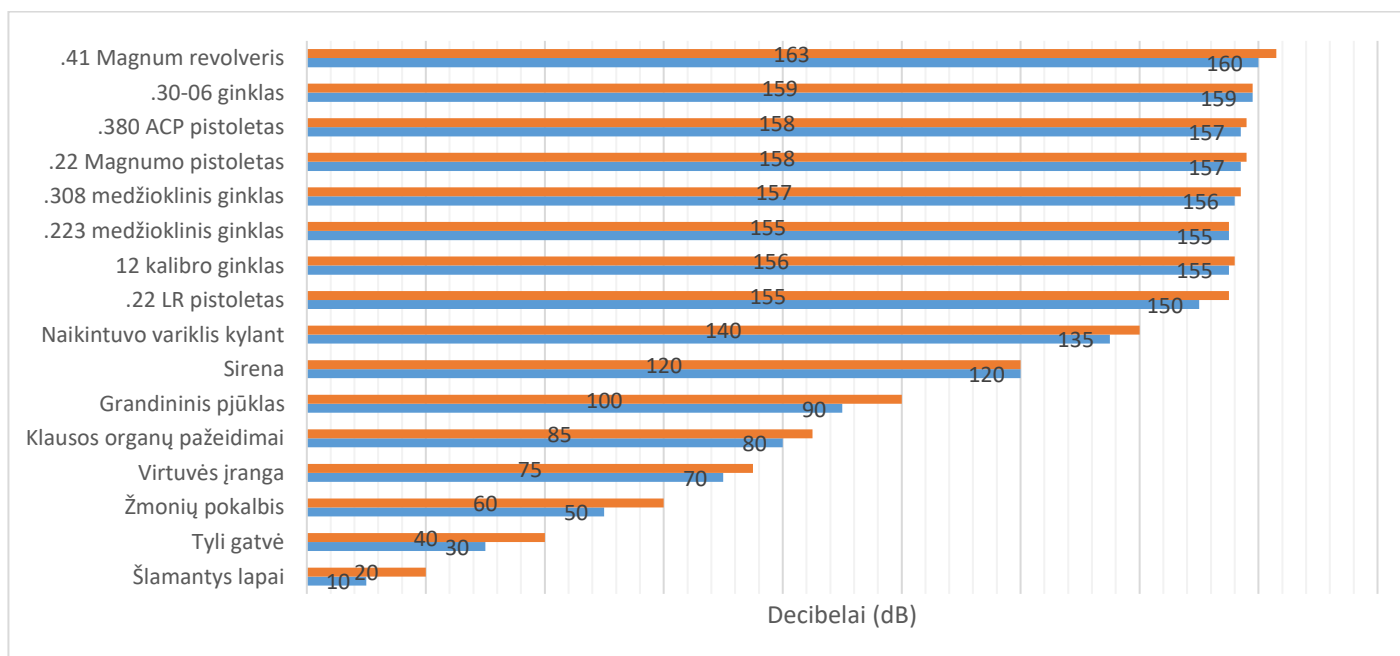
Darbe analizuojama ir pateikiama metodika gali būti naudojama nustatant pagrindinius naujai projektuojamų ir kuriamų arba tobulinamų, vystomų garso slopintuvų elementus, medžiagiškumą, konstrukcinius sprendinius, kurie formuoja ir nulemia garso slopintuvo pagrindinius kokybinius parametrus.

## 2. TIRIAMŲ GARSO SLOPINIMO ĮTAISŲ IR VIDINĖS BALISTIKOS ANALIZĖ

### 2.1. Slopintuvų tipų ir konstrukcijų aprašymas

Garso slopinimo įtaisų pirmieji pasaulyje sukūrė ir ėmė platinti komerciniais tikslais amerikiečiai dar 1902m. Pirmojo slopintuvo konstruktorius buvo garsus amerikietis Hiram Percy Maxim, jis užpatentavo savo išradimą 1909 – 03 – 20d. ir pavadino jį „Maxim Silencer“. Pirmieji tokių įtaisų privalumus įvertino ne sukarintos ar specialiosios pajėgos, o medžiotojai, kuriems įtaisas suteikė galimybę po pirmojo netaiklaus šūvio pasitaisyti antruoju, kuomet medžiojami žvėrys nebūdavo išgąsdinami ir neišsilakstydavo. Šaunamojo ginklo slopintuvas, tai 20 – 30 kartų didesnio tūrio nei ginklo vamzdis įtaisas, kuris yra šaunamojo ginklo vamzdžio dalis arba dažniausiai atskiras įtaisas užsukamas ant ginklo vamzdžio ir yra skirtas slopinti šūvio metu girdimą šūvio garsą ir/arba vizualiai matomą liepsną. Slopintuvai pagal panaudojimo paskirtį yra skirstomi į tokias grupes:

1. Garso slopintuvai, kurių pirminė paskirtis yra apsaugoti šaulį ir jo klausos organus nuo pažeidimų, kadangi šūvio metu ginklo vamzdyje susidaro didelis slėgis (pateikta 2.1 Pav. Ginklo šūvio garso galia), o kulkai palikus vamzdį girdimas labai aštrus ir skardus garsas, kuris pasiekia aukštas garso galios vertes siekiančias ir dažnai viršijančias žmogaus klausos organų skausmo ribą (140dB).



2.1 Pav. Ginklo šūvio garso galia

Bet kokio tipo slopintuvo paskirtis – sukurti didelio tūrio, gero šiluminio laidumo terpę už kulkos susidariusioms inertinėms dujoms plėstis ko pasekoje yra sumažinamas šių inertinių dujų

sukeliamas slėgis, kuris gali siekti ~ 400 kPa, o garso galia ir yra dydis išreiškiamas energija, kuri pernešama per tam tikrą laiko vienetą o apibūdinama kaip klausos organų suvokiamas garso pojūtis ir gali garso slopinimo įtaisais būti nuslopinta 10 – 30% lyginant su garso galia atliekant šūvį tokio paties kalibro ginklu ir tokiu pačiu šaudmeniu. Šis dydis yra subjektyvi garso charakteristika, susijusi su objektyvia jo charakteristika - stipriu. Garso galia skaičiuojama:

$$L_N = 10 \times \lg \left( \frac{W}{W_0} \right)$$

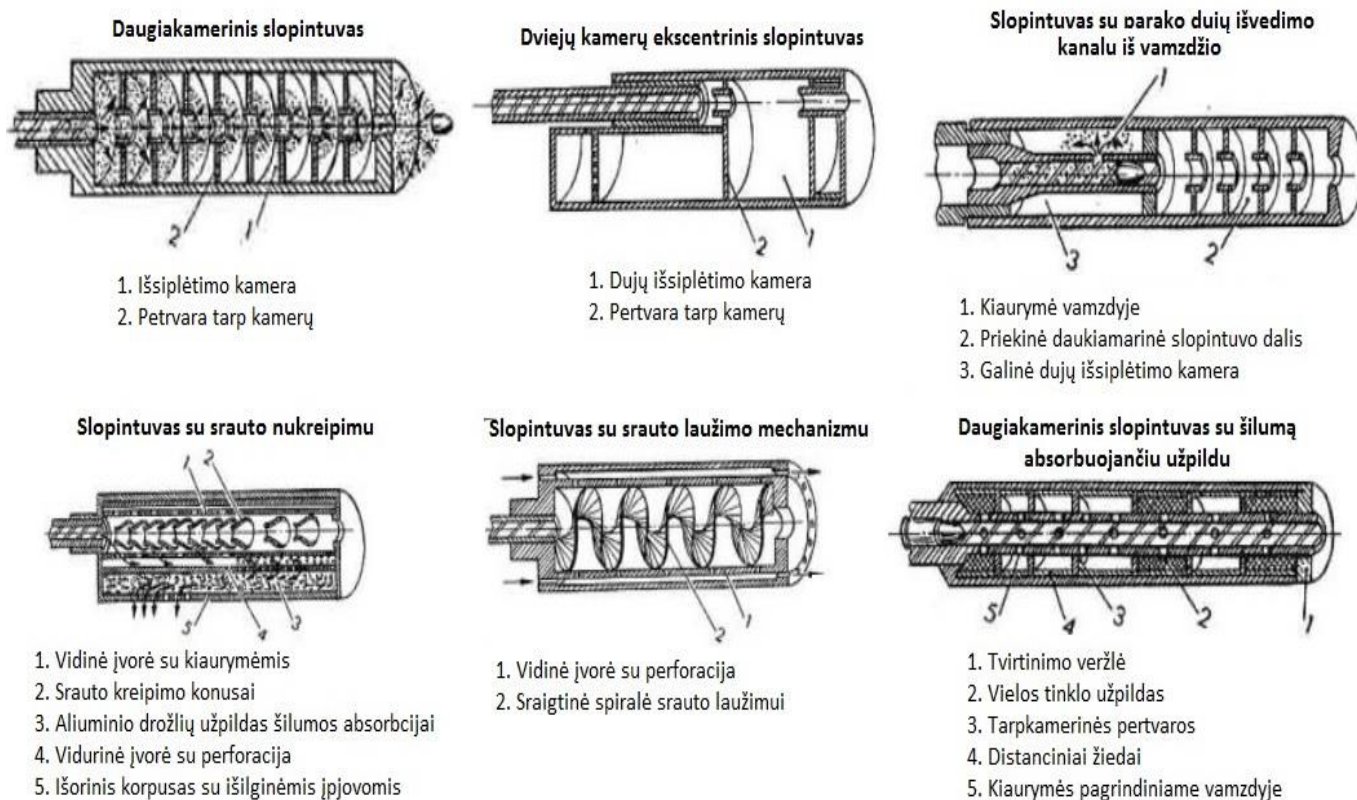
2.1

Čia  $L_N$  – garso galios lygis (dB);

$W$  – pilnai išspinduliuota energija per laiko vienetą;

$W_0$  – konstanta, šiuo atveju  $10^{-12}$  W (žmogaus girdos slenkstis)

Garso slopinimui projektuojami įtaisai būna įvairių konstrukcijų ir modifikacijų su vidiniais segmentais (pateikta 2.2 Pav.), kurie kreipia ar laužia parako sprogo sukeltas smūgines bangas, sugeria arba kitaip išsklaido šilumą.



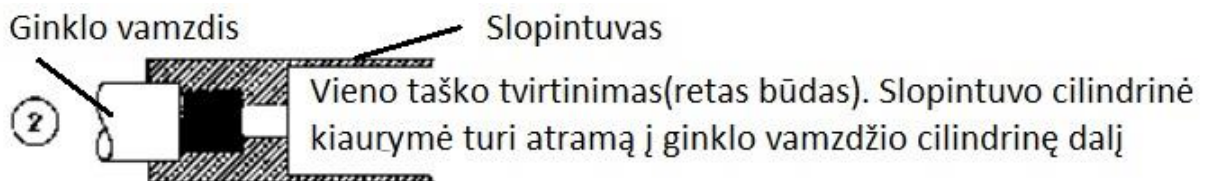
2.2 Pav. Garso slopintuvų vidinės sandaros konstrukcijų įvairovė

Taip pat slopintuvai gali skirtis montavimo prie ginklo vamzdžio būdu (2.2 pav., 2.3 pav., 2.4 pav.), kuris iš esmės priklauso nuo ginklo kalibro ir slopintuvo ilgio.

- Vieno taško tvirtinimas (pateikta 2.3 Pav. Vieno taško tvirtinimas, atrama į plokštumą ir 2.4 Pav. Vieno taško tvirtinimas, atrama į cilindrinę dalį). Toks tvirtinimo būdas ginklų ir slopintuvų gamintojų yra naudojamas nedidelio kalibro ginklams kurių šovinių tūtos diametras neviršija  $\text{Ø}12,7\text{mm.}$ , o slopintuvo svoris nesiekia 1,8kg.

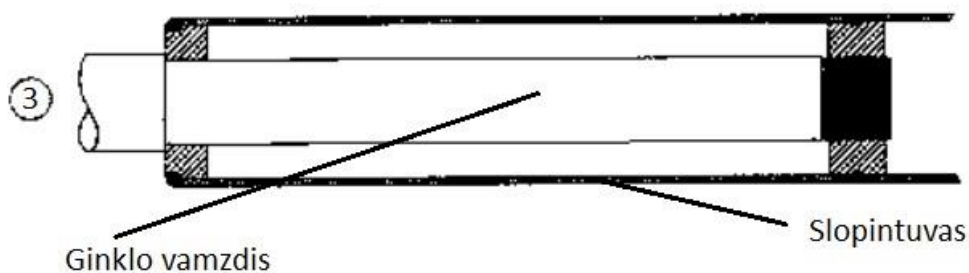


2.3 Pav. Vieno taško tvirtinimas, atrama į plokštumą



2.4 Pav. Vieno taško tvirtinimas, atrama į cilindrinę dalį

- Dviejų taškų tvirtinimas (pateikta 2.5 Pav. Tvirtinimas dviem taškais, atrama į plokštumą ir cilindrinę dalį). Toks tvirtinimo būdas yra naudojamas didelio kalibro ginklams. Tokio tipo tvirtinimas yra pranašesnis už vieno taško tvirtinimą tuo, kad yra tvirtesnis, turi didesnę sąlyčio su ginklo vamzdžiu plotą ir suteikia didesnę taikymosi tikslumą.



2.5 Pav. Tvirtinimas dviem taškais, atrama į plokštumą ir cilindrinę dalį

2. Liepsnos slopintuvai - įtaisai šaunamojo ginklo vamzdžio gale, mažinantys vamzdžio liepsną, nes nukreipia išsiveržiančias dujas tokia kryptimi, kuri netrukdo šauliui. Pvz., M16 šautuvo liepsnos slopintuvas nukreipia dujas taip, kad jos nesiveržtų aukštyn. Klasikiniai XIX a. šautuvai turėjo ilgus vamzdžius, kuriuose parakas sudegdavo visiškai, o parako dujos besiplėsdamos gana stipriai ataušdavo, todėl jais šaudant vamzdžio liepsnos nesimato, per vamzdžio galą išsiveržia

tik dūmų pliūpsnis. Tuo tarpu tų pačių šautuvų nupjautavamzdžiai variantai paprastai šauda su vamzdžio liepsna. Daugelis šiuolaikinių ginklų turi trumpus vamzdžius, todėl vamzdžio liepsna yra didelė problema. Yra keli pagrindiniai liepsnos slopintuvų tipai:

- „Anties snapas“ (angl. *duckbill*): turi viršutinę ir apatinę plokšteles, kurios neleidžia dujoms sklįsti aukštyn (kad neakintų šaulio) ir žemyn (kad šaudant atsigulus ar iš apkasos dujų čiurkšlė nekeltų dulkių debesėlių), tik į šonus. Tokius liepsnos slopintuvus turi kai kurie Mk 43 ir M16 variantai. Tokių slopintuvų yda yra tarpas tarp plokštelių, kuriuo vamzdis kliūva už aplinkinių daiktų.
- „Narvelis“ (angl. *birdcage*): Panašus į „anties snapą“, bet gale turi žiedą, kuris pridengia šoninius plyšius.
- Kūgiškas gaubtelis: Toks slopintuvas pailgina vamzdį, o kadangi jis kūgiškai platėja, jame dujos plečiasi ir aušta, todėl nustoja švytėti. Tokius slopintuvus turi kulkosvaidžiai ir daug kitų Antrojo pasaulinio karo laikų ar kiek vėlesnių ginklų.

Keičiant liepsnos slopintuvo plokštelių formą ir padėtį galima jam suteikti ir kitų funkcijų. Pvz., didesnė apatinė plokštelė dalį dujų nukreipia aukštyn, todėl vamzdis šūvio metu šokteli žemyn. Tai iš dalies kompensuoja vamzdžio šoktelėjimą dėl buožės ir vamzdžio išilginių ašių nesutapimo.

Slopintuvų gamyboje dažniausiai naudojami chromo molibdeno (dažniausiai 4130 markės) plieno lydiniai, nerūdijantis plienas, aliuminio lydiniai arba titano lydiniai ir tik labai išimtiniais atvejais anglies pluoštas. Chromo molibdeno plieno lydiniai yra tvirti ir patvarūs, lengvai dažomi. Aliuminio lydinų detalės yra lengvos (beveik trečdaliu lengvesnės nei plieninės) tačiau trapios ir neatsparios smūgiams, labai sparčiai susidėvi srieginės kiaurymės skirtos srieginiams detalių sujungimams (dažniausiai slopintuvo tvirtinimo prie ginklo vamzdžio flanšas). Taip pat aliuminio lydinio detalės tampa labai minkštos ir nepatikimos kuomet temperatūra slopintuve pasiekia 480°C ir tuomet jos ima lydytis (plieninės detalės šiuo atveju atsparesnės aukštomis temperatūroms ir gali atlaikyti 1480°C temperatūrą).

Pasaulyje kiekviena valstybė įstatymais reglamentuoja ginklų, šaudmenų ir jų priedų įsigyjimą, naudojimo tikslą ir paskirtį. Lietuvos Respublikoje dokumentas, kuriame yra aiškinamos sąvokos, pateikiama ginklų klasifikacija, nurodomos veiklos kurioms galima naudoti šaunamuosius ginklus, įtaisus ir reikmenis, nurodomos atsakomybės ir prievolės šaunamųjų ginklų ir jų priedų naudotojams yra aprašytos Lietuvos Respublikos ginklų ir šaudmenų kontrolės įstatyme, kaip ir daugumoje pasaulio šalių, tačiau nėra vieningo ir visuotinai priimto standarto, kriterijų ir bandymo atlikimo metodikos, kuria remiantis būtų galima vertinti garso slopintuvus ir jų kokybinius parametrus, tačiau pagrindiniu, bet ne vieninteliu esminiu kokybiniu šaunamojo ginklo garso

slopintuvo rodikliu yra laikomas garso galios pokytis, kurį galima užfiksuoti atliekant šūvį su garso slopinimo įtaisu ir be jo.

## 2.2. Šūvio balistika

Mokslas, mechanikos skyrius, kuris tiria ir nagrinėja sviedinių, šaudmenų konstrukcijos ir aplinkos sąlygų priklausomybę ir įtaką procesams vykstantiems šūvio metu – Balistika. Balistikos mokslą sudaro kelios dalys:

- Vidinė balistika – nagrinėja ir tiria šaudmens judėjimo etapą ginklo vamzdyje nuo jo pajudėjimo iš vietos (parako užtaiso detonacija) iki visiško pasišalinimo iš ginklo vamzdžio;
- Tarpinė balistika – nagrinėja ir tiria šaudmens judėjimą laiko momentu kuomet karštos inertinės dujos ir šaudmuo palieka ginklo vamzdį ir patenka į aplinką;
- Išorinė balistika – nagrinėja ir tiria laisvą šaudmens judėjimą ore;
- Galinė balistika – tiria ir nagrinėja šaudmens sąveiką su tikslu (taikiniu), šaudmens ar jo skeveldrų, nuolaužų dalių judėjimą tikslu (taikinyje).

Vidinės balistikos formuluotėmis ir skyriais remiasi užsienio autoriai (Vaughn, Harold R. 1998 *Rifle Accuracy Facts*), kurie nagrinėja ir tyrinėja parako degimo ir inertinių dujų susidarymą uždaroje sistemoje (ginklo vamzdyje), šūvio metu ginklo vamzdyje vykstančius procesus, jų tarpusavio ryšius bei jų įtaką šūvio tikslumui, konstrukcinius šaunamojo ginklo vamzdžio ypatumus, užtaiso sąlygas.

Svarbu suprasti, kad šūvis susideda iš keletos etapų, kurie šaulio sąlyginai gali būti traktuojami kaip vientisas šūvis, tačiau iš tiesų šūvis susideda iš tokių etapų:

- Paruošiamasis etapas, kurio pradžia sulyginama su momentu, kuomet gaidukas uždega paraką iki momento kuomet šaunamasis užtaisas įsirežia į ginklo vamzdžio graižtvas, o esant lygiam vamzdžiui šaunamasis užtaisas įgyja pagreitį ir pradeda judėti;
- Šūvio etapas, kuris prasideda nuo šaunamojo užtaiso judėjimo pradžios, o trunka iki visiško parako užtaiso sudegimo ginklo vamzdyje. Šiuo etapu kulka skrieja ginklo vamzdžiu;
- Šaudmens skriejimo etapas, kuris vyksta visiškai sudegus parakui, tačiau susidariusios karštos inertinės dujos toliau besiplėsdamos ginklo vamzdyje stumia šaudmenį didele jėga nukreipta į vamzdžio kanalą;
- Dujų sklaidos etapas prasideda tuomet, kai šaudmuo iššauna pro ginklo vamzdžio kanalą o inertinės dujos sklaidosi ir maišosi su aplinkos oru. Šiame etape parako dujų



slėgis į ginklo vamzžio galą beveik susilygina su atmosferos slėgiu, šaudmuo pasiekia maksimalų greitį o už jo susiformuoja smūgio banga ir šūvio liepsna.

Nagrinėjant vidinės balistikos procesus vykstančius ginklų sistemose (pateikta 2.6 Pav. Ginklo sistemos skerspjūvis) svarbiausi skaičiuojamieji duomenys yra vamzdyje susidarantis slėgis ir kulkos skriejimo greitis.



2.6 Pav. Ginklo sistemos skerspjūvis

$L$  – ginklo vamzdžio ilgis (m)

$X_p$  – šaudmens nuskrietas atstumas (m)

$A$  – ginklo vamzdžio skerspjūvio plotas ( $m^2$ )

$M$  – šaudmens masė (slug)

$P_p$  – slėgis susidarantis už šaudmens (kPa)

Kadangi ginklo sistemą laikome inercine atskaitos sistema, kurioje kūno judesio kiekio kitimo greitis yra proporcingas veikiančiai jėgai galima naudoti antrąjį Niutono dėsnį. Šioje inercinėje sistemoje judėjimo greitis yra pakankamai mažas ir kūno masę galime laikyti pastovia ir pasinaudoti diferenciacijos taisyklėmis:

$$\Sigma F = 0 = ma = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad 2.2$$

Kadangi veikianti jėga ginklo sistemoje gali būti sulyginama su slėgio ir ginklo vamzdžio skerspjūvio ploto sandauga, pertvarkę lygtis gauname:

$$F = ma = PA; \quad 2.3$$

$$F = m \frac{d^2x}{dt^2} = m \frac{dv}{dt} \quad 2.4$$

Transformuojam Antrąjį Niutono dėsnį ir gauname:

$$F = m \frac{dv_p}{dt} = mv_p \frac{dv_p}{dx_p} = P_p A \quad 2.5$$

Aliেকে integravimą, kad gauti energijos formulės išraišką:

$$mv_p \frac{dv_p}{dx_p} = P_p A \rightarrow mv_p dv_p = P_p A dx_p \quad 2.6$$

$$\int mv_p dv_p = \int_{i=0}^L P_p A dx_p, \text{ kur} \quad 2.7$$

$$\frac{1}{L} \int_{i=0}^L P_p A dx_p = \bar{P} \text{ (vidutinis slėgis)} \quad 2.8$$

Kadangi, šioje sistemoje ginklo vamzdžio skerspjūvio plotas yra nekintantis (konstanta), tuomet,

$$\frac{1}{2} mv_p^2 = A \int_{i=0}^L P_p A dx_p = A \bar{P} L, \text{ kur} \quad 2.9$$

$$\bar{P} L = P_p dx_p \quad 2.10$$

Iš sudarytų formuluočių galima skaičiuoti šaudmens greitį ginklo vamdyje:

$$v_p = \left( \frac{2PAL}{m} \right)^{1/2} \quad 2.11$$

Iš sudarytų formuluočių galima skaičiuoti slėgį susidarantį už šaudmens ginklo vamdyje:

$$\bar{P} = \frac{mv_p^2}{2AL} \quad 2.12$$

Aukščiau pateikiamuose formulių išvedimuose neįvertintos kitos veikiančios jėgos, kurios turi įtakos skaičiavimų tikslumui, tokios kaip šaudmens į ginklo graižtvas ar lygiavamzdžio ginklo sienelės trinties jėga, šaudmens sukimosi aplink savo ašį jėga, šilumos sklaidos jėga, todėl atliekant tolimesnius skaičiavimus būtina įvesti pataisos koeficientą, kad skaičiavimų rezultatai būtų tikslensi.

Įvedus pataisos koeficientą šaudmens greičio ginklo vamzdyje formulės išraiška gaunama tokia:

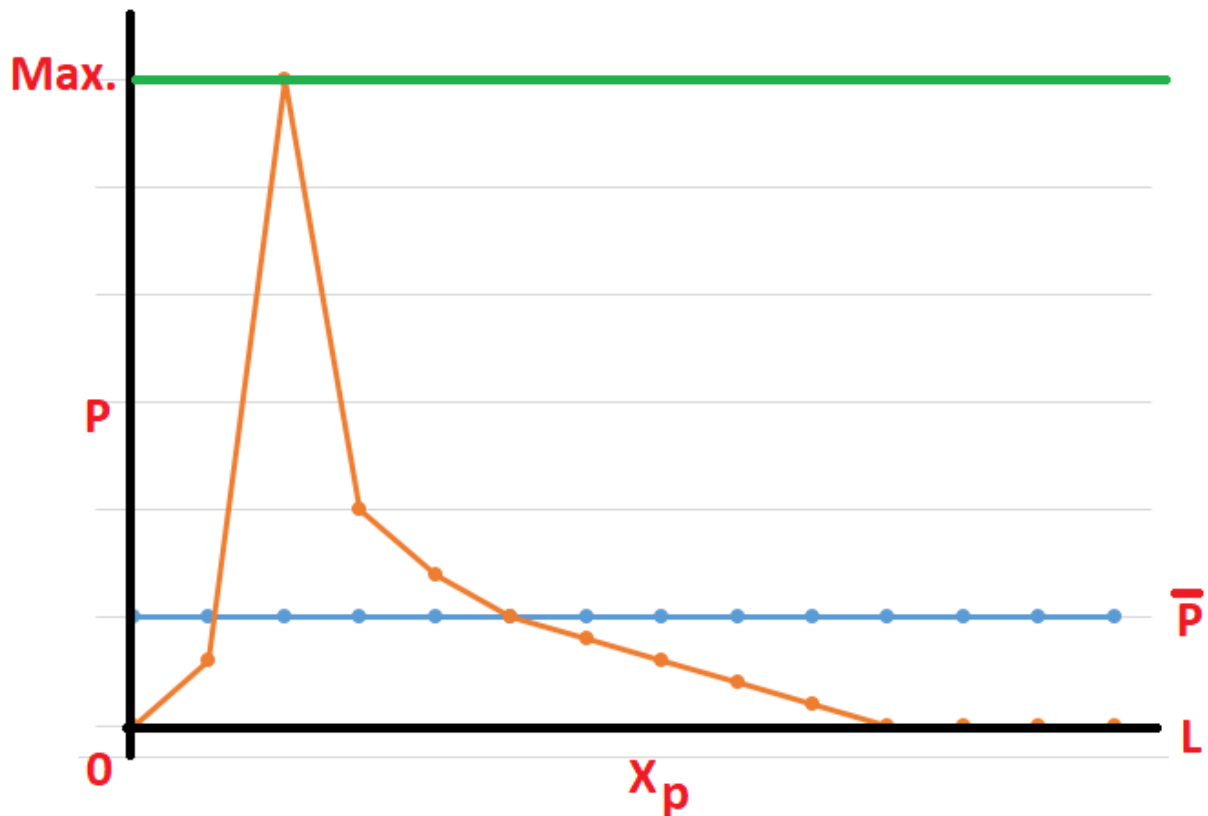
$$v_p = \left( \frac{2P_m AL}{c_f m} \right)^{1/2} \quad 2.13$$

Įvedus pataisos koeficientą už šaudmens susidarančio slėgio ginklo vamzdyje formulės išraiška gaunama tokia:

$$P_m = \frac{c_f m v_p^2}{2AL}$$

2.14

Remiantis duomenų šaltiniais vidutinis slėgis susidarantis už šaudmens ginklo vamzdyje sudaro tik apie 25% pikinio slėgio vertės (pateikta 2.7 Pav. Slėgio kitimo grafikas ginklo vamzdyje



2.7 Pav. Slėgio kitimo grafikas ginklo vamzdyje

$P$  – pikinis slėgis

$\bar{P}$  – vidutinis slėgis

$L$  – ginklo vamzdžio ilgis

$X_p$  – šaudmens nuskrietas atstumas

Tolimesniuose skaičiavimuose naudosiu tik pikinių slėgių vertes pateikiamas šaudmenų gamintojų ir platintojų techniniuose duomenyse, todėl aukščiau pateiktas šaudmens greičio ir už šaudmens susidarancio slėgio ginklo vamzdyje formules koreguoju sekančiai:

Atsižvelgus į pikinio ir vidutinio slėgio skirtumą šaudmens greičio ginklo vamzdyje formulės išraiška gaunama tokia:

$$v_p = 2 \left( \frac{2P_m AL}{c_f m} \right)^{1/2} \quad 2.15$$

Atsižvelgus į pikinio ir vidutinio slėgio skirtumą už šaudmens susidarancio vidutinio slėgio ginklo vamzdyje formulės išraiška gaunama tokia:

$$P_m = \frac{mv_p^2}{8AL} \quad 2.16$$

### 2.3. Šūvio balistikos teorinių skaičiavimų tyrimas

Naudojant vidinės balistikos formuluotes ir ankstesniame poskyryje išvestas skaičiavimams naudotinas formules galima atlikti pasirinktos ginklo sistemos (pateikta 2.1 Lentelė. Teorinių skaičiavimų įvestiniai duomenys) analizę ir skaičiavimus.

2.1 Lentelė. Teorinių skaičiavimų įvestiniai duomenys

ĮVESTINIAI DUOMENYS			
Žymuo	Pavadinimas	Reikšmė/dydis	Mato vnt.
$D$	Ginklo vamzdžio kiaurymės skersmuo	5,7	mm
$L$	Ginklo vamzdžio ilgis	600	mm
$m$	Šaudmens masė	12,31	g
$V_p$	Šaudmens pradinis skriejimo greitis	945	m/s
$cal$	Ginklo kalibras	5,56x45 NATO	

Iš įvestinių duomenų reikia apskaičiuoti ginklo vamzdžio skerspjūvio plotą:

$$A = 0,0000255 \text{ m}^2$$

Naudojantis įvestiniais ir apskaičiuotais duomenimis galima skaičiuoti už šaudmens susidarantį slėgį:

$$P_m = \frac{mv_p^2}{8AL} \quad 2.17$$

$$P_m = \frac{0,01231 \times 945^2}{2 \times 0,0000255 \times 0,6} = \frac{10993,13}{0,0000306} = 359252614 \text{ Pa} \approx 359 \text{ MPa}$$

Naudojantis baigtinių elementų metodu skaičiavimus atliekančia programa *Interior Ballistics: STANAG 4367* siekiama patikrinti pirminių skaičiavimų metu gautas reikšmes. Į šią programą įvedus įvestinius ginklo sistemos duomenis (pateikta 2.2 Lentelė. Įvestiniai duomenys) bus apskaičiuoti ir pateikti išvestiniai duomenys ir grafinis keletos parametrų kitimo atvaizdavimas grafikuose. Programa yra demonstracinio pobūdžio versijos pasiekama ir laisvai prieinama interneto vartotojams.

2.2 Lentelė. Įvestiniai duomenys

ĮVESTINIAI DUOMENYS PROGRAMAI STANAG 4367		
Parametro pavadinimas	Reikšmė	Mato vnt.
Vamzdžio skerspjūvio plotas	$2,55 \times 10^{-5}$	$m^2$
Šaudmens masė	$1,231 \times 10^{-2}$	$kg$
Ginklo vamzdžio ilgis	0,6	$m$
Tuščio ginklo vamzdžio tūris	$2,1 \times 10^{-6}$	$m^3$
Pradinė ginklo vamzdžio ir parako temperatūra	20	$^{\circ}C$
Oro šilumos laidumo koeficientas	11,35	$\frac{W}{m^2/K}$
Ginklo vamzdžio sienelės storis	$2 \times 10^{-3}$	$m$
Ginklo vamzdžio medžiagos tankis	7860	$kg/m^3$
Ginklo vamzdžio šiluminė talpa	460	$\frac{J}{kg/K}$
Sprogstamojo užtaiso masė	$1,56 \times 10^{-3}$	$kg$
	$1,018 \times 10^6$	$J/kg$
Adiabatinė užtaiso užsiliepsnojimo temperatūra	2470	$K$
Sprogstamojo užtaiso komponentų savitosios šilumos koeficientas	1,25	
Sprogstamojo užtaiso tankis	1390	$kg/m^3$

Programa gana sudėtinga naudotis, nes reikia papildomų žinių teisingam duomenų įvedimui. Vartotojo sąsaja paprasta (pateikta 2.8 Pav. STANAG 4367 programos langas), gana primityvi, tačiau tinkamai atlieka ir vedlio principu veda galutinį vartotoją nuo įvestinių duomenų įvedimo iki išvestinių duomenų apskaičiavimo. Programoje yra pateiktos kai kurių šaunamųjų ginklų ir šaudmenų charakteristikos, aprašytos plačiau paplitusios sprogstamosios medžiagos ir jų mišiniai.

5,56x45 NATO

Weapon and Cartridge Powder and Igniter Grains Sizes Friction Extras

X, Y Position  
 0  
 0  
 Axis Y Axis X Others

Area of Base of Projectile: 2,55E-5 m<sup>2</sup> Chamber Wall Thickness heated: 0,002 m  
 Mass of Projectile: 0,01231 kg Density of Chamber Wall Steel: 7860 kg/m<sup>3</sup>  
 Travel of Projectile at Muzzle: 0,6 m Heat Capacity of Steel: 460 J/kg/K  
 Volume of Empty Chamber: 2,1E-6 m<sup>3</sup> Fraction of Work done by Friction: 0  
 Twist of Rifling: 31,5 cal/turn Mass of Recoiling Parts: 100000 kg  
 Parasitic Volume: 0 m<sup>3</sup> Recoil Resistance Force: 100000 N  
 Initial Temp. of Chamber Wall: 20 °C Computation Step: 0,1 ms  
 Free Heat Transfer Coefficient: 11,35 W/m<sup>2</sup>/K

Load  
 Save  
 Start  
 Clone I Clone II Clear

Rel. Surf. S/Sg [-] / Z [-]  
 Pmean P0 Pg / Time [ms]  
 Pmean P0 Pg / Travel [m]

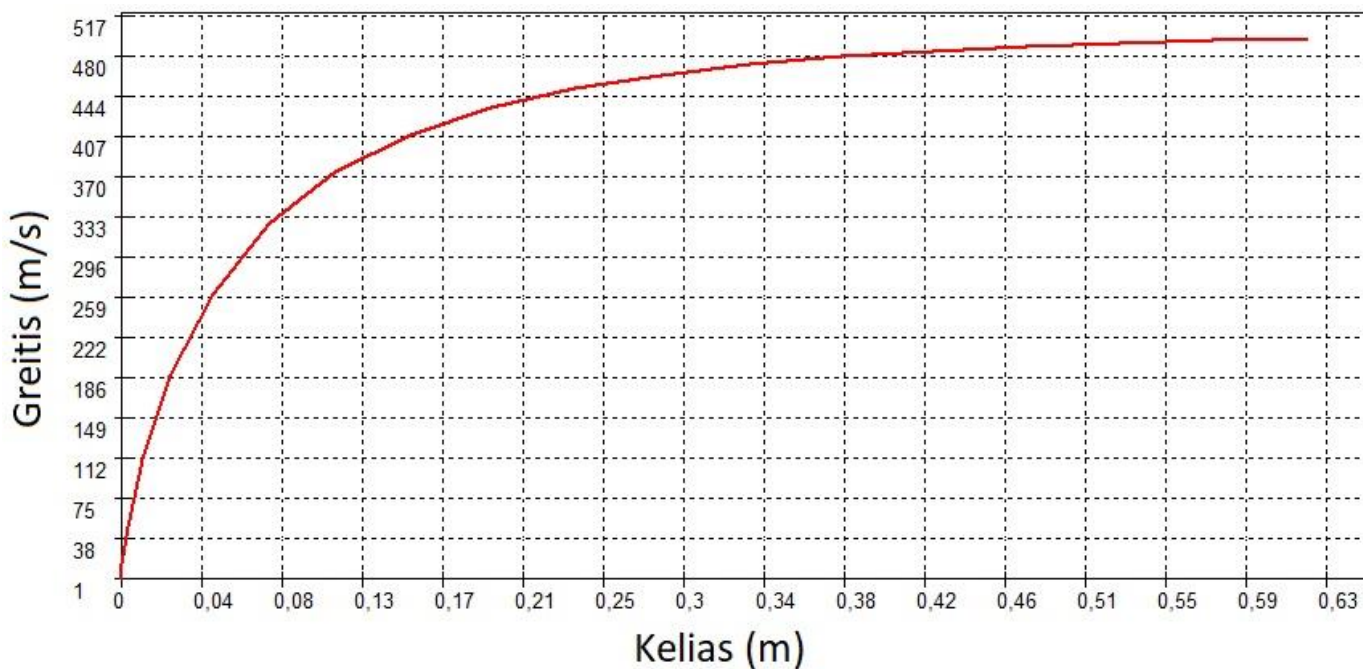
2.8 Pav. STANAG 4367 programos langas

Tolimesniems skaičiavimams atlikti gauti išvestiniai duomenys su *Interior Ballistics: STANAG 4367* (pateikta 2.3 Lentelė. STANAG 4367 programos išvestiniai duomenys).

2.3 Lentelė. STANAG 4367 programos išvestiniai duomenys

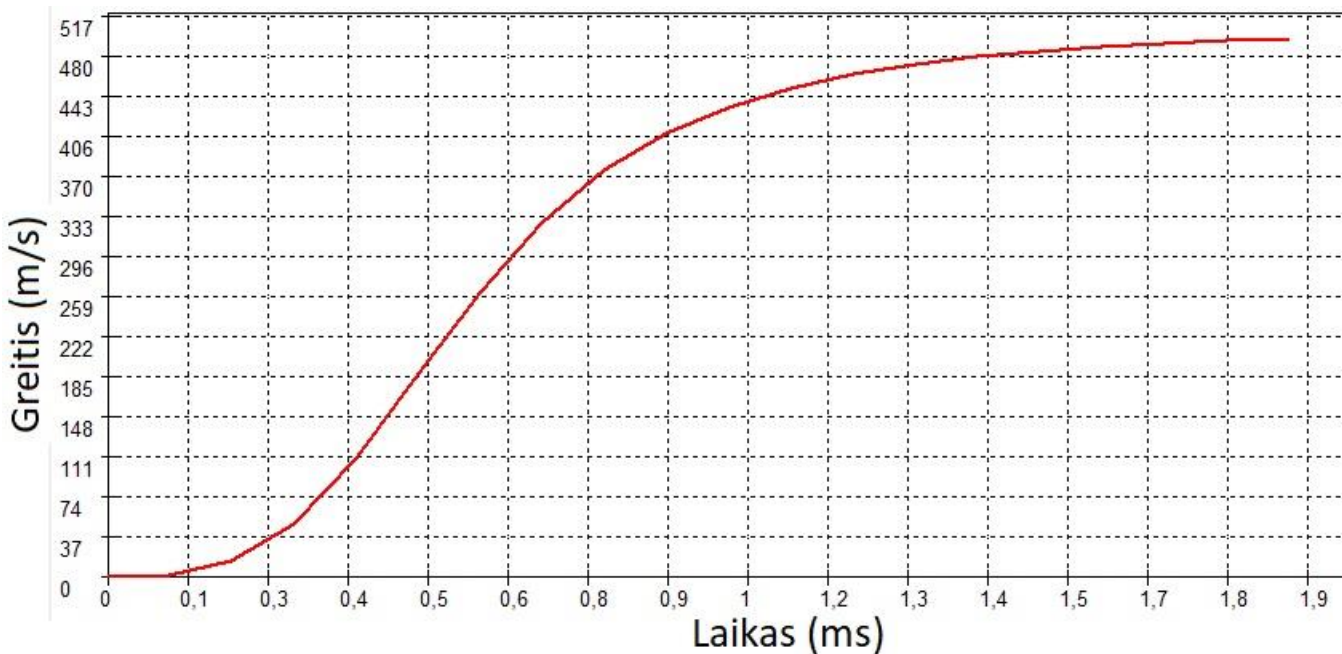
IŠVESTINIAI PROGRAMOS STANAG 4367 PATEIKTI DUOMENYS		
		Mato vienetas
Laiko momentas	0,7	ms
Sudegusio sporgstamojo užtaiso dalis	80,9	%
Kūno poslinkis	0,6	m
Šaudmens greitis paliekant vamzdį	495,52	m/s
Maksimalus fiksuotas susidaręs slėgis už šaudmens	365	MPa
Slėgis už šaudmens duotuoju laiko momentu	298	MPa
Inertinių dujų temperatūra	2084	K
Bendra sporgstamojo užtaiso sukurta energija	6434	J
Energijos nuostoliai dėl oro pasipriešinimo	7	J
Energijos nuostoliai dėl trinties jėgų	160	J
Energijos nuostoliai dėl šilumos laidumo kūnuose	3452	J

Visi programos *Interior Ballistics STANAG 4367* pateikti išvestiniai duomenys. Be išvestinių duomenų sistema pateikia ir kai kuriuos grafikus (pateikta 2.9 Pav. Šaudmens greičio ir nuskrieto atstumo grafikas) reikalingus tolimesniai analizei ir duomenų interpretavimui.



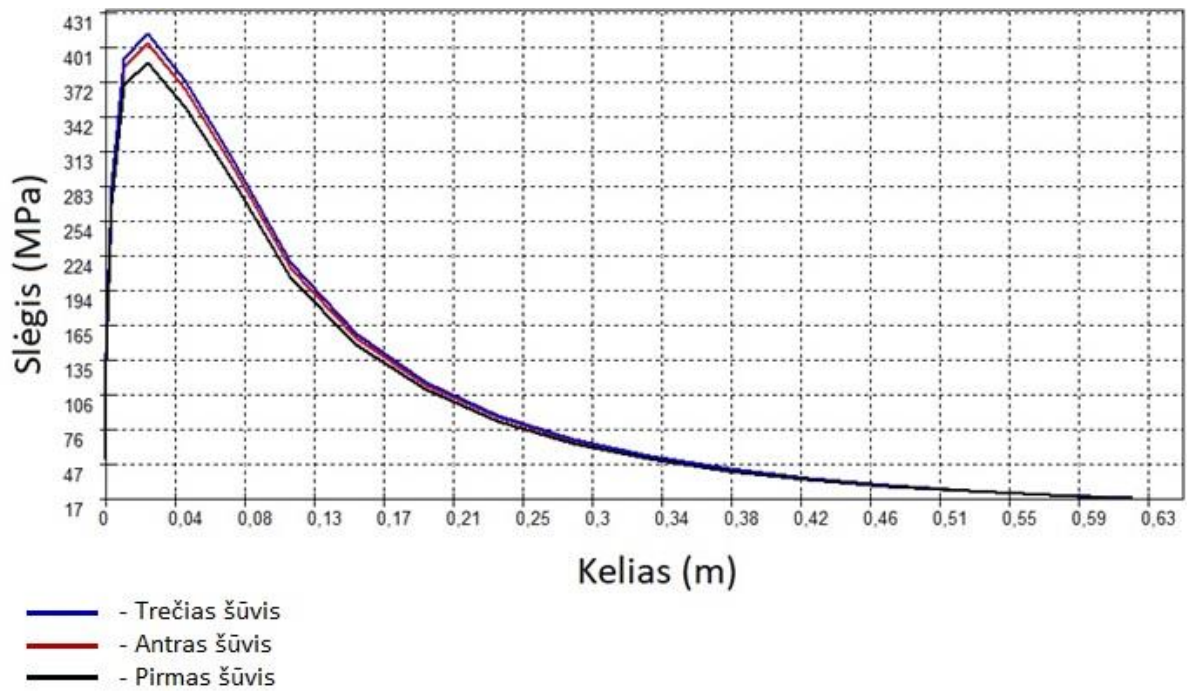
2.9 Pav. Šaudmens greičio ir nuskrieto atstumo grafikas

Iš pateikto šaudmens greičio ir nuskrieto kelio grafiko, kurį pateikia *Interior Ballistics STANAG 4367* programa galima matyti, kad šaudmuo judėdamas ginklo vamzdžiu įgauna vis didesnę greitį ir maksimalų greitį (495,52 m/s) išvysto pasiekęs ginklo vamzdžio galą (pateikta 2.10 Pav. Šaudmens greičio ir laiko grafikas).



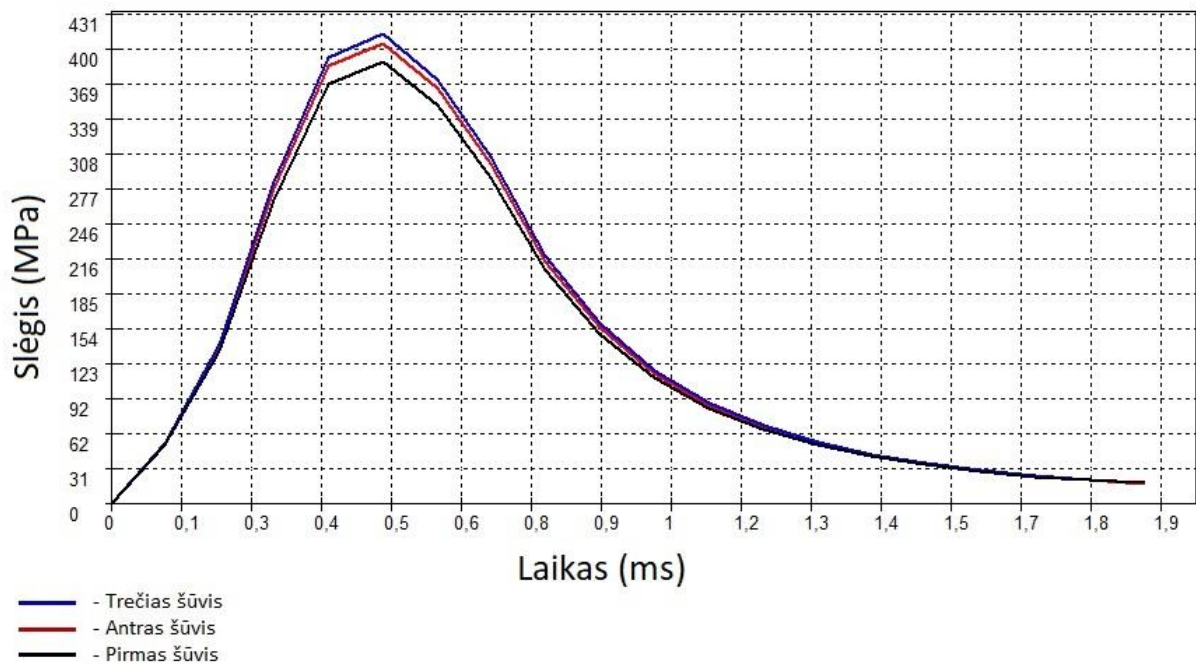
2.10 Pav. Šaudmens greičio ir laiko grafikas

Iš pateikto šaudmens greičio ir laiko grafiko, kurį pateikia *Interior Ballistics STANAG 4367* programa galima matyti, kad šaudmuo judėdamas ginklo vamzdžiu įgyja pagreitį laiko momentu nuo 0,1ms iki 0,8ms.



2.11 Pav. Slėgio už šaudmens ir nuskrieto atstumo grafikas

Analizuojant pateiktą šaudmens nuskrieto atstumo ir už šaudmens susidariusio slėgio grafiką (pateikta 2.11 Pav. Slėgio už šaudmens ir nuskrieto atstumo grafikas) imituojant tris šūvius, kuri pateikia *Interior Ballistics STANAG 4367* programa galima matyti, kad didžiausios susidarancios slėgio už šaudmens reikšmės (~365Mpa) įgyjamos kulkai nuskriejus 3cm ginklo vamzdyje.

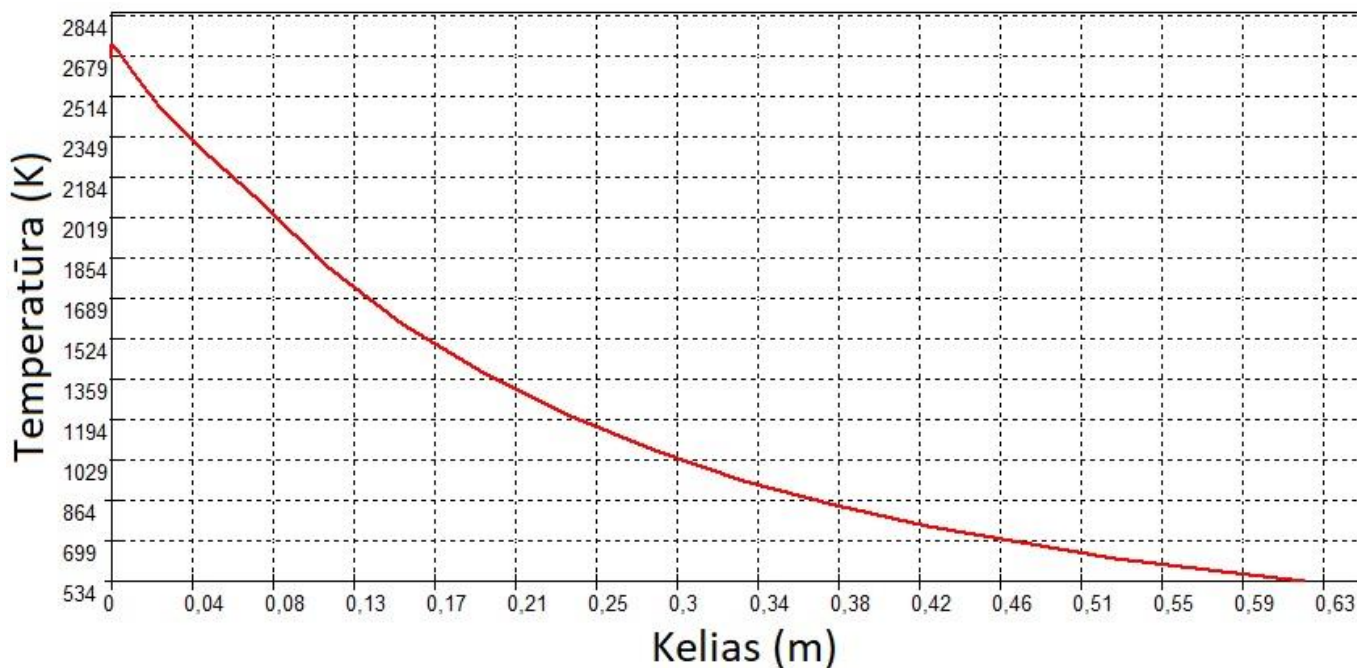


2.12 Pav. Slėgio už šaudmens ir laiko grafikas

Analizuojant pateiktą laiko ir slėgio susidariusio už šaudmens grafiką (pateikta 2.12 Pav.) imituojant tris šūvius, kuri pateikia *Interior Ballistics STANAG 4367* programa galima matyti, kad

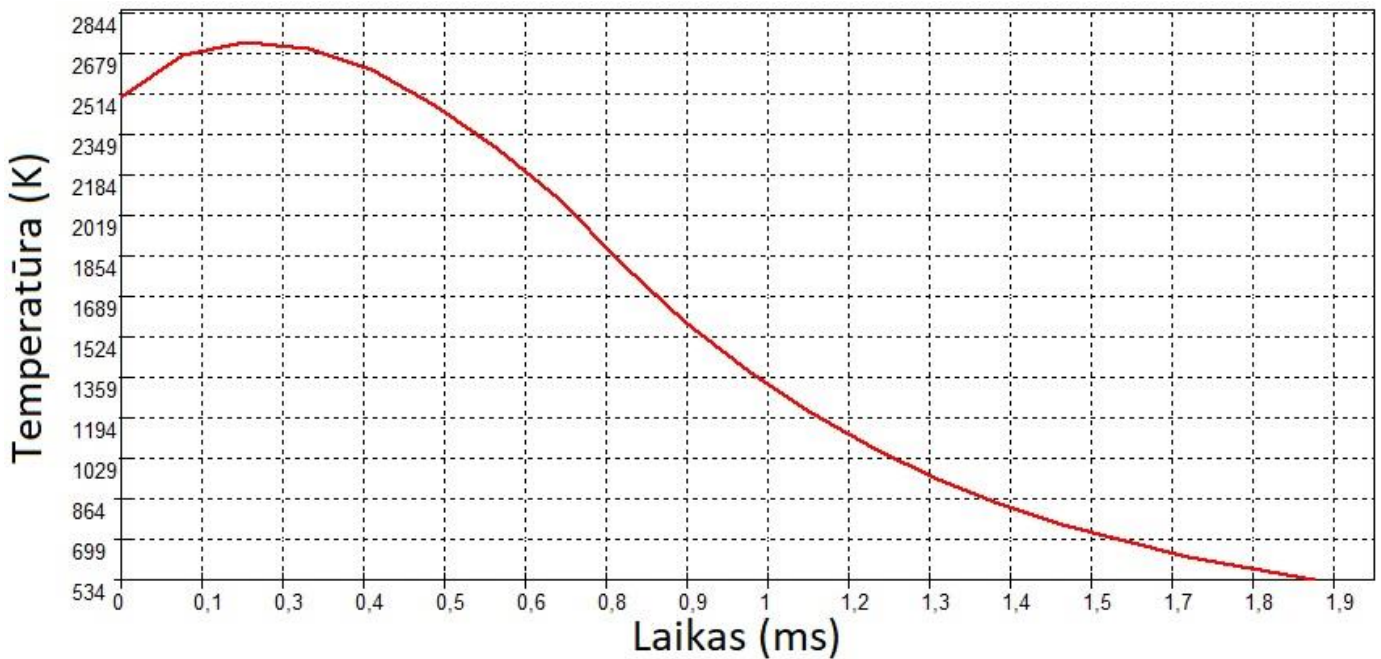


pikinės slėgio reikšmės įgyjamos praėjus apytikriai 48ms po šūvio, kuomet karštos inertinės besiplečiančios dujos spaudžia ginklo vamzdžio sienelės ir šaudmens dugną taip suteikdamos jam vis didesnę pagreitį.



2.13 Pav. Nuskrieto kelio ir temperatūros kitimo grafikas

Analizuojant pateiktą šaudmens įveikto kelio ir temperatūros kitimo grafiką (pateikta 2.13 Pav. Nuskrieto kelio ir temperatūros kitimo grafikas), kuri pateikia *Interior Ballistics STANAG 4367* programa galima matyti, kad pikinė temperatūros ginklo vamzdyje reikšmė įgyjama gaidukiui kalant į šaudmens dugą ir uždegant sprogstamąjį užtaisą ko pasekoje pasiekiami apytikriai 2680K temperatūra.



2.14 Pav. Laiko ir temperatūros kitimo grafikas

Analizuojant pateiktą šaudmens temperatūros kitimo per laiką grafiką (pateikta 2.14 Pav.), kurį pateikia *Interior Ballistics STANAG 4367* programa galima matyti, kad pikinė temperatūros ginklo vamzdyje reikšmė įgyjama apytikriai praėjus 0,2ms po momento, kuomet gaidukas kala į šaudmens dugą ir uždega sprogstamąjį užtaisą.

Apibendrinant poskyrį galima daryti sekančias išvadas, kad atliktų teorinių skaičiavimų ir skaičiavimų atliktų programa *Interior Ballistics STANAG 4367* gauti ginklo vamzdyje už šaudmens susidarančio slėgio rezultatai (atitinkamai 359Mpa ir 365Mpa) yra labai panašūs o jų reikšmės skiriasi tik 6Mpa, kas sudaro ~1,7%, todėl galima teigti, kad gauti rezultatai yra tikslūs ir patikimi. Tačiau vertinant programos *Interior Ballistics STANAG 4367* gautas šaudmens skriejimo greičio reikšmes ir šaudmenų gamintojų, platintojų pateikiamas reikšmes techninėje šaudmenų dokumentacijoje (atitinkamai 495,52m/s ir 945m/s) pastebimas didelis 449,48m/s arba ~90% nuokrypis. Iš dalies tokį nuokrypį galima paaiškinti tuo, kad šaudmuo maksimalų greitį fiksuotą *Interior Ballistics STANAG 4367* programa pateikiamą įgyja prieš palikdamas ginklo vamzdį ir pateiktuose grafikuose matoma, kad greičio kreivė dar tik siekia maksimumo reikšmės. Taip pat nėra žinoma ir kokiais kriterijais remiantis šaudmenų gamintojai, platintojai deklaruoja tokį šaudmenų skriejimo greitį. Todėl vertinti programos pateikiamą šaudmens skriejimo greitį, kaip tikslų ir patikimą, negalima.

## 2.4. Praktinis šūvio balistikos parametrų tyrimas M-16 ginklu

Siekiant tobulinti ir įgyti vis daugiau praktinių žinių apie šaunamuosius ginklus, šaudmenis ir jų priedus, tokius kaip slopintuvai nuo pat XIXa. Pradžios buvo vykdomi praktiniai bandymai, kurių metu gaunama informacija ir parametrai buvo apdorojama mokslininkų, kurių pateiktais duomenimis ir išvadomis remiantis buvo atliekamos korekcijos ir pakeitimai įtaisų konstrukcijose.

Šiuolaikiniuose ginklų ir jų priedų kokybinių parametrų tyrimuose naudojamos modernios duomenų apdorojimo sistemos (American Shooting Journal), jautrūs mikrofonai skirti fiksuoti garso galią bei slėgį ginklo vamzdyje, slopintuve ir už jo.

Norint nustatyti ankstesniame poskyryje gautų teorinių skaičiavimų duomenų patikimumą šiame skyriuje remiamasi realiomis sąlygomis atliktais bandymais ( Philip H., Jason M. Wong 2010, *Effects of Barrel Length on Bore Pressure, Projectile Velocity and Sound Measurement*), kurių įvestiniai duomenys apibūdina naudotą ginklą (pateikta 2.4 Lentelė. M-16 tipo ginklą apibūdinantys duomenys) ir šaudmenį (pateikta 2.5 Lentelė. 5,56x45 NATO šaudmenį apibūdinantys duomenys) . Kaip mini patys darbo autoriai priežastys paskatinusios atlikti tokio pobūdžio tyrimą yra pastebimai didėjantis poreikis M-16 tipo ginklams su trumpesniu nei standartinis vamzdžio ilgiu, kuris suteikia papildomo laisvumo manevravimui su ginklu, tačiau trumpesnis ginklo vamzdis daro neigiamą įtaką ir generuoja didesnę garso galią ir liepsną šūvio metu.

Bandyme naudoto ginklo parametrai:

2.4 Lentelė. M-16 tipo ginklą apibūdinantys duomenys

M-16 tipo ginklas			
Žymuo	Pavadinimas	Reikšmė/dydis	Mato vnt.
	Ginklo ilgis	1,006	m
	Svoris (be magazino)	2,88	kg
	Svoris (su užtaisytu magazinu)	3,52	kg
<i>D</i>	Ginklo vamzdžio kiaurymės skersmuo	5,7	mm
<i>L</i>	Ginklo vamzdžio ilgis	600	mm
<i>cal</i>	Ginklo kalibras	.223	

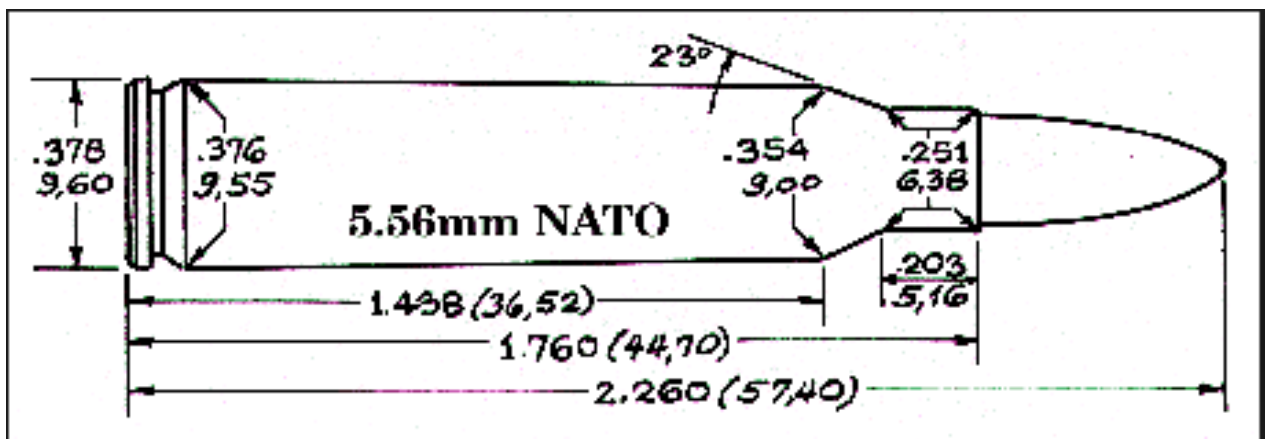
Bandyme naudotų šaudmenų parametrai:

2.5 Lentelė. 5,56x45 NATO šaudmenį apibūdinantys duomenys

.223 cal šoviniai (M855 arba 5,56x45 NATO)			
Žymuo	Pavadinimas	Reikšmė/dydis	Mato vnt.
	Kulkos skersmuo	6,38	mm
	Šaudmens pagrindo skersmuo	9,6	mm
	Šaudmens bendras ilgis	57,4	mm

	Maksimaliai galimas sukurti slėgis	430	MPa
	Sprogstamojo užtaiso masė (gramais)	4	g
	Sprogstamojo užtaiso masė (granais)	62	gr
	Maksimalus skriejimo greitis	945	m/s
	Maksimali generuojama energija	1767	J

Realiuose bandymuose naudoti 5,56x45mm. NATO šaudmenys (pateikta 2.15 Pav. 5,56x45 NATO šaudmuo), kurie buvo sukurti dar antrojo pasaulinio karo laikotarpiu, tačiau jų geometrijos tobulinimas vyksta ir šiomis dienomis.



2.15 Pav. 5,56x45 NATO šaudmuo

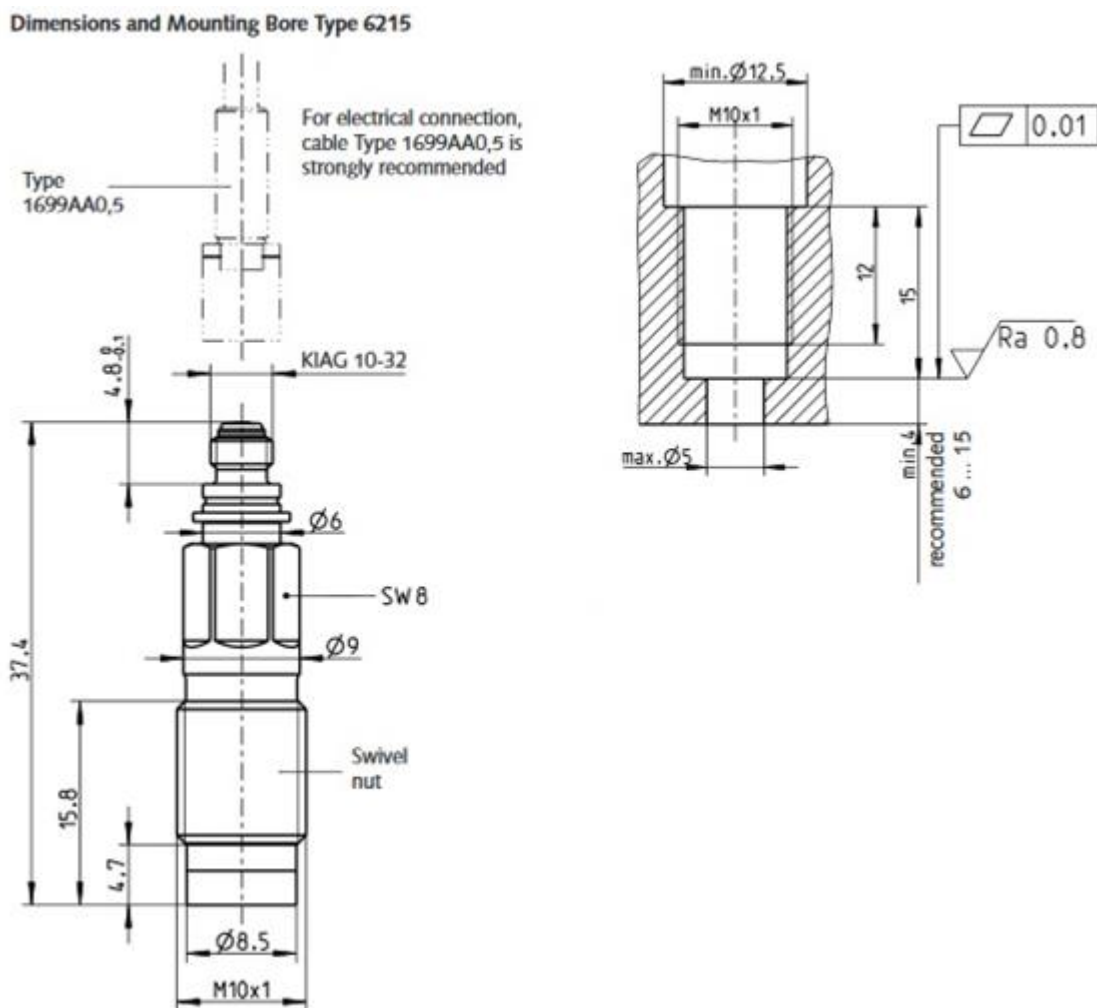
Ginklo vamzdyje susidarancio slėgio matavimui naudota įranga:

Pjezoelektrinis KISTLER 6215 slėgio (Kistler) matavimo jutiklis (pateikta 2.6 Lentelė. Slėgio jutiklį apibūdinantys duomenys) skirtas balistiniams matavimams, kuomet slėgis neviršija 6000 bar.

2.6 Lentelė. Slėgio jutiklį apibūdinantys duomenys

KISTLER 6215 slėgio jutiklio techniniai duomenys		
Parametro pavadinimas	Reikšmė/dydis	Mato vnt.
Veikimo diapazonas	0...6000	bar
Jautrumas	-1,4	pc/bar
Veikimo dažnis	>240	kHz
Reakcijos laikas	1	μs
Linijškumas visuose diapazonuose	±1	%FSO
Naudojimui tinkami temperatūros režiai	-50...200	°C
Temperatūros pokyčio įtaka jautrumui	±0,02	% / °C
Elektrinė talpa	~8	pF
Svoris	12	g

Pjezoelektrinio KISTLER 6215 slėgio matavimo jutiklio schema pateikiama 2.16 Pav. Kistler 6215 slėgio jutiklio schema



2.16 Pav. Kistler 6215 slėgio jutiklio schema

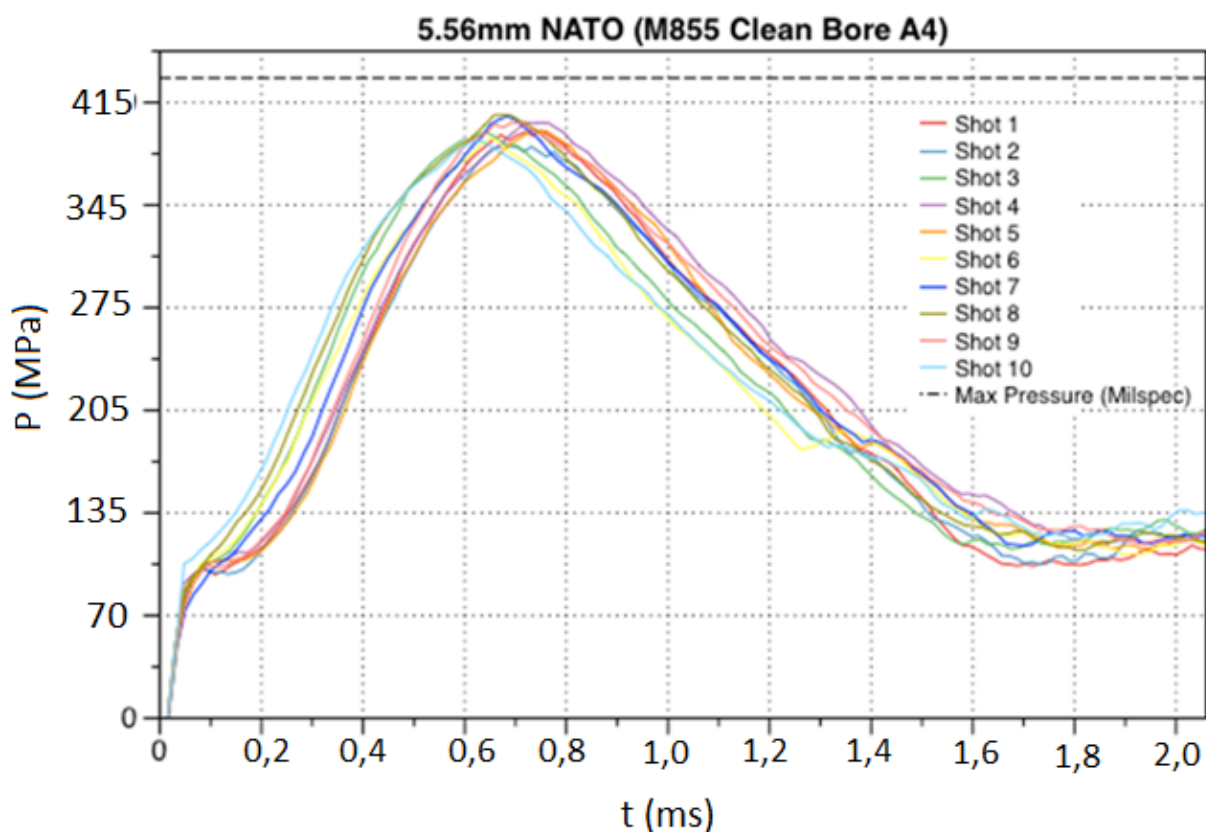
Bandymo atlikimo eiga: bandymai vykdomi sportinio šaudymo klubo šaudykloje ir neapgyvendintoje laukymėje, kuomet iš ginklo buvo atliekami šūviai skirtingomis kulkomis be garso slopinimo įtaiso. Bandymai buvo atliekami siekiant nustatyti kokia garso galia yra sukuriama šūvio metu ir kaip tinkamai galima apsaugoti šaulio klausos organus nuo pažeidimų naudojant garso slopintuvus.

Ginklas įstatomas ir pritvirtinamas prie trikojo, jo vamzdis yra 1,6m. aukštyje (pateikta 2.17 Pav. Įtaisų įtvirtinimo ir pozicionavimo schema). Taikinyš pastatomas 55m. atstumu nuo ginklo išlaikant tiesią kulkos skriejimo trajektoriją. Garso galios matuoklis yra nutolęs nuo taikinio 1m. atstumu ir pritvirtintas plastikinėmis sąvaržomis prie medinio strypo tokiame pačiame aukštyje kaip ir ginklo vamzdis. Laukymės teritorijoje nėra papildomų garso bangas galinčių atspindėti arba laužti paviršių, didelių skydų, kurie galėtų įtakoti bandymų rezultatus.



2.17 Pav. Įtaisų įtvirtinimo ir pozicionavimo schema

Apskaičiuotas slėgis susidarantis už šaudmens ginklo vamzdyje yra ~ 359 Mpa, o bandymais (Joseph P. Avery, Ph. D. 2012 *Physics Demands A New Basic Combat Weapon*) nustatytas susidarantis slėgis už šaudmens atlikus 10 šūvių ginklo vamzdyje siekia ~ 55000 psi (pateikta 2.18 Pav. Slėgio kitimas ginklo vamzdyje naudojant 5,56x45 NATO šaudmenis), kas atitinka ~379 Mpa, todėl skaičiavimais gautos reikšmės nuokrypis yra ~2,79%, todėl tokią teorinių skaičiavimų paklaidą galima toleruoti ir skaičiavimus laikyti pagrįstais ir sąlyginai tiksliais.



2.18 Pav. Slėgio kitimas ginklo vamzdyje naudojant 5,56x45 NATO šaudmenis

Gauti tyrimo rezultatai (pateitka 2.7 Lentelė. Tyrimo rezultatai) rodo, kad nevisuomet garso slopinimo įtaisas gali suteikti ženklų garso galios slopinimą, nors šūvio metu girdimas garsas ir pakito, yra juntamai švelnesnis ir ne toks skardus lyginant šūvį be slopinimo įtaiso. Norint pasiekti didesnį garso galios slopinimą patartina keisti slopinimo įtaiso konstrukciją ir medžiagiškumą.

2.7 Lentelė. Tyrimo rezultatai

Šovinio kalibras	Išmatuota garso galia be slopinimo, dB	Išmatuota garso galia su slopinimu, dB	Išmatuotų garso galių skirtumas, dB
.308	152,6	151,9	0,7
.223	148,5	148,1	0,4
.22 LR HV	143,5	144,1	-0,6

### 3. GARSO SLOPINTUVO EFEKTYVUMO SKAITMENINIS MODELIAVIMAS

#### 3.1. Projektuoto slopintuvo modelis

Suprojektuotas daugiakamerinis garso slopintuvas, kuriuo norima slopinti šūvio bangos sukeltą garso galią daugiau nei 18dB. Idealiųjų dujų dėsnis nurodo (pateikta 3.1 Pav. Slėgio priklausomybė nuo tūrio esant įvairioms temperatūroms), kad norint sumažinti slėgį (slėgis susidaro plečiantis karštomis inertinėms dujoms ginklo vamzdyje) reikia didinti tūrį ir mažinti dujų temperatūrą:

$$PV = nRT = NkT, \text{ kur}$$

3.1

$P$  – dujų slėgis,

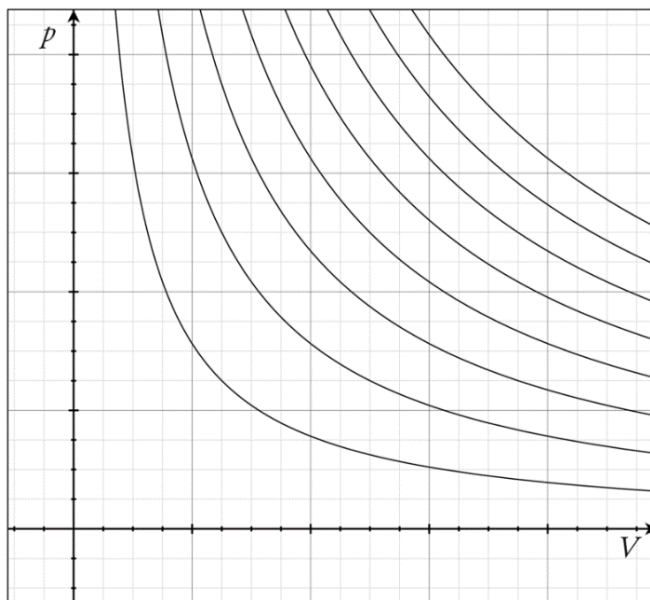
$V$  – dujų tūris,  $n$  – dalelių kiekis moliais,

$R$  – universalioji dujų konstanta,

$T$  – absoliutinė temperatūra,

$N$  – dalelių skaičius,

$k$  – Bolcmano konstanta.



3.1 Pav. Slėgio priklausomybė nuo tūrio esant įvairioms temperatūroms

Slopintuvo korpusas projektuotas iš standartinio precizinio AW6060 aliuminio markės apvalaus vamzdžio. Aliuminis pasirinktas dėl savo gerų fizikinių savybių (pateikta 3.1 Lentelė. Aliuminio lydinių fizikinės charakteristikos) tokių kaip šiluminio laidumo, lengvo apdirbimo, gerų

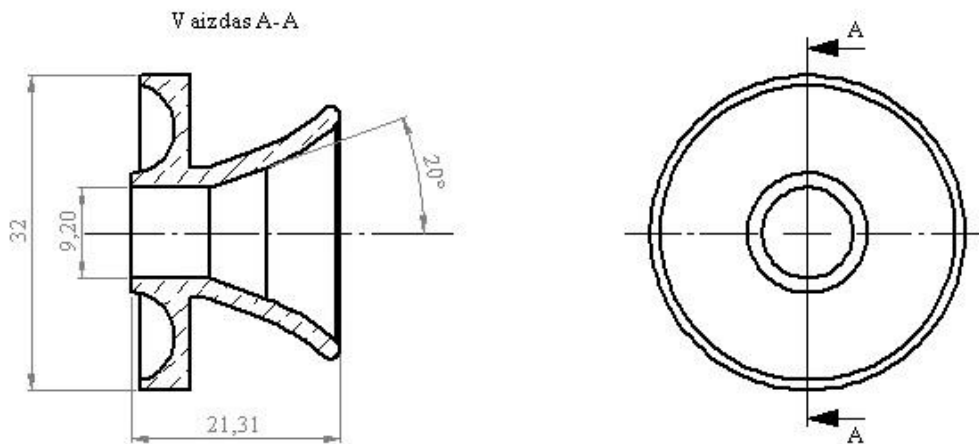


antikoroziųjų savybių ir svarbiausia mažo gaminamo gaminio svorio. Korpusas sudaro vieną didelę dujų išsiplėtimo kamerą, kurioje yra patalpintos lengvai centruojamos tarpkamerinės pertvaros ir distanciniai žiedai skaidantys visą ertmę į daugiau mažesnių kamerų. Tarpkamerinės pertvaros ir distanciniai žiedai, kaip ir slopintuvo korpusas projektuoti iš AW6060 aliuminio markės apvalaus strypo. Šiuose mažesnėse vidinėse inertinių dujų išsiplėtimo kamerose įkaitusios inertinės dujos atvėsina ir taip yra ženkliai sumažinamas ginklo vamzdyje ir slopintuvo korpuse sukuriamas slėgis.

3.1 Lentelė. Aliuminio lydinių fizikinės charakteristikos

Lydinys	Mišinys	Šiluminis laidumas	Šiluminio plėtimosi koeficientas	Lydymosi temperatūra		Tamprumo modulis
		W/cm·K	cm·K	Min	Max	GPa
EN AW-6082	T6	172	23,1	575	650	70 000
EN AW-6060	T6	209	23,4	610	655	69 500

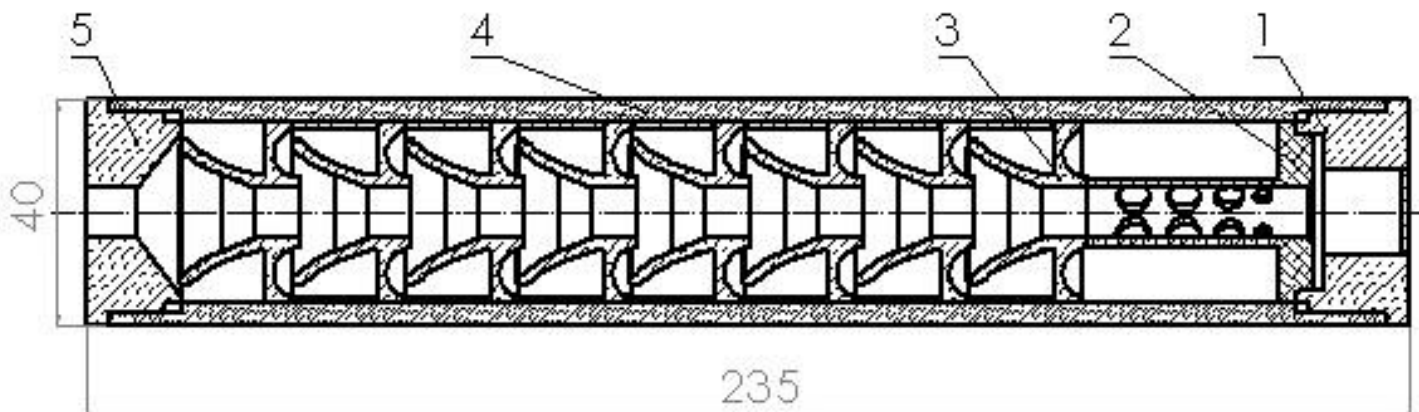
Slopintuvo vidinių segmentų parametrai yra skaičiuojami nepaisant trinties jėgų poveikio į jų sienes, taip pat yra traktuojama, kad dujomis yra užpildoma visa tarpkamerinės pertvaros ertmė (toks atvejis yra įmanomas tik tuomet, kai slopintuvo tarpkamerinės pertvaros yra specialiai taip sukonstruotos ir sulaiko visas besiplečiančias karštas dujas slopintuve). Toks inertinių dujų sulaikymas slopintuvo viduje yra neigiama ir nepageidaujama savybė, nes ženkliai įtakoja kulkos skriejimo greičio mažėjimą o sukurtas papildomas pasipriešinimas iškreipia kulkos skriejimo trajektoriją. Siekiant išvengti šio dujų susilaikymo slopintuvo vamzdyje rekomenduojama, kad vidinio segmento kūgio pusiaukampinė neviršytų ir būtų nedidesnė nei 30°. Mažesnė vidinio segmento kūgio pusiaukampinė įtakoja paties segmento dydį, tačiau jeigu dydis nėra svarbiausias parametras, tuomet yra rekomenduojama optimaliausia 20° pusiaukampinė didesniems segmentams, o mažesnė nei 15° pusiaukampinė nesuteikia didesnio juntamo parametrinio pranašumo tačiau ženkliai įtakoja gabartinio matmens padidėjimą. Schematiniame vieno segmento pjūvio eskize vaizduojama jo geometrija (pateikta 3.2 Pav. Projektuotas vidinis segmentas).



3.2 Pav. Projektuotas vidinis segmentas

Slopintuvo kokybiniai parametrai tiesiogiai priklauso nuo vidinių segmentų skaičiaus jame, todėl pasirinktas toks jų skaičius, kad garso slopinimo įtaiso gabaritinis matmuo atitiktų šių produktų standartinių gaminių gabaritinius matmenis.

Projektuoto slopintuvo kompiuterinis modelis ir jo sąrankos modelio skerspjūvis pateikiamas paveiksle 3.3 Pav. Slopintuvo kompiuterinis modelis.



3.3 Pav. Slopintuvo kompiuterinis modelis

Slopintuvą sudaro tokie elementai:

- *Tvirtinimo flanšas*. Šio flanšo centrinėje kiaurymėje pjaunamas vidinis sriegis atitinkantis ginklo vamzdžio išorinį sriegį ir taip įtaisas fiksuojasi ant ginklo.
- *Pirminė išsiplėtimo kamera*. Šios kameros konfigūracija kitokia nei sekančių vidinių segmentų. Kameros paskirtis sulaikyti didelę dalį inertinių dujų ir jų sugeneruotą šiluminę energiją, taip sumažinant susidarantį už kulkos slėgį.

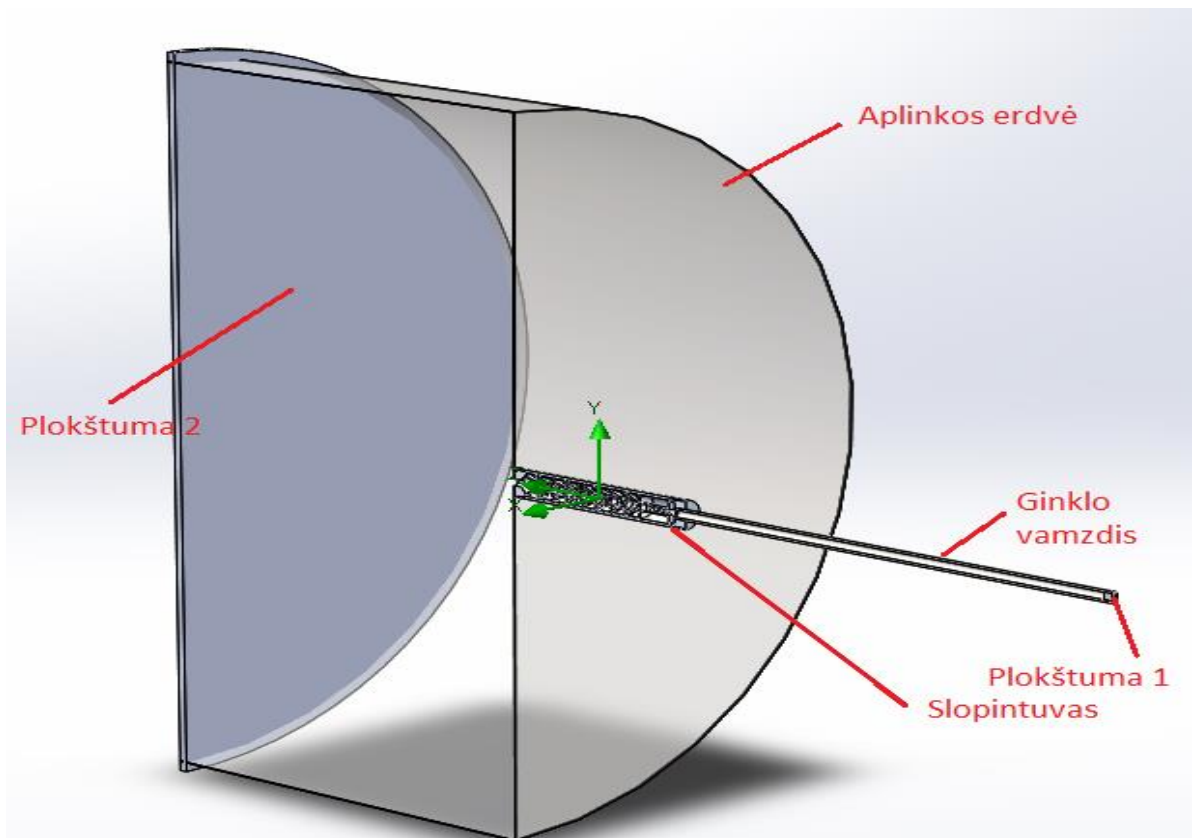
- *Vidiniai segmentai.* Šie segmentai kreipia inertinių dujų srautą kryptimi priešinga nei kulkos judėjimo trajektorija ir taip lėtina dujų sklidimą dirbtinai priversdami dujas sukurti ir tuo pat metu didelio paviršiaus ploto segmentai absorbuoja išsiskyrusią šiluminę energiją ir sklaido ją.
- *Išorinis korpusas.* Konstrukcinė detalė į kurią yra talpinami ir centruojami visi slopintuvo elementai.
- *Distanciniai centravimo žiedai.* Šie žiedai yra skirti palaikyti distanciją tarp vidinių segmentų kuomet jie yra patalpinami į išorinį slopintuvo korpusą.
- *Fiksacinis flanšas.* Šis flanšas yra skirtas uždaryti slopintuvo galą ir išlaikyti viduje esančius segmentus jų vietose. Flanšo gale yra gręžta kiaurymė, kurios diametras yra kiek didesnis nei kulkos diametras.

### **3.2. Slopintuvo skaitinis modelis**

Įrengimų, įtaisų ar sistemų kuriomis sklinda dujos ar skysčiai charakteristikų modeliavimui ir jų judėjimui tirti ir nustatyti yra naudojamos įvairios kompiuterinės modeliavimo programos, pvz., Ansys, Comsol Multiphysics, Fluent.

Projektuoto garso slopintuvo sąrankos skaitiniai modeliai buvo sudaromi naudojant programą DS Solidworks flow simulation, kuri skirta skysčių arba dujų srautų ir šilumos mainų skaitinei analizei atlikti. Naudoti du skirtingi sąrankos skaitiniai modeliai, kurių vieną sudarė slopintuvas ta pačia projektavimo programa sumodeliuotas ginklo vamzdis ir aplinkos erdvė už slopintuvo, o kitą sąranką sudarė tik ginklo vamzdis ir aplinkos erdvė už jo.

Pirmoji skaitinė slopintuvo modelio sąranka vaizduojama 3.4 Pav. Slopintuvo, ginklo vamzdžio ir aplinkos erdvės skaitinis modelis.

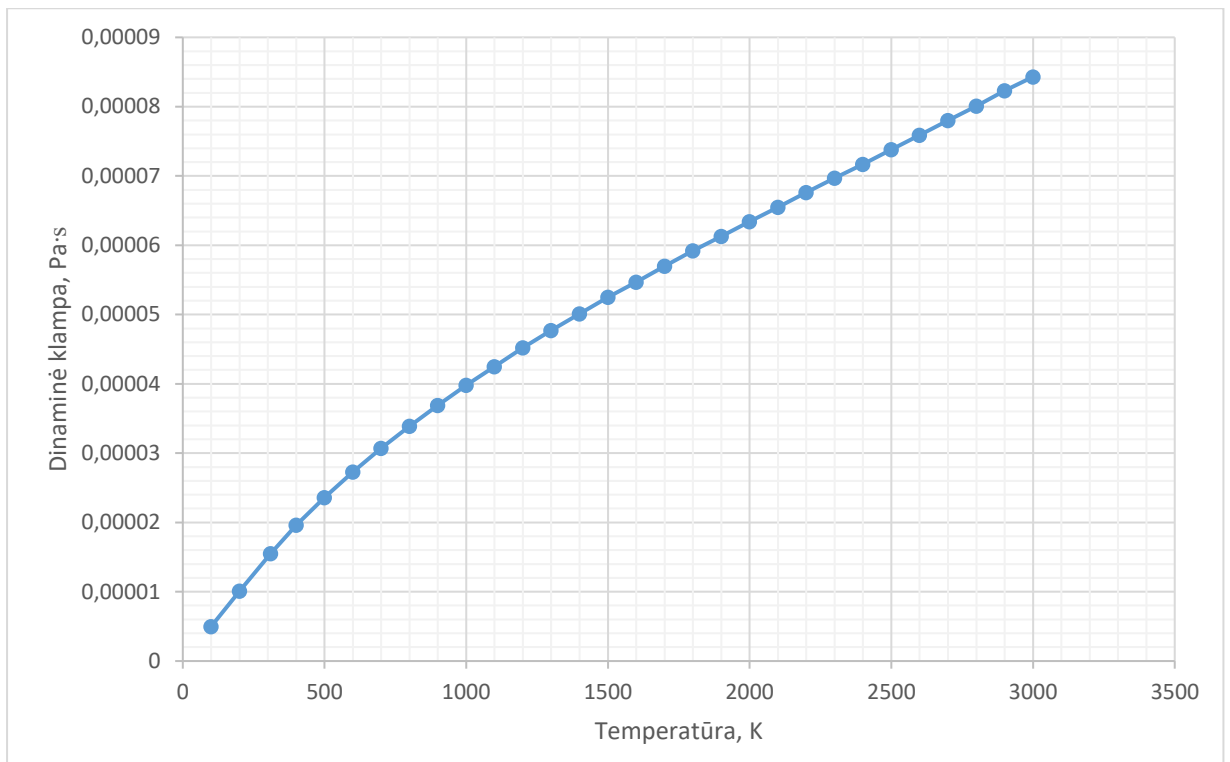


3.4 Pav. Slopintuvo, ginklo vamzdžio ir aplinkos erdvės skaitinis modelis

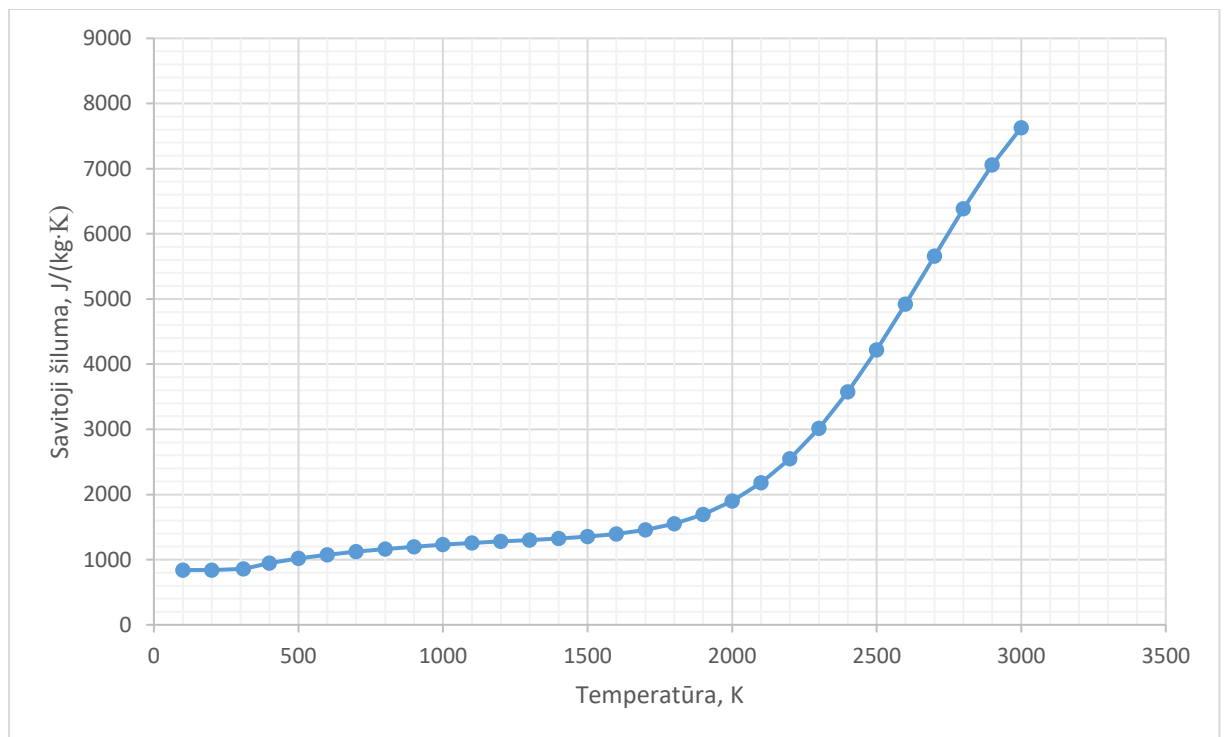
Sudarant slopintuvo, ginklo vamzdžio ir aplinkos erdvės skaitinį modelį kompiuterinio modeliavimo programoje parenkami tokie nustatymai:

- Analizės tipas – vidinė skysčių arba dujinės terpės tėkmės analizė apribota laiku (kuomet visas bandymo laikas yra 0,018s. o rezultatų atvaizdavimo žingnis 0,001s.), vertinama žemės gravitacijos jėgos įtaka skaičiavimams;
- Skaitiniame modelyje sklindančios inertinės dujos – anglies dvideginis;

Anglies dvideginio charakteristikos naudojamos skaitiniame modeliavime pateikiamos 3.5 Pav. Anglies dvideginio dinaminė klampa ir 3.6 Pav. Anglies dvideginio savitoji šiluma. Anglies dvideginio molekulinė masė – 0,044011 kg/mol.



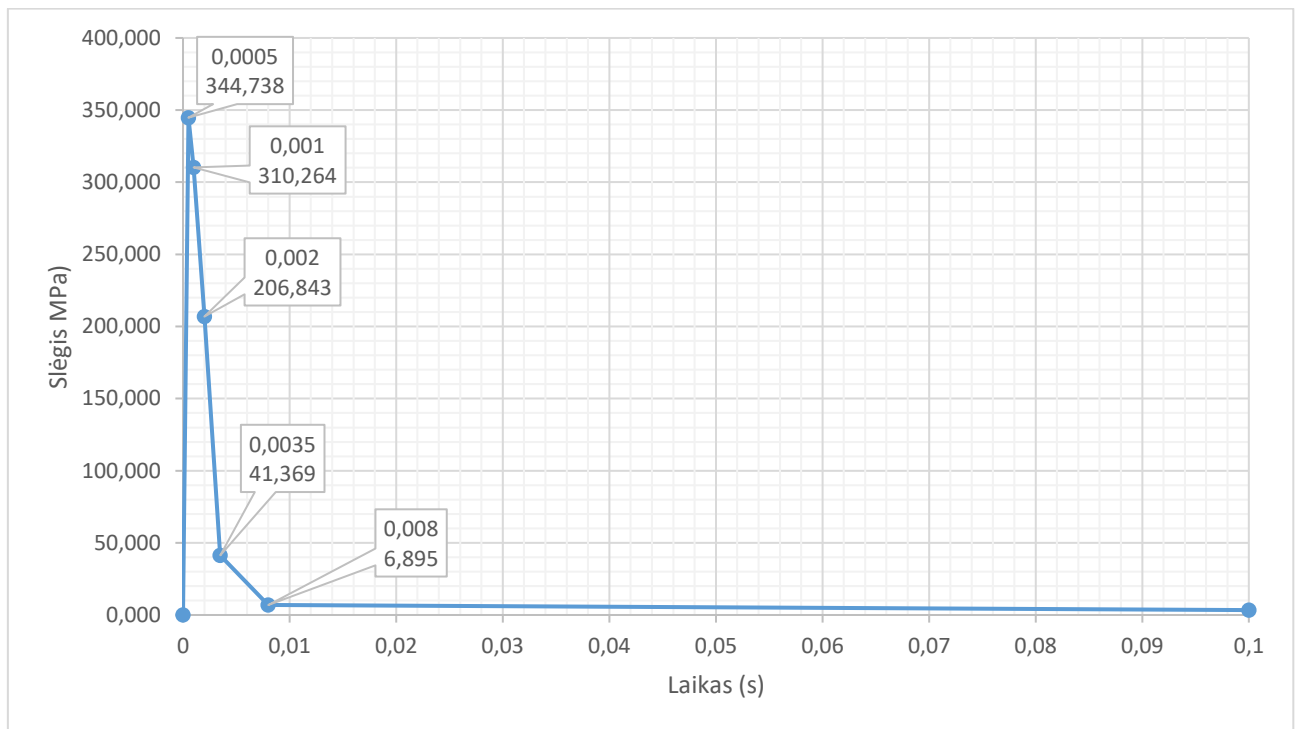
3.5 Pav. Anglies dvideginio dinaminė klampa



3.6 Pav. Anglies dvideginio savitoji šiluma

- Inertinių dujų tėkmės tipas – laminarinė ir turbulentinė tėkmė (t.y. sistema atlikdama skaičiavimus nėra apribojama vykdyti juos tik vieno tipo tėkmei, o atlieka analizę ir skaičiavimus pagal tūrinio kūno kuriame vyksta tėkmė ir skysčio arba dujų parametrus);

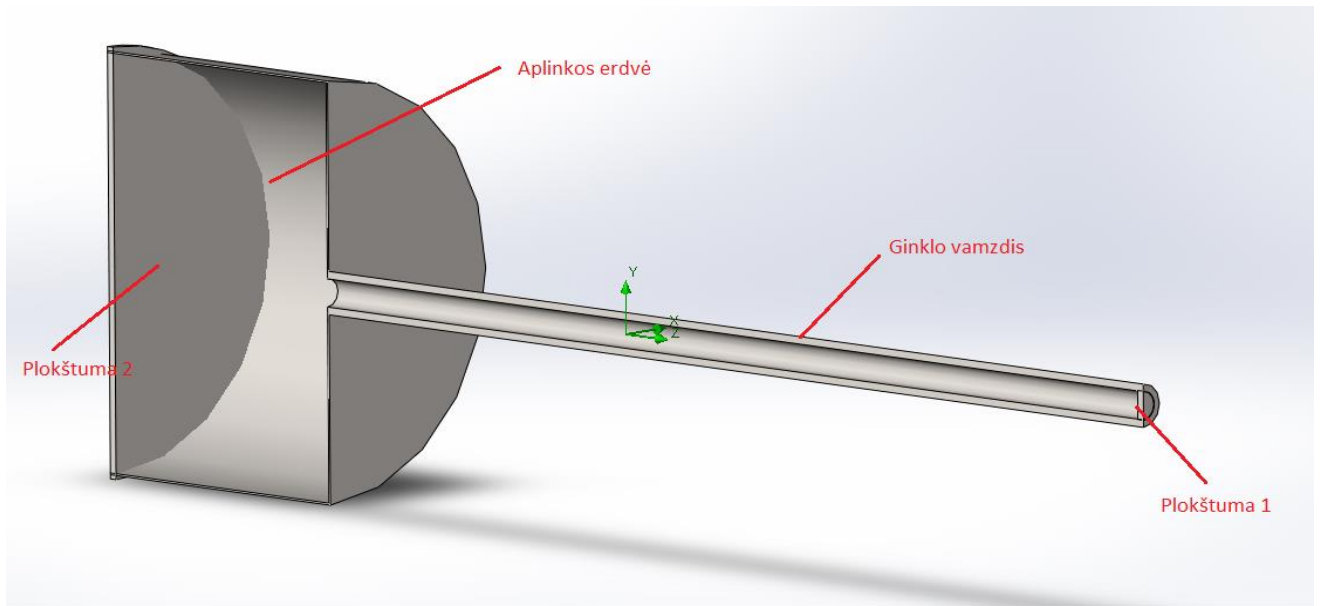
- Plokštuma 1 (pateikta 3.4 Pav.) – yra plokštuma, kurioje užduodamos kraštinės sąlygos tyrimui ir nurodo inertinių dujų slėgio impulsą (pateikta 3.7 Pav. Inertinių dujų slėgio impulsas kraštinėje sąlygoje), temperatūrą (478°K) ir pradinę greitį ( $V_0 = 980m/s$ );



3.7 Pav. Inertinių dujų slėgio impulsas kraštinėje sąlygoje

- Modelio sienelių paviršiaus tipas – idealiai glotni sienelė, be šilumos mainų su aplinka;
- Plokštuma 2 (pateikta 3.4 Pav.) - yra plokštuma, kurioje užduodamos kraštinės sąlygos tyrimui ir nurodo aplinkos normalinį slėgį (101325 Pa)

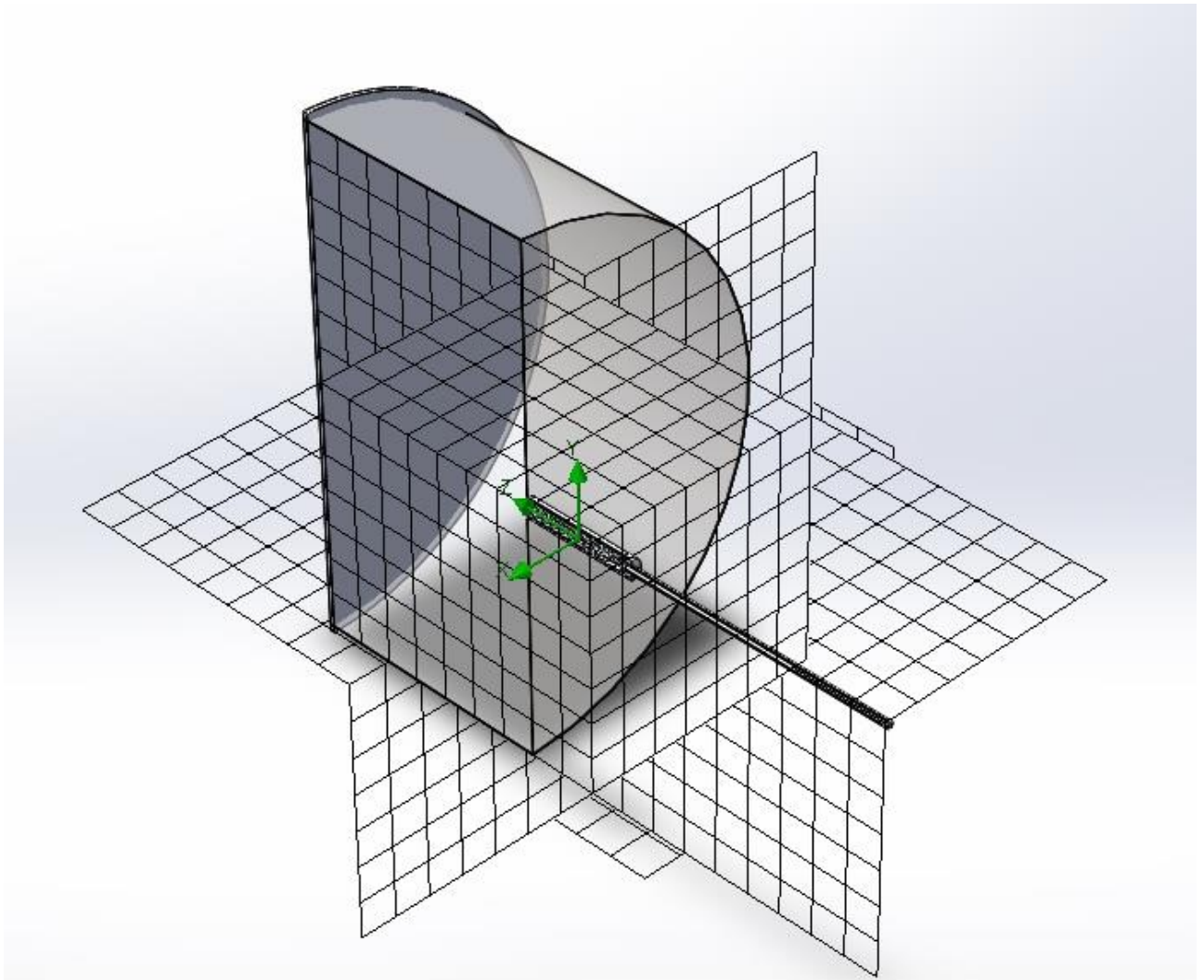
Antroji skaitinė slopintuvo skaitinio modelio sąranka vaizduojama 3.8 Pav. Ginklo vamzdžio ir aplinkos erdvės skaitinis modelis



3.8 Pav. Ginklo vamzdžio ir aplinkos erdvės skaitinis modelis

### 3.3. Tinklelio sudarymas ir skaičiuotinių rezultatų parinkimas

DS Solidworks flow simulation leidžia spręsti įvairius uždavinius susijusius su skysčių tėkme, šilumos mainais ir pan. Ši programinė įranga dažniausiai yra naudojama tuomet, kai eksperimentas brangiai kainuoja arba yra sunku jį atlikti realiomis sąlygomis. Skaitiniai metodai yra naudojami tirti ir skaičiuoti įvairius fizikinius reiškinius. Tokių metodų panaudojimas yra patogus tuo atveju, kai norima patikrinti suprojektuoto gaminio arba jo bandomojo modelio (prototipo) charakteristikas pasinaudojant esamu ar naujai sudaromu bandomojo daikto CAD modeliu įkeltu į skaitinio modeliavimo sistemą, kurioje sukuriama skaičiuojamosios srities tinklelis (pateikta 3.9 Pav. Bazinis tinklelis), užduodamos kraštinės sąlygos (sudaromos diferencialinės lygtys), nurodomi pageidaujami skaičiuotiniai rezultatai (Goals) ir atliekamas skaičiavimas.

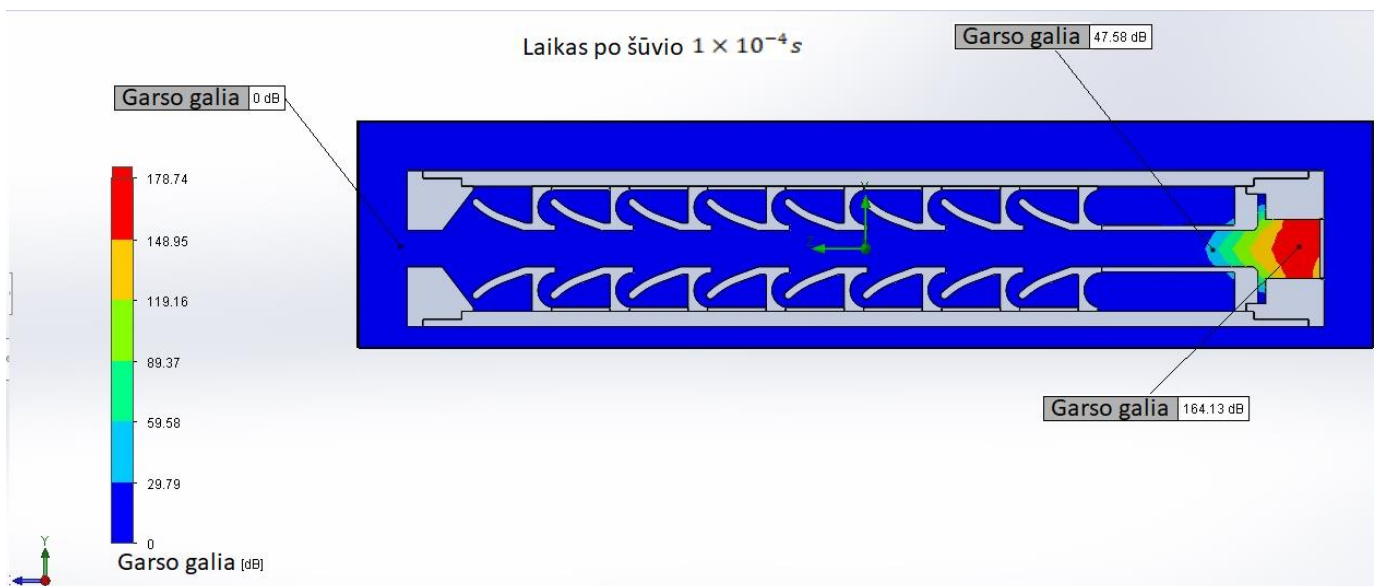


3.9 Pav. Bazinis tinklelis

Prieš atliekant skaičiavimus yra būtina apspręsti ir programoje nurodyti kokie yra šių skaičiavimų tikslai, rezultatai ir kaip jie turėtų būti grafiškai atvaizduoti todėl pasirinkta, kad akustinės jėgos lygį (dB), slėgį (Pa) programa atvaizduotų skaitinio modelio pjūvyje per frontaliąją plokštumą izolinijomis ir kontūrais.

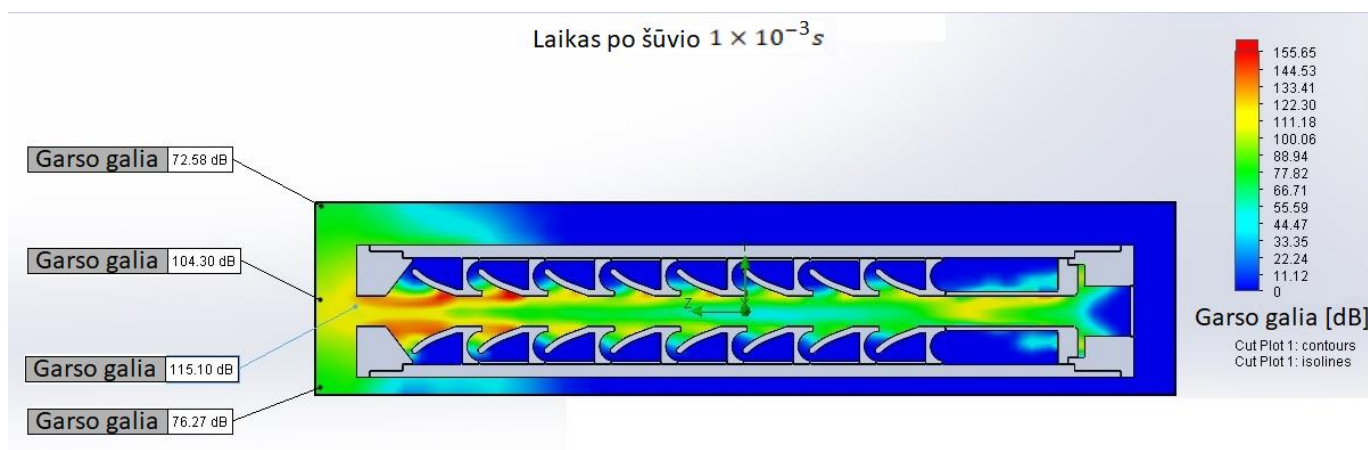
Garso galios simuliacija ir jos pasiskirstymas slopintuvo vamzdyje praėjus  $1 \times 10^{-4}$ s po šūvio pateikta 3.10 Pav. Skaitinio modeliavimo vizualus atvaizdavimas.





3.10 Pav. Skaitinio modeliavimo vizualus atvaizdavimas

Garso galios simuliacija ir jos pasiskirstymas slopintuvo vamzdyje praėjus po šūvio  $1 \times 10^{-3} s$  pateikta 3.11 Pav. Skaitinio modeliavimo vizualus atvaizdavimas



3.11 Pav. Skaitinio modeliavimo vizualus atvaizdavimas

Skirtingais laiko momentais (nuo  $1 \times 10^{-4} s$  iki  $1 \times 10^{-3} s$ ) modeliuoto šūvio garso galia slopintuve slopsta įkaitusioms inertinėms dujoms sklindant slopintuvo vidinėmis pertvaromis, kuomet šiluminė energija yra absorbuojama į aliuminio sienelės ir taip karštos inertinės dujos yra atvėsinaamos. Pagal atliktus skaitinio modeliavimo rezultatus (pateikta 3.2 Lentelė. Skaitinio modeliavimo rezultatai) galima daryti išvadą, kad sukonstruotas garso slopintuvas slopina garso galią.

3.2 Lentelė. Skaitinio modeliavimo rezultatai

t, (s)	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$	$\Delta L_n$ (dB)	$\Delta L_n$ (%)
$L_n$ , (dB)	164,13	115,1	49,03	30%

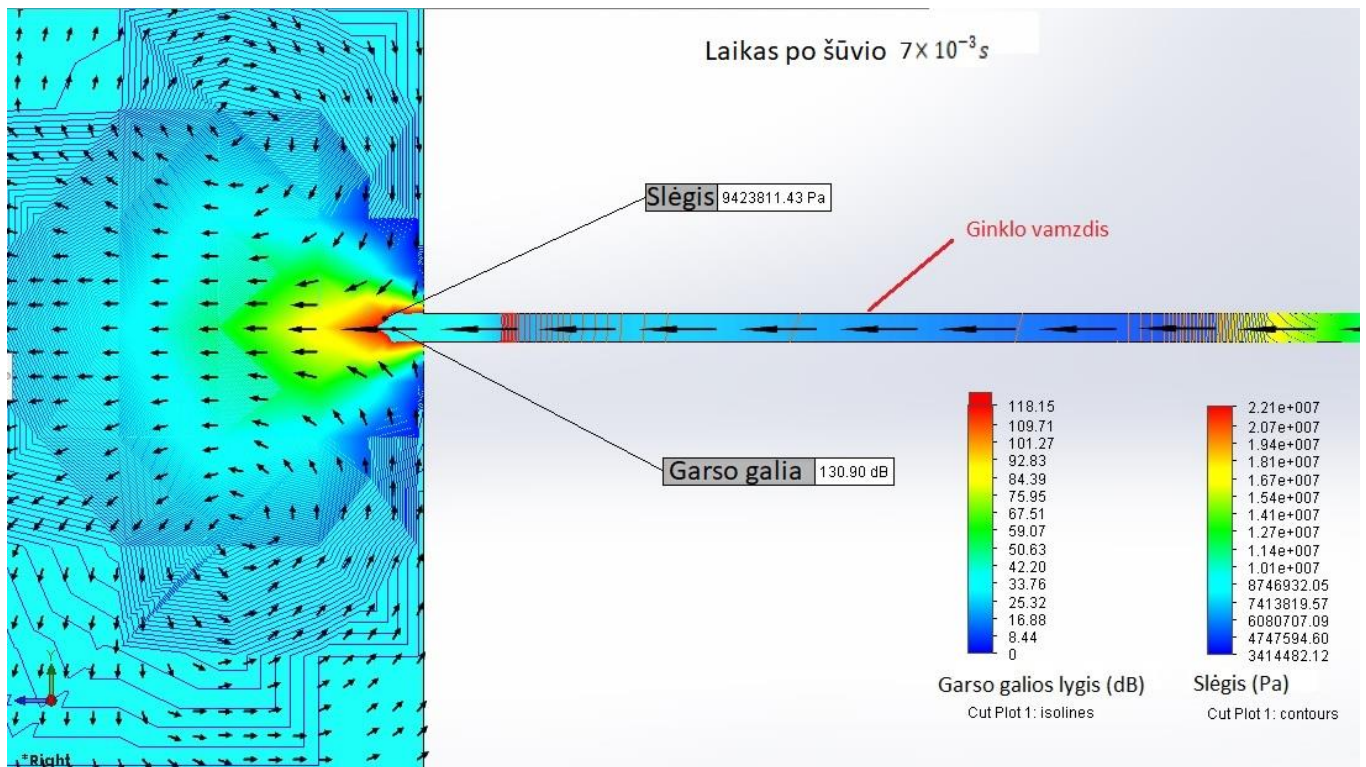
Skaitinio modeliavimo rezultatai rodo, kad slopintuvas slopino garso galią ~30% nuo pradinio 164,13 dB iki 115,1 dB dydžio per 10 milisekundžių. Tikėtina, kad pagaminus ir išbandžius šį slopintuvą realiomis sąlygomis būtų pasiektas laukiamas 18 dB garso galios slopinimo rezultatas.

#### **4. EKSPERIMENTINIŲ BANDYMŲ IR SKAITINIO MODELIO REZULTATŲ PALYGINIMAS**

Šis skyrius yra skirtas palyginti ankstesniuose skyriuose aprašytų atliktų eksperimentinių bandymų rezultatus su skaitinio modeliavimo programa DS Solidworks flow simulation atliktų modeliavimų gautais rezultatais.

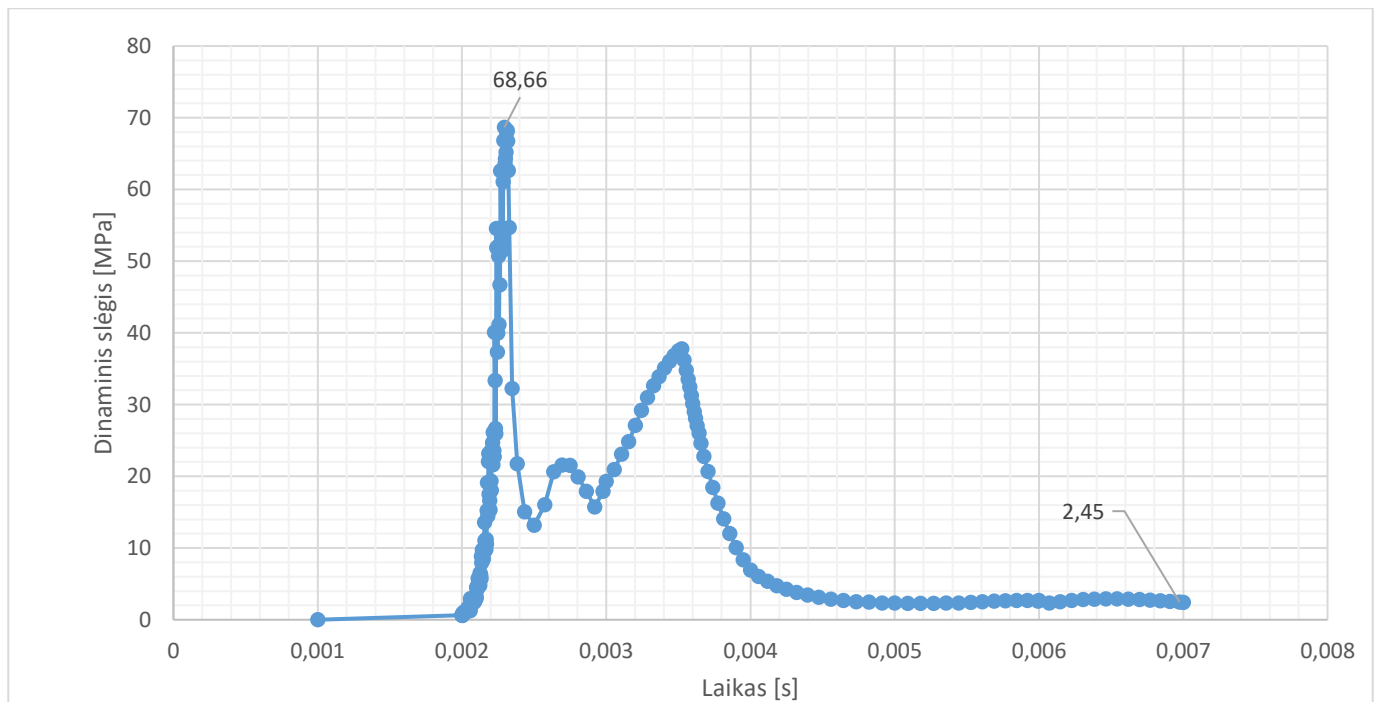
##### **4.1. Skaitinio modeliavimo rezultatai**

Kadangi skaitinis modeliavimas buvo atliekamas per laiko tarpą ir pasirinktu laiko žingsniu, kurį kulka skrieja ginklo vamzdžiu ir slopintuvu, todėl gauti rezultatai atvaizduojami grafiškai ir analizuojami pasirinkti parametrai tik tokiu pat laiko momentu (pateikta 4.1 Pav. Dinaminio slėgio ir garso galios laukų pasiskirstymas be slopintuvo). DS Solidworks flow simulation programa leidžia atitinkamai pasirinkti norimus analizuoti parametrus ir juos atvaizduoti. Taip pat pasirinkus tikslo režį (goal plot) programa gali sugeneruoti parametro kitimo grafiką priklausomai nuo laiko, skaičiavimo iteracijų ar kompiuterio, kuriuo atliekamas modeliavimas sugaišto laiko. Žemiau patiekiamuose paveiksluose yra atvaizduojami skaitinio modeliavimo rezultatai frontalinės slopintuvo plokštumos skerspjūvyje.



4.1 Pav. Dinaminio slėgio ir garso galios laukų pasiskirstymas be slopintuvo

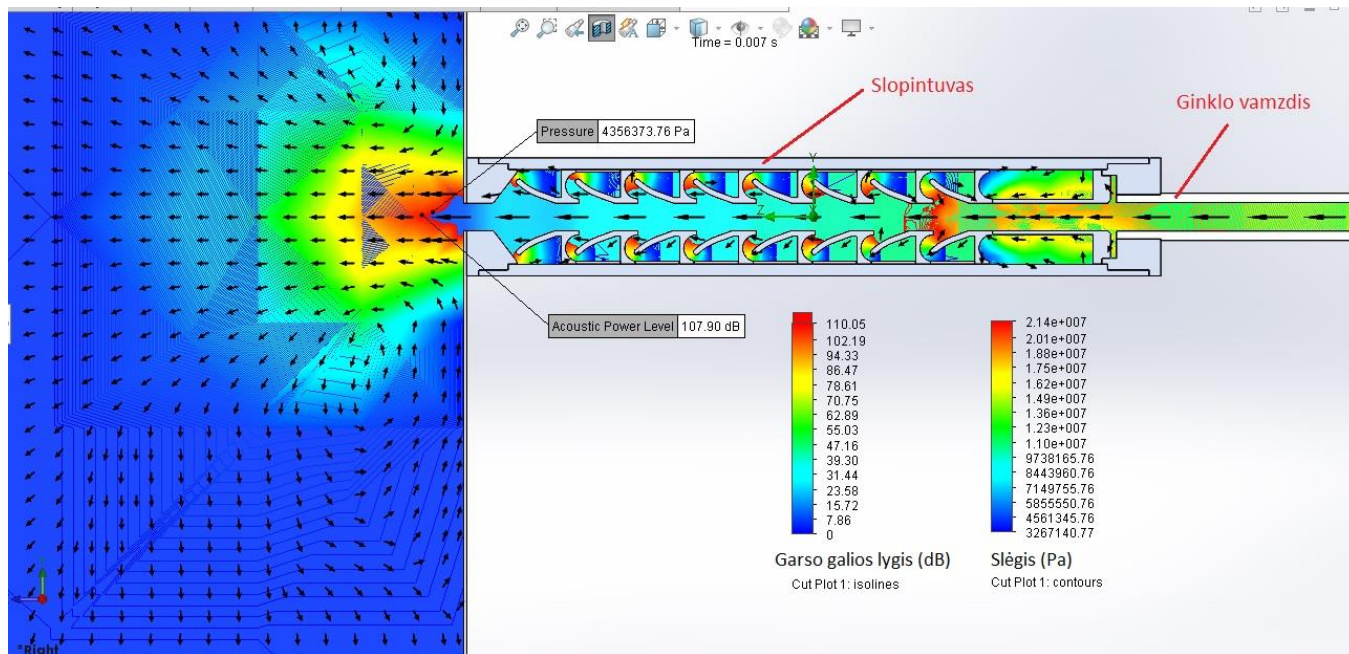
Pasirinktas tikslo režis – dinaminis slėgis. Programos sugeneruotas tikslo režio grafikas (pateikta 4.2 Pav. Dinaminio slėgio pasiskirstymas be slopintuvo) kuomet skaitinis modeliavimas atliekamas imituojant šūvį be slopintuvo.



4.2 Pav. Dinaminio slėgio pasiskirstymas be slopintuvo

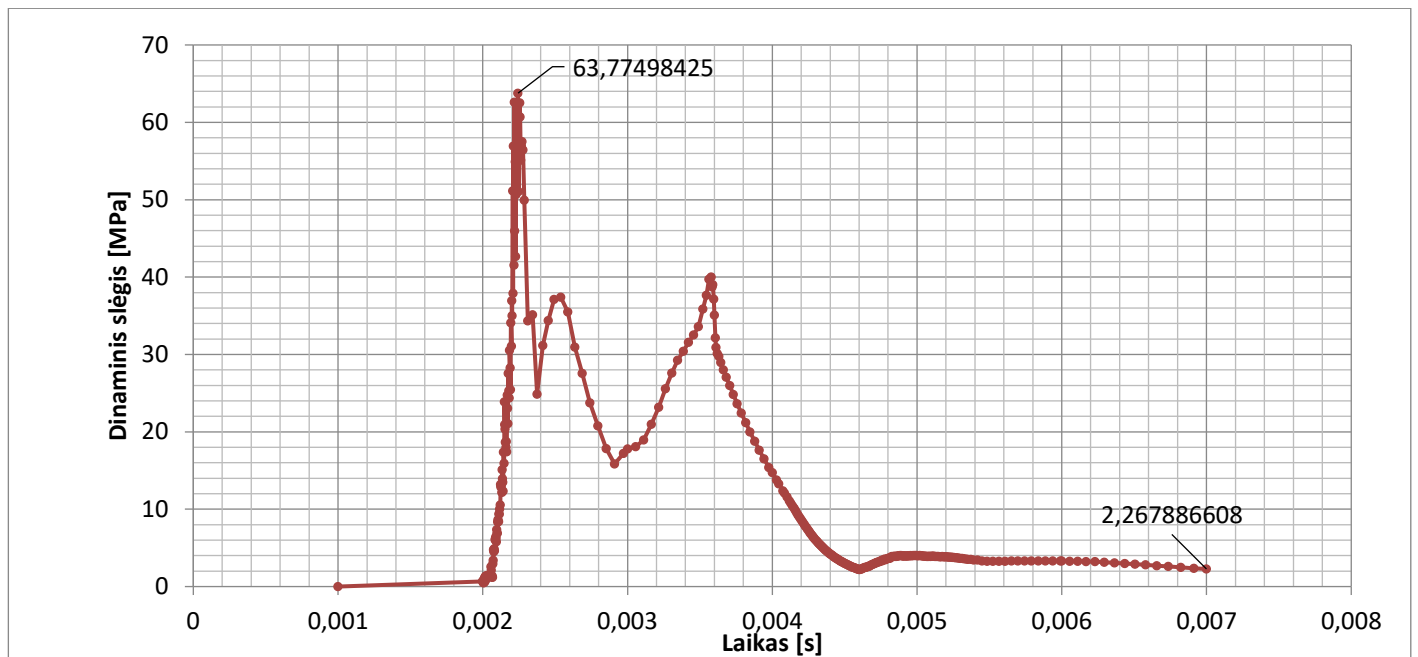
Sumodeliuotame skaitiniame modelyje fiksuojama maksimali slėgio reikšmė siekia 68,66 MPa praėjus 2,2 milisekundėms po šūvio ir 130,9 dB garso galią 7 milisekundėms po šūvio. Slėgio kitimo

grafike matomas žymus, net apytiksliai pusę maksimalios slėgio reikšmės pasiekiantis pikas praėjus 3,6 milisekundei po šūvio, kurio reikšmė siekia  $\sim 37,7\text{Mpa}$ . Šio piko susidarymo prigimtis susijusi su ginklo vamzdyje vykstančiu chaotišku inertinių dujų judėjimu, sukuriavimu ir lyginant su aplinka labiau įkaitusio vamzdžio.



4.3 Pav. Dinaminio slėgio ir garso galios laukų pasiskirstymas su slopintuvu

Pasirinktas tikslo režis – dinaminis slėgis. Programos sugeneruotas tikslo režio grafikas kuomet skaitinis modeliavimas atliekamas imituojuant šūvį su slopintuvu (pateikta 4.3 Pav. Dinaminio slėgio ir garso galios laukų pasiskirstymas su slopintuvu) o jo dinaminio slėgio kitimo grafikas pateikiamas 4.4 Pav. Dinaminio slėgio pasiskirstymas su slopintuvu



4.4 Pav. Dinaminio slėgio pasiskirstymas su slopintuvu

Sumodeliuotame skaitiniame modelyje fiksuojama maksimali slėgio reikšmė siekia 63,77 MPa praėjus 2,2 milisekundėms po šūvio ir 107,9 dB garso galią 7 milisekundėms po šūvio. Slėgio kitimo grafike matomas slėgio pikas praėjus 3,6 milisekundei po šūvio, kurio reikšmė siekia ~39,9Mpa. Apibendrintų skaitinių modeliavimų rezultatų atvaizdavimas pateikiamas 4.1 Lentelė. Skaitinių modeliavimų rezultatų palyginimas ir 4.5 Pav. Slėgio kitimo grafikas

4.1 Lentelė. Skaitinių modeliavimų rezultatų palyginimas

	Be slopintuvo	Su slopintuvu	$\Delta$	$\Delta, \%$
$p, (MPa)$	68,66	63,77	4,89	7,2%
$L_n, (dB)$	130,9	107,9	23	17,6%

Lentelėje 4.1 pateiktas slėgio pokytis  $\Delta p$ , apskaičiuojamas:

$$\Delta p = p_2 - p_1 = 68,66 - 63,77 = 4,89 \text{ MPa} \quad 4.1$$

Norint aiškiau suprasti ar gautas slėgio pokytis yra reikšmingas ir ar jis gali būti vertinamas kaip ženklus apskaičiuojame procentinę slėgio pokyčio išraišką:

$$\Delta p\% = 100\% - \left(\frac{p_1}{p_2} \times 100\right) = 7,2\% \quad 4.2$$

Procentinis slėgio pokyčio skirtumas neatrodo toks ženklus, tačiau esminis parametras, kuris geriausiai atskleidžia ginklo garso slopintuvo naudą yra garso galios pokytis ir garso galios pokyčio procentinė išraiška.

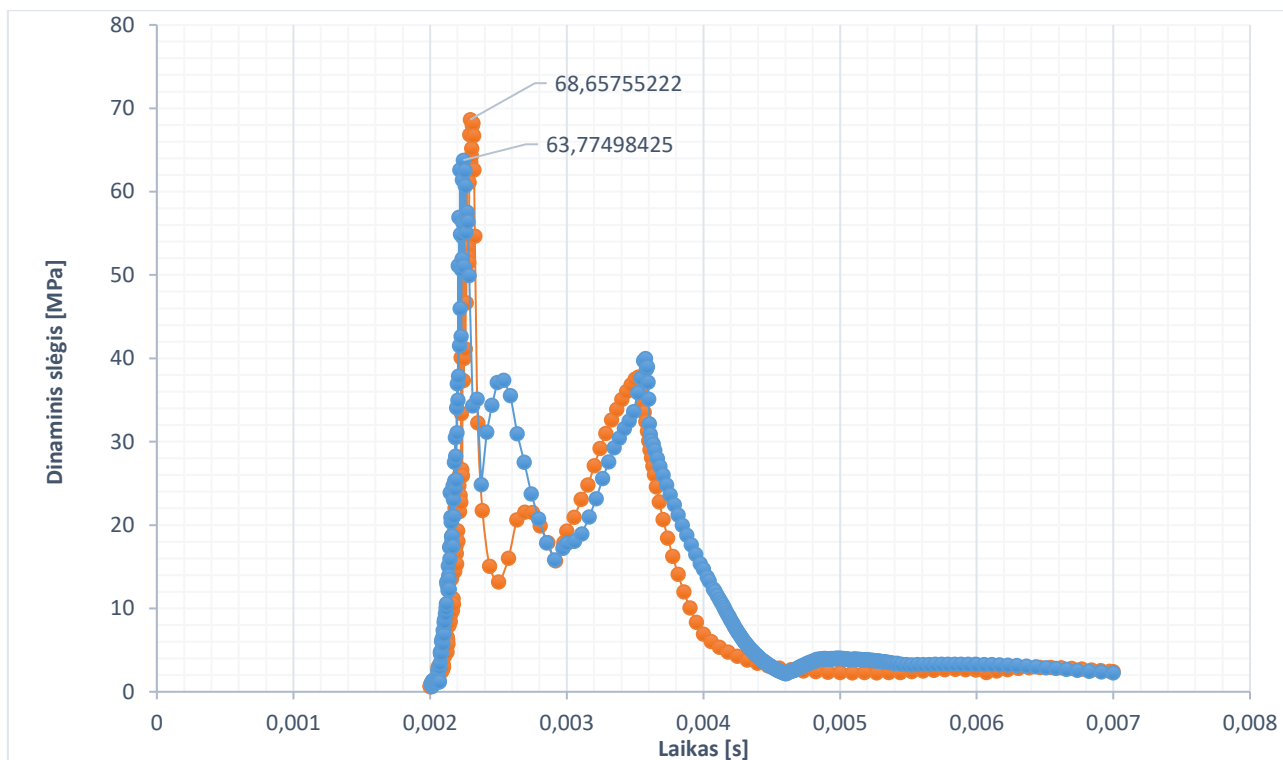
Lentelėje 4.1 pateiktas garso galios pokytis  $\Delta L_n$ , apskaičiuojamas:

$$\Delta L_n = L_{n_2} - L_{n_1} = 130,9 - 107,9 = 23 \text{ dB} \quad 4.3$$

Garso galios pokyčio procentinė išraiška apskaičiuojama:

$$\Delta L_n \% = 100\% - \left( \frac{L_{n_1}}{L_{n_2}} \times 100 \right) = 17,6\% \quad 4.4$$

Vertinant slėgio pokyčio procentinę išraišką ir garso galios pokyčio procentinę išraišką matomas skirtumas, kuris ir yra realiai juntama slopintuvo nauda šaulio klausos organams.



4.5 Pav. Slėgio kitimo grafikas

Grafike vaizduojamos dvi kreivės, mėlyna kreivė vaizduoja fiksuotą slėgio kitimą per laiką, kuomet šūvis atliekamas su slopintuvu, kita, oranžine kreive fiksuotą slėgio kitimą per laiką, kuomet šūvis atliekamas be slopintuvo. Kadangi kulkos pradinis skriejimo greitis yra  $V_0 = 980 \text{ m/s}$  todėl kulka skriedama ginklo vamzdžiu (be slopintuvo) palieka vamzdį anksčiau, sukeldama slėgio piką 68,66 MPa atvaizduojamą grafike, tačiau būna fiksuojamas dar vienas pikas dėl to, nes slopintuvą palieka karštos inertinės dujos. Šūvio su slopintuvu atveju yra fiksuojamas vienas pikas 63,77 MPa, kuris sukliamas kulcai jau palikus slopintuvą o didelė dalis inertinių dujų sugeneruotos šilumos yra absorbuojama slopintuvo ir tik nedidelė jų dalis palieka slopintuvą sukeldamos antrinį slėgio piką, kuris yra mažesnis lyginant šūvio modeliavimą be slopintuvo.

Šūvio modelis su slopintuvu buvo 23dB tylesnis (sugeneravo mažiau garso galios ~17,6%) ir sukėlė 4,89 MPa mažesnę slėgį (sugeneravo mažesnę slėgį ~7,2%), kas leidžia teigti, kad suprojektuotas slopintuvas yra efektyvus ir jeigu būtų pagamintas ir išmėgintas realiomis sąlygomis

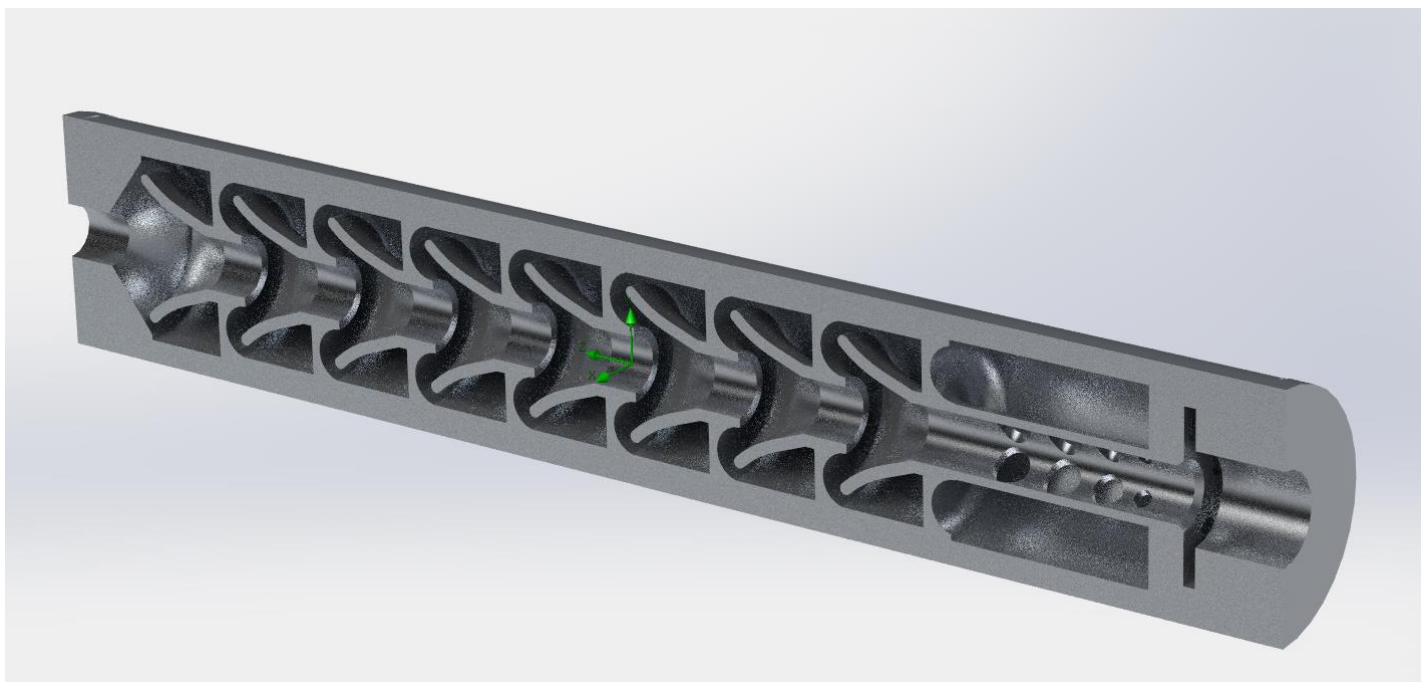
pasiektų 18dB garso galios slopinimo tikslą, nes pakankamai gerai absorbuotų karštį ir atvėsintų karštas inertines dujas, sumažintų jų sukeltą slėgį.

#### 4.2. Modeliuoto garso slopintuvo ekonominis savikainos vertinimas

Garso ir liepsnos slopinimo įtaisų gamyba, platinimas yra reglamentuoti valstybiniais teisės aktais ir įstatymais (Lietuvos Respublikos ginklų ir šaudmenų įstatymas Nr. IX-705 pakeitimo įstatymas), todėl pagal Lietuvos Respublikos ginklų ir šaudmenų kontrolės įstatymą duslintuvai ( garso slopintuvai ) priskiriami prie A kategorijos ginklų priedėlių ir civilinėje apyvartoje draudžiami. Tačiau kitose valstybėse, tokiose kaip Jungtinės Amerikos Valstijos, Norvegija slopintuvų naudojimas medžioklėje yra legalus, todėl jų galima nusipirkti ar net pasigaminti, tačiau vienu ar kitu būdu įgytas šūvio garsą ar liepsną slopinantis įtaisas turi būti išbandytas akredituotos įstaigos, užregistruotas į valstybinę duomenų bazę.

Skaitinio modeliavimo rezultatais patikrintas garso slopinimo įtaisas teoriškai galėtų pasiekti neblogų garso slopinimo rezultatų, tačiau yra tikslinga įvertinti galimą tokio slopinimo įtaiso savikainą, kurią sudarytų medžiagų kaina, apdirbimo paslaugos o norint eksploatuoti prisidėtų ir bandymų ekspertizės kaštai.

Projektuoto skaitiniam modeliavimui garso slopintuvo medžiagų kiekių žiniaraščio sudarymui reikalingas skaitinis modelis pateikiamas 4.6 paveiksle.



4.6 Pav. Skaitinio garso slopintuvo modelio pjūvis

Iš modelio sudarytas medžiagų kiekių žiniaraštis pateikiamas 4.2 lentelėje:

4.2 Lentelė. Medžiagų kiekių žiniaraštis

Pavadinimas	Kiekis, vnt.	Masė, g.	Ruošinio ilgis, m.
Vidinis segmentas	8,00	84,8	0,26
Distancinis žiedas	7,00	27,58	0,18
Išorinis korpusas	1,00	263,43	0,24
Tvirtinimo flanšas	1,00	40,92	0,03
Pirminė išsiplėtimo kamera	1,00	12,13	0,05
Fiksacinis flanšas	1,00	38,82	0,03
Viso:	19,00	467,68	

Aštuoniems vienetams vidinių segmentų (pavaizduota 4.7 paveiksle), kurie laužia ir nukreipia inertinių karštų dujų srautą vidine glotnia pusiauokampine, kuomet juos kerta šaudmuo per centre esančią kiek didesnę nei kulkos diametras kiaurymę, gaminti naudojamas AW 6060 T6 kietumo klasės temptinis Ø40mm. 260mm. ilgio aliuminio strypo ruošinys. Detalės paviršiaus glotnumas turi didelę įtaką inertinių karštų dujų sklaidai ir pasiskirstymui slopintuvo viduje.

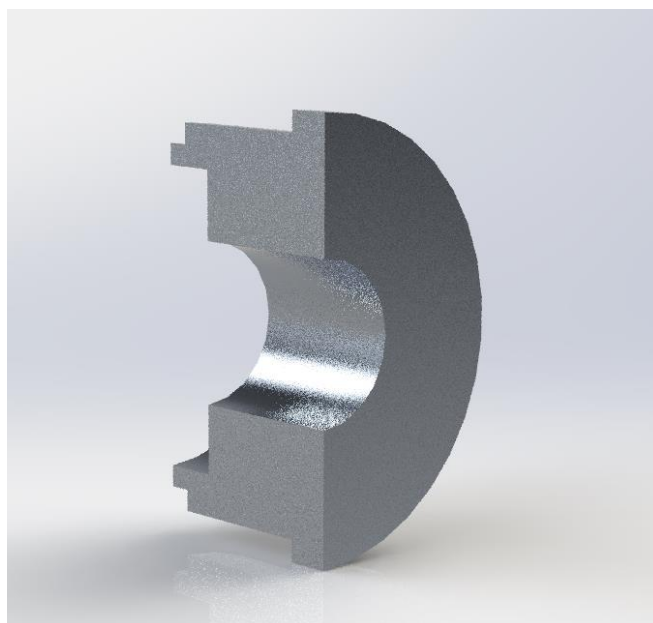


4.7 Pav. Slopintuvo vidinis segmentas

Septyniems vienetams distancinių žiedų, kurių pagrindinė paskirtis centruoti ir išlaikyti distanciją tarp visų vidinių segmentų, gaminti naudojamas AW 6060 T6 kietumo klasės temptinis Ø40mm. 180mm. ilgio aliuminio strypo ruošinys. Tvirtinimo falnšui (pavaizduota 4.8

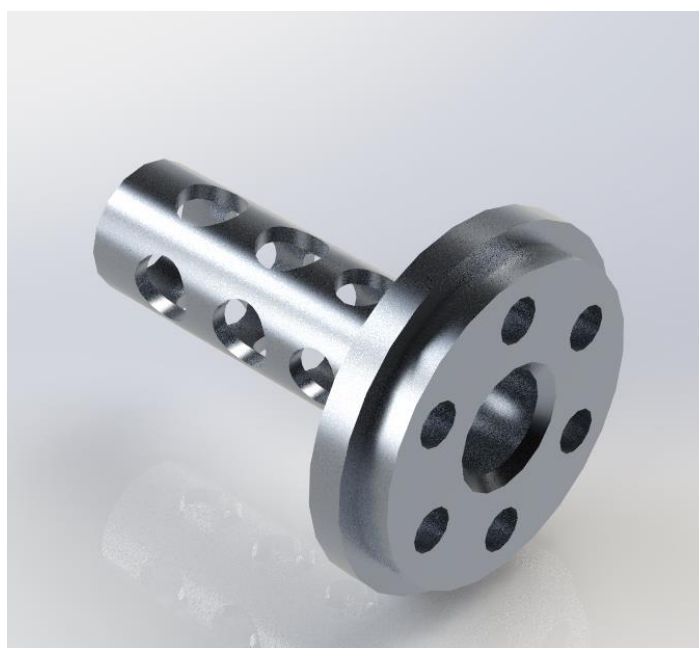


paveiksle), kurio paskirtis tvirtinti slopintuvą prie ginklo vamzdžio per centrinėje kiaurymėje pjautą smulkaus žingsnio sriegį. Tvirtinimo flanšui gaminti naudojamas AW 6060 T6 kietumo klasės temptinis  $\text{Ø}40\text{mm}$ . 30mm. ilgio aliuminio strypo ruošinys.



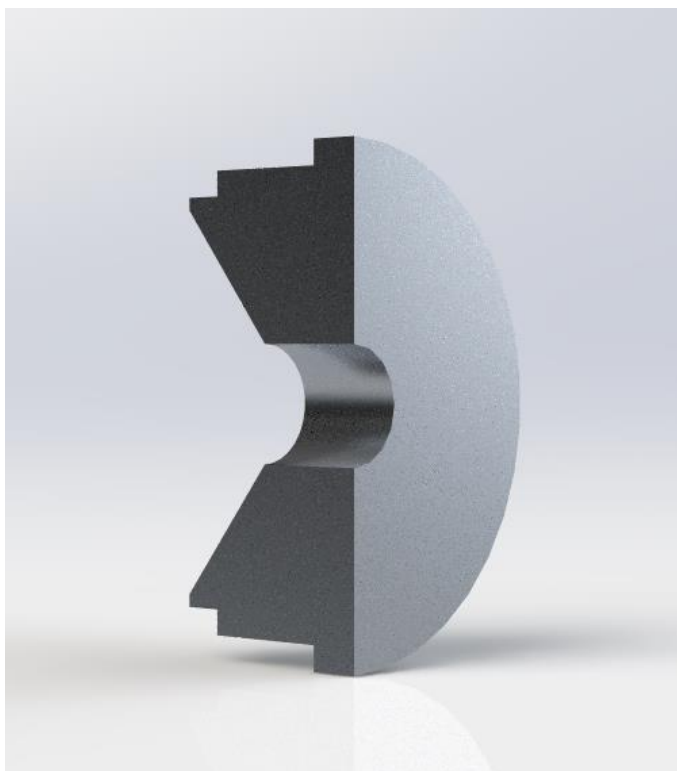
4.8 Pav. Slopintuvo tvirtinimo flanšas

Pirminiai išsiplėtimo kamerai (pavaizduota 4.9 paveiksle), kuri skirta sulaikyti pirminiai šūvio metu išsiskyrusiai inertinių dujų bangai bei jos šilumai absorbuoti į aliuminio korpuso sieneles, gaminti naudojamas AW 6060 T6 kietumo klasės temptinis  $\text{Ø}40\text{mm}$ . 50mm. ilgio aliuminio strypo ruošinys.



4.9 Pav. Slopintuvo pirminė išsiplėtimo kamera

Fiksaciniam flanšui (pavaizduota 4.10 paveiksle) gaminti naudojamas AW 6060 T6 kietumo klasės temptinis Ø40mm. 30mm. ilgio aliuminio strypo ruošinys.



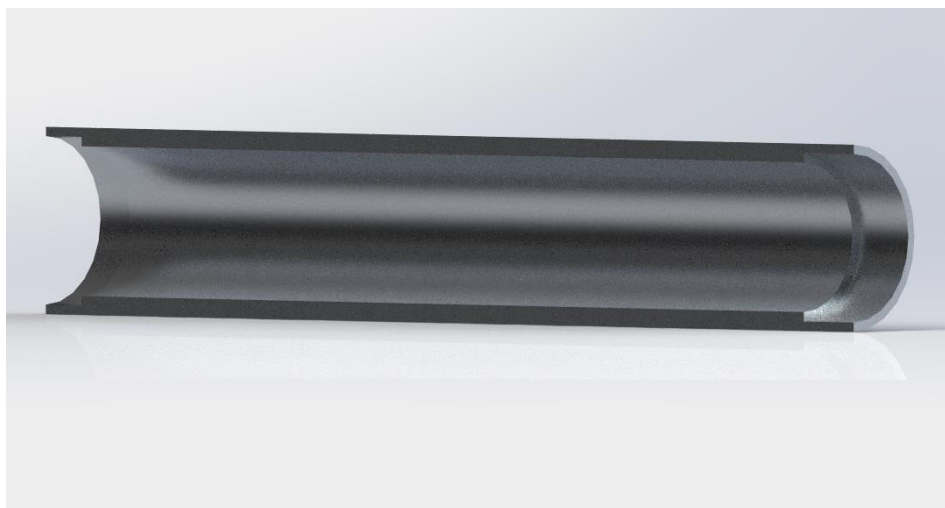
4.10 Pav. Slopintuvo fiksinis flanšas

Visoms detalėms, kurios gaminamos iš temptinio AW 6060 T6 kietumo klasės Ø40mm. strypo reikės 0,55m., tačiau papildomai kainuoja pjovimo paslauga. Ruošiniai iš AW 6060 T6 kietumo klasės temptinio Ø40mm. aliuminio strypo kainuotų 14,26€ (Lankava internetinė parduotuvė). Skaičiavimai pateikiami 4.3 lentelėje.

4.3 Lentelė. Ruošinių iš AW 6060 T6 strypo kaina

Pavadinimas	Kiekis, vnt.	Ruošinio ilgis, m.	Žaliavos kaina, m.	Pjūvio kaina, Eur.
Vidinis segmentas	8,00	0,26	6,058	0,63
Distancinis žiedas	7,00	0,18	4,194	0,54
Tvirtinimo flanšas	1,00	0,03	0,699	0,09
Pirminė išsiplėtimo kamera	1,00	0,05	1,165	0,09
Fiksacinis flanšas	1,00	0,03	0,699	0,09
Viso:	18,00	0,55	12,82	1,44

Išoriniam slopintuvo korpusui (pavaizduota 4.11 paveiksle) pagaminti naudojamas AW 6060 T6 kietumo klasės temptinis Ø40x5mm. aliuminio vamzdis, kurio reikės 0,24m.



4.11 Pav. Slopintuvo išorinis korpusas

Rinkoje tokie vamzdžiai parduodami minimaliu kiekiu 1m., todėl sudarant medžiagų kiekių žiniaraštį skaičiuojama, kad būtų įsigijamas rinkoje parduodamas 1m., tačiau gaminant slopintuvą būtų atpjaujamas reikiamas kiekis medžiagos, kuris kartu su pjovimo paslauga kainuotų 9,09€.

Visi detalių apdirbimui reikalingi ruošiniai kainuotų 23,35€. Tačiau suprojektuotos detalės reikalauja didelio tikslumo ir jų apdirbimas užtruktų nemažai laiko, būtų naudojamos koordinatinio ištekimo, CNC tekimo ir vidinio ištekimo paslaugos, kurios rinkoje kainuoja ~70€/val. Todėl net ir labai apytikriai skaičiuojant, kad visiems detalių apdirbimo darbams atlikti pakaktų 1d.d. o tai yra 8 darbo valandų, kurios kainuotų 560€ viso slopintuvo skaičiuotinoji savikaina sudarytų 583,35€. Taip pat prie savikainos kaštų reikalinga įtraukti gamintojo pralaidumą, kas yra pagrindinis bet kokios laisvosios rinkos ekonomikos sąlygomis dirbančios įmonės siekis. Paprasčiau tariant uždirbti pinigus (dabar ir ateityje), todėl bet koks gamintojas pagamintą produktą parduotų ne už savikainą o už pardavimo kainą, kuri dengs OE (veiklos kaštai angl. Operating Expenses), TVC (visiškai kintami kaštai angl. Totally Variable Costs) ir leis iš vykdytos veiklos uždirbti pinigų NP (pelnas prieš mokesčius angl. Net Profit) todėl šio produkto pardavimo kaina galėtų siekti 816,69€ jeigu įmonės pralaidumas šiam produktui būtų 40%.

Rinkoje randami analogai ir jų kainos (Surefire internetinė parduotuvė) vistiek kainuoja ženkliai brangiau t.y., nuo 1154,25€ iki 1509,68€ o tai yra daugiau nuo 41,33% iki 84,85% brangiau nei apskaičiuotoji suprojektuoto garso slopintuvo kaina. Tačiau galima daryti prielaidą, kad slopintuvo iš minėtos internetinės parduotuvės pardavimo kaina yra didesnė dėl to, kad joje parduodami slopintuvai yra išbandyti akredituotoje laboratorijoje, atitinka visus keliamus saugumo reikalavimus.

## 5. IŠVADOS

1. Išsiaiškintos šūvio ginklu metu sukuriamos garso galios ir slėgio parametrų priklausomybės nuo ginklo ir šaudmens, kuomet šūvis atliekamas su garso slopinimo įtaisu ir be jo.
2. Sistema Solidworks Flow Simulation sudarytas garso slopinimo įtaiso skaitinis modelis, kuris buvo projektuotas remiantis teorijoje pateiktais teiginiais ir nurodymais.
3. Tyrimo metu nustatyti teoriniai projektuoto garso slopintuvo garso galios ir susidarančio slėgio dydžiai skirtingais laiko momentais po šūvio su slopinimo įtaisu ir be jo.
4. Gautas pakankamai geras šūvio be slopinimo įtaiso teorinių ir eksperimentinių garso galių duomenų sutapimas, skaitinio modelio garso galia buvo tik 11,85 % mažesnė. Tačiau šūvio su slopinimo įtaisu teorinių ir eksperimentinių garso galių kreivės nesutapo taip tiksliai ir realaus bandymo rezultatai yra net 17,14 % didesni.
5. Teorinis garso slopintuvo naudingumas yra 18 % o praktiniškai išbandyto garso slopintuvo naudingumas siekia tik 1 %.

Darbo tikslas pasiektas ir gauti skaitinio modeliavimo rezultatai lyginant su faktiniais realių bandymų rezultatais koreliuoja. Lyginamieji duomenys pateikiami 5.1 lentelėje

5.1 Lentelė. Tyrimų metodų rezultatų palyginimas

Tyrimo metodas	Šovinio kalibras	Išmatuota garso galia be slopinimo, dB	Išmatuota garso galia su slopinimu, dB	Išmatuotų garso galių skirtumas, dB
Realus bandymas	.223	148,5	148,1	0,4
Skaitinis modeliavimas	.223	130,9	107,9	23

Skaitinio modeliavimo garso galios rezultatai lyginant su realaus bandymo rezultatais skiriasi ~12% o tai iš tiesų rodo ganėtinai tikslus skaitinio modeliavimo duomenis, o atitinkamai su garso slopinimo įtaisu ~28%. Tokią įtaką duomenų skirtumui gali turėti netikslūs skaitinio modeliavimo duomenys, realiame bandyme naudotas skaitmeninis garso galios matuoklis ir jo paklaidos tolerancijos ribos ir kiti faktoriai.

Rinkoje esančių garso slopintuvų deklaruojamas garso galios slopinimas lyginant su realaus bandymo rezultatais skiriasi, nes rinkoje parduodamų gaminių efektyvumas deklaruojamas ~10%, t.y. šūvio garso galia su slopintuvu turėtų būti viena dešimtąja mažesnė nei šūvio garso galia be slopinimo įtaiso. Skaitinio modeliavimo rezultatai rodo, kad sumodeliuotu garso slopintuvu pavyko garso galią sumažinti ~18%.

Viename iš darbo poskyrių įvertinta ir finansinė modeliuoto garso slopintuvo nauda lyginant su rinkoje tiekiamais analogiškais įtaisais. Apskaičiuotas kainų skirtumas siekia nuo 41,33% lyginant

su pigiausiu rinkoje parduodamu garso slopintuvu iki 84,85% lyginant su vienu brangiausių garso slopintuvu randamu rinkoje.

Praktinė darbo reikšmė darbe atskleidžiama per skaitinio modeliavimo principo taikymo naudą, paprastumą ir lengvą panaudojimą skaičiuojant balistinius parametrus, kurie susiję su žmonių klausos organų apsauga nuo didelės garso galios smūgio bangos.

## LITERATŪRA

1. Broughton, B. (2002 m. Kovo 2 d.). <http://www.freerepublic.com>. Nuskaityta iš <http://www.freerepublic.com/focus/fr/621069/posts>
2. Burdyko, M. (2010). *Lietuvos Respublikos Valstybinis patentų biuras. Patentų Nr. Šūvio garso slopinimo būdas ir slopintuvas. Patentas.*
3. Embar, W. (2016). *Vegan Peace.* Nuskaityta iš [http://www.veganpeace.com/gun\\_control/gunsworldwide.htm](http://www.veganpeace.com/gun_control/gunsworldwide.htm)
4. Group, K. (2010). *Quartz High-Pressure Sensor for Ballistic Pressure Measurement to 6 000 bar.* Nuskaityta iš [www.ien.eu](http://www.ien.eu): [https://www.ien.eu/uploads/tx\\_etim/Page\\_37\\_Kistler\\_39706.pdf](https://www.ien.eu/uploads/tx_etim/Page_37_Kistler_39706.pdf)
5. Joseph P. Avery, P. D. (n.d.). *5.56 vs .223 – What You Know May Be Wrong.*
6. Journal, A. S. (2013 m. Gegužės 15 d.). <http://americanshootingjournal.com>. Nuskaityta iš <http://americanshootingjournal.com/measuring-gun-suppressor-sound-pressure/>
7. Klaipėdos rajono savivaldybės visuomenės sveikatos biuras. (2016 m. Balandžio 23 d.). <http://www.visuomenessveikata.lt>. Nuskaityta iš Visuomenės sveikatos biuras: <http://www.visuomenessveikata.lt/index.php/lt/triuksmo-poveikis-sveikatai/139-triuksmo-poveikis-zmogaus-sveikatai.html>
8. Lankava internetinė parduotuvė. (2019 m. Balandžio 22 d.). [www.lankava.lt](http://www.lankava.lt). Nuskaityta iš <https://www.lankava.lt/aliuminio-gaminiai/aliuminio-vamzdis-d40-x-5kvkatmm--aw6060--39296.html>
9. Lietuvos Respublikos vidaus reikalų ministerija, P. d. (2017 m. Lapkričio 27 d.). <https://e-seimas.lrs.lt>. Nuskaityta iš <https://e-seimas.lrs.lt/portal/legalAct/lt/TAP/183a51f1bf9f11e7af36e75c0ac79247>
10. Nick Wing, Jessica Carro. (2017 m. Kovo 14 d.). *Huffingto Post.* Nuskaityta iš [www.huffpost.com](http://www.huffpost.com): [https://www.huffingtonpost.com/entry/gun-silencers-hearing-protection-act\\_us\\_58c6b59fe4b0ed71826e1be0](https://www.huffingtonpost.com/entry/gun-silencers-hearing-protection-act_us_58c6b59fe4b0ed71826e1be0)
11. Philip H., Jason M. Wong. (2012). *Physics Demands A New Basic Combat Weapon.* [www.armyupress.army.mil](http://www.armyupress.army.mil).
12. Surefire. (2019 m. Balandžio 22 d.). [www.surefire.com](http://www.surefire.com). Nuskaityta iš <https://www.surefire.com/tactical-equipment/sound-suppressors/rifle-carbine-suppressors/556-mm-223-caliber.html>
13. USAMS. (1968). *Engineering design handbook. Gun series. Muzzle devices.* Headquarters, U.S. army material command.
14. БЫКОВ Н.В.; ВЛАДИМИРОВ В.С.; ЗЕЛЕНЦОВ В.В. (2012). *Численное моделирование внутренней баллистики цилиндрикоконических стволов с использованием пластических снарядов.* Наука и Образование.

## PRIEDAI

Graižtinio šovinio kalibras	Slėgis vamzdyje (kPa)
.222 Remington	344 738
.22-250 Remington	448 159
.223 Remington	379 212
.223 WSSM	448 159
.243 Winchester	413 685
.25-06 Remington	434 370
.257 Roberts	372 317
.257 Roberts +P	399 896
.260 Remington	413 685
.264 Winchester Magnum	441 264
.270 Winchester	448 159
.270 WSM	448 159
.280 Remington	413 685
.284 Winchester	386 106
.30 Carbine	275 790
.300 Remington Short Ultra Magnum	448 159
.300 Remington Ultra Magnum	448 159
.300 Savage	324 054
.300 Weatherby Magnum	448 159
.300 Winchester Magnum	441 264
.300 WSM	448 159
.30-06 Springfield	413 685
.303 British	337 843
.30-30 Winchester	289 580
.30-30 Winchester (Saboted)	262 001
.308 Winchester	427 475
.308 Winchester (Saboted)	358 527
.32 Winchester Special	289 580
.338 Remington Ultra Magnum	448 159
.338 Winchester Magnum	441 264
.35 Remington	230 974
7mm Mauser	351 633
7mm Remington Magnum	420 580
7mm Remington Ultra Magnum	448 159
7mm STW	448 159
7mm Weatherby Magnum	448 159
7mm WSM	448 159
8mm Mauser	241 317
8mm Remington Magnum	448 159