

17-osios jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminės konferencijos
TRANSPORTO INŽINERIJA IR VADYBA,
vykusios 2014 m. gegužės 8 d. Vilniuje, straipsnių rinkinys

Proceedings of the 17th Conference for Junior Researchers 'Science – Future of Lithuania'
TRANSPORT ENGINEERING AND MANAGEMENT, 8 May 2014, Vilnius, Lithuania

Сборник статей 17-й конференции молодых ученых «Наука – будущее Литвы»
ИНЖЕНЕРИЯ ТРАНСПОРТА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПЕРЕВОЗОК, 8 мая 2014 г., Вильнюс, Литва

PARAKINIO ĮRENGINIO HIDRODINAMINIŲ IR TERMODINAMINIŲ PROCESŲ TYRIMAS

Dmitrijus Žitkovskis¹, Marijonas Bogdevičius²

^{1, 2}Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹d.zitkovskis@gmail.com; ²marijonas.bogdevicius@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje pateikiama informacija apie vidaus balistikos uždavinį. Aprašomi šūvio periodai ir matematiškai išreikšti pagrindiniai šūvio procesai (parako degimas ir dujų susidarymas, dujų darbas, kūno judėjimas ir vamzdžio atošliauža). Atlikti sistemos su 20 colių vamzdžiu ir šoviniu, pagamintu 7.62x51 šovinio bazėje teoriniai skaičiavimai. Pateikta gautos grafinės medžiagos analizė ir išvados.

Reikšminiai žodžiai: vidinė balistika, šūvis, parakas, sviedinys, degimas.

Įvadas

Vidaus balistika kaip mokslas tiria racionalaus parako užtaiso ar kitokių varančių dujų energijos naudojimo galimybes, jų judėjimą ir kitus procesus vamzdyje ar parakinių raketų degimo kameroje. Pagrindinis uždavinys – nustatyti kaip tam tikros masės kūnas įgyja tam tikrą pradinį greitį, kada maksimalus slėgis vamzdyje neviršija reikiamo dydžio (Carlucci 2008).

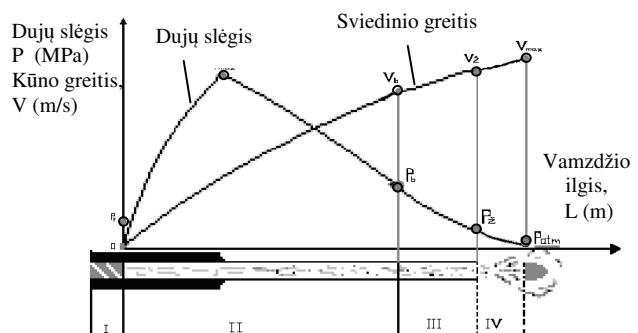
Vidinės balistikos tyrimai skirti ne tik šaunamųjų ginklų, pabūklų bei raketų projektavimui, bet ir statybinių įtaisų (pistoletai ir įrankiai vamzdžių bei bėgių smūginiam kirpimui, parakiniai perforatoriai ir peiliai pjauti kabelius, smūginiai presai) tobulinimui. Taip pat, parakiniai dujų generatoriai naudojami automobilių oro pagalvėse ir specialiuose apsaugos priemonėse.

Vidinės balistikos procesas (toliau vadinamas šūviu) suskaidomas į keturis, einantys vienas paskui kitą, periodus (Serebriakov 1962).

1 pav. parodyta, kaip kinta parako dujų slėgis (staičiai kyla iki P_{max} , o po to lėtai sumažėja, tūriui didėjant) ir kūno greitis (kuo toliau mažėja slėgis, tuo lėčiau padidėja kūno greitis) išilgai vamzdžio.

Pirmas arba paruošiamasis periodas tęsiasi nuo parako užtaiso degimo pradžios iki visiško kūno išsirežimo į vamzdžio graižtvą (arba, esant lygiam vamzdžiui, iki kūno judėjimo pradžios). Antras, arba pagrindinis periodas tęsiasi nuo kūno judėjimo pradžios iki visiško parako užtaiso sudegimo, kuris dega greitai kintančiame tūryje. Šio šūvio periodo metu sudega visas parako užtaisas ir kūnas pasislenka savo vamzdžio ilgio dalimi. Trečias

periodas – nuo visiško parako užtaiso sudegimo iki kūno išlėkimo iš vamzdžio kanalo. Šio periodo metu parako užtaisas jau nedega, tačiau stipriai suspaustos ir įkaitintos dujos slėgia kūną ir didina jo judėjimo greitį. Esant trumpam vamzdžiui, trečio periodo gali ir nebūti, nes iki kūno išlėkimo iš vamzdžio kanalo parako užtaisas nespėja sudegti (Jonevičius 2006). Ketvirtojo periodo metu kūnas išlekia iš vamzdžio, bet parako dujos vis dar veikia jo dugną. Ketvirtas periodas pasibaigia tuo momentu, kai parako dujų slėgis į kūno dugną susilygina su oro slėgiu.



1 pav. Slėgio ir kūno greičio priklausomybės nuo atstumo (vamzdžio ilgio): P_{fr} – forsavimo slėgis (slėgis, esant kuriam kūnas pradeda judėti), P_{max} – maksimalus parako dujų slėgis vamzdyje, P_b – parako dujų slėgis, kai sudegė visas parako užtaisas (2-ojo periodo pabaiga), P_z – žiotinis slėgis (parako dujų slėgis išlėkimo iš vamzdžio metu), P_{atm} – atmosferinis slėgis. V_b – kūno greitis, kai sudegė visas parako užtaisas (2-ojo periodo pabaiga), V_z – žiotinis greitis (kūno išlėkimo iš vamzdžio metu), V_{max} – maksimalus kūno greitis

Pagrindiniai šūvio procesai

Pagrindiniai šūvio procesai:

1) parako degimo procesas ir parako dujų susidarymas (Miropolskij 1987).

2) parako cheminės energijos virsmas į sistemos „dujos-judantis kūnas-užtaisas-vamzdis“ kinetinę energiją. Be to, tokios sistemos judėjimas yra slenkamasis ir sukamasis. Kartu vamzdis veikiamas vidinių jėgų, t. y. vyksta sistemos atošliauža. (Fedaravičius 2005).

Priklausomybės, parodančios parako degimo ir dujų susidarymo procesus (Serebriakov 1962):

– dujų kiekis, priklausomai nuo sudegusios parako dalelės storio:

$$\psi = kz(1 + \lambda z + \mu z^2) \quad (1)$$

arba

$$\psi = (1 + \lambda z) = kz - (\lambda - 1)z^2, \quad (2)$$

čia: ψ – santykinė sudegusio parako dalis; z – santykinis sudegusio parako grūdelių storis; k , λ , μ – koeficientai, priklausantys nuo parako grūdelio formos.

– degančio parako paviršiaus ploto pokytis:

$$\frac{S}{S_1} = \sigma = 1 + 2\lambda z + 3\mu z^2, \quad (3)$$

čia: S_1 – parako grūdelio paviršiaus plotas; S – absoliutus degančio paviršiaus plotas.

– parako degimo greitis:

$$u = u_1 p, \text{ arba } u = Ap, \quad (4)$$

čia: A – lentelinis koeficientas; u – degimo greitis (m/s); p – slėgis (MPa).

– dujų (degimo produktų) susidarymo greitis:

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{s}{\Delta t} \frac{s}{s_1} u_1 p, \quad (5)$$

čia

$$\frac{s}{\Delta t} = \frac{x}{e_1}, \quad (6)$$

čia: $\frac{d\psi}{dt}$ – dujų susidarymo greitis; S_1 – parako grūdelio paviršiaus plotas; Δt – parako grūdelio tūris; S – absoliutus degančio paviršiaus plotas; u – degimo greitis.

Esant fiziniam degimo dėsnui, naudojamos priklausomybės:

$$\psi = f(I) \text{ arba } I = F(\psi), \text{ o taip pat } \frac{d\psi}{dt} = \Gamma p, \quad (7)$$

čia: Γ – lyginamasis dujų susidarymo intensyvumas.

Dujos, degant parakui, turi labai daug šiluminės energijos. Dalis šios energijos transformuojama į mechaninį darbą, dalis išspinduliuojama per vamzdžio sienelę, o likusi dalis lieka neišnaudota, nes įkaitusios parako dujos išmetamos iš vamzdžio į atmosferą kai kūnas išlekia iš vamzdžio (Gorohovoj 2007).

Šūvio metu vyksta energijos transformacija ir šis procesas aprašomas pirmuoju termodinamikos dėsniu.

$$dQ = dU + Ad \sum L \quad (8)$$

arba

$$Q = U + A \sum_{i=1}^n L, \quad (9)$$

čia: Q – visas šilumos kiekis, kuris išsiskiria parakui sudegus; U – parako dujų vidinė energija; $\sum L$ – dujų atlikto mechaninio darbo suma; $\frac{1}{A} = E$ – šilumos mechaninis ekvivalentas ($E = 4270 \text{ kg}^* \text{dm/kal}$).

Kūno judėjimas ir vamzdžio atošliauža išreiškiamos šiomis lygtimis (Homenko 1999):

– kūnui:

$$ps = \varphi m \frac{dv}{dt} \quad (10)$$

arba

$$ps = \varphi m v \frac{dv}{dt}, \quad (11)$$

– vamzdžiui:

$$p_{dg} s = M \frac{dV}{dt}, \quad (12)$$

čia: s – vamzdžio kanalo plotas; l – kūno poslinkis; p – dujų slėgis už kūno; p_{dg} – dujų slėgis į vamzdžio kanalo dugną; m – kūno masė; M – vamzdžio ir visų atošliaužos mechanizmų masė; v – sviedinio greitis; V – vamzdžio ir visų atošliaužos mechanizmų greitis; φ – koeficientas, įvertinantis energijos nuostolius.

Iš kūno judesio lygčių galima nustatyti ryšį tarp kūno greičio ir slėgio (funkcijos $p(t)$ ir $p(l)$) (Denny 2011)). Slėgio funkcija $p(t)$ esant tam tikram masteliui, parodo kūno pagreitį:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{s}{\varphi m} p. \quad (13)$$

Suintegravus, gauname:

$$v = \frac{s}{\varphi m} \int_{t_0}^t p dt, \quad (14)$$

$$s \int_0^1 p dl = \frac{\varphi m v^3}{2}, \quad (15)$$

$$v = \sqrt{\frac{2s}{\varphi m} \int_0^1 p dl}. \quad (16)$$

Kūno sukimasis apie savo išilginę ašį aprašomas lygtimi:

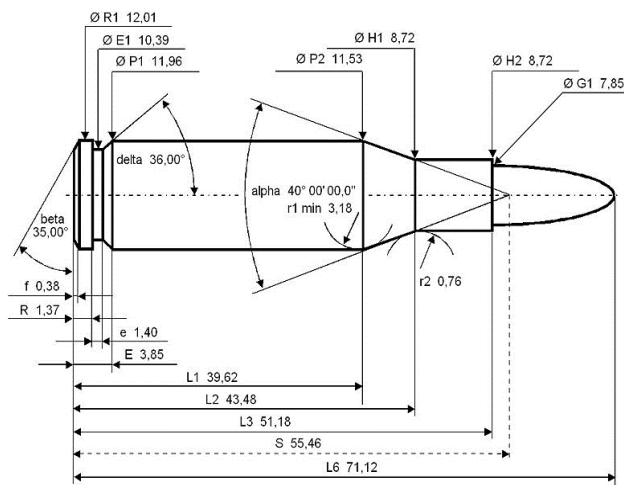
$$rN = J \frac{d\Omega}{dt}, \quad (17)$$

čia: r – atstumas nuo sukimosi ašies iki vamzdžio sienelės; N – sukimo jėga; J – kūno masių inercijos momentas; Ω – kampinis greitis; $\frac{d\Omega}{dt}$ – kampinis pagreitis.

Matematinio eksperimento tyrimo rezultatai

Matematiniam eksperimentiniam tyrimui, naudojant „Interior Ballistics: STANAG 4367“ programą apskaičiuoti ir grafiškai parodyti visi švio vidinės balistikos parametrai.

Šovinio geometriniai matmenys parodyti 2 pav. (Vaughn 1998), skaičiavimui reikalingi parametrai 1 lentelėje.



2 pav. Šovinio geometriniai matmenys

Atlikus skaičiavimus, gauti trijuose atraminėse švio taškuose (3 lentelė) pagrindiniai sistemos judėjimo ir parako dujų plėtimosi parametrai (2 lentelė).

3 lentelė. Pagrindiniai sviedinio judėjimo ir parako dujų plėtimosi duomenys trijuose atraminėse švio taškuose

	Laikas, ms	Sudegusi parako dalis	Kūno poslinkis, m	Kūno greitis, m/s	Maksimalus vidutinis balistinis slėgis, MPa	Slėgis į kūno dugną, MPa	Slėgis į šovinio lizdo dugną	Parako dujų temperatūra, K
Kai slėgis yra maksimalus	0,117	0,306	0,0070	188,74	661,3	599,1	692,5	2573,5
Kai sudegė visas parakas (2 periodo pabaiga)	0,482	1,0	0,2093	766,32	151,8	138,4	158,5	1674,8
Vamzdžio žiotyje (3 periodo pabaiga)	0,813	1,0	0,4860	883,76	51,1	47,3	53,0	1171,9

1 lentelė. Vidinės balistikos skaičiavimo pradiniai parametrai

Parametro pavadinimas	Matavimo vienetas	Reikšmė
Vamzdžio kanalo skerspjūvio plotas	m ²	4,751·10 ⁻⁵
Kūno masė	kg	9,3·10 ⁻³
Kūno kelias (vamzdžio ilgis be šovinio lizdo)	m	0,486
Tūščio vamzdžio tūris	m ³	2,309138·10 ⁻⁶
Graižtų žingsnis	kalibrų/aps	40
Pradinė vamzdžio ir parako temperatūra	°C	15
Oro temperatūros perdavimo koeficientas	$\frac{W}{m^2} / K$	11,35
Vamzdžio plieno tankis	kg/m ³	7860
Vamzdžio plieno šiluminė talpa	$\frac{J}{kg} / K$	460
Parako užtaiso masė	kg	2,9·10 ⁻³
Parako jėga	J/kg	1,05·10 ⁶
Parako užsidegimo temperatūra	K	2770
Šiluminis koeficientas gamma		1,25
Parako tankis	Kg/m ³	1600
Degimo greičio koeficientas beta	m/s/Pa	4,05·10 ⁻¹⁰
Degimo greičio koeficientas alfa		1
Kapsulės masė	kg	5,0·10 ⁻⁵
Kapsulės forsavimo jėga	J/kg	3,5·10 ⁵
Kapsulės liepsnos temperatūra	K	2500
Kapsulės kovolumas	m ² /kg	9,5·10 ⁻⁴
Parako grūdelių tipas		3 (cilindriniai)
Parako grūdelio ilgis	m	1,0·10 ⁻³
Parako grūdelio diametras	m	1,4·10 ⁻⁴

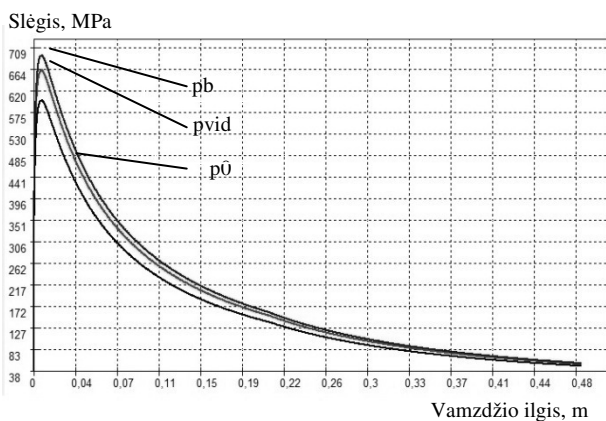
2 lentelė. Parako grūdelių skaičius, parako grūdelių skaičius, sistemos naudingumo koeficientas ir kūno energija

Parako grūdelių skaičius	16 484
Sistemos naudingumas	21,389 %
Kūno energija vamzdžio žiotyje, J:	3256

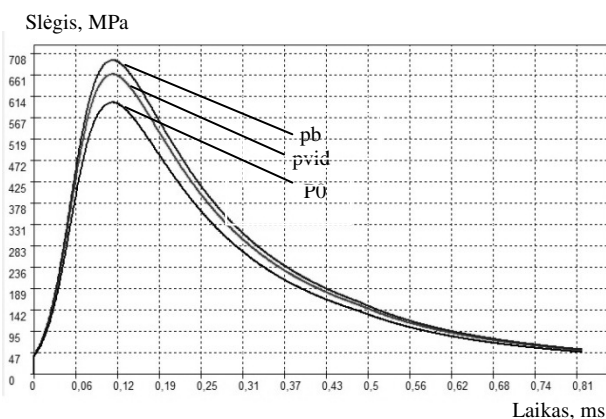
Parako dujų slėgio kitimas išilgai vamzdžio nuo parako užsidegimo momento iki kūno išlėkimo iš vamzdžio parodytas 3 pav.

Iš 3 pav. matoma, kad po parako užsiliepsnojimo slėgis labai staigiai kyla ir Pmax yra pasiekiamas kūnui praėjus vos 7 mm.

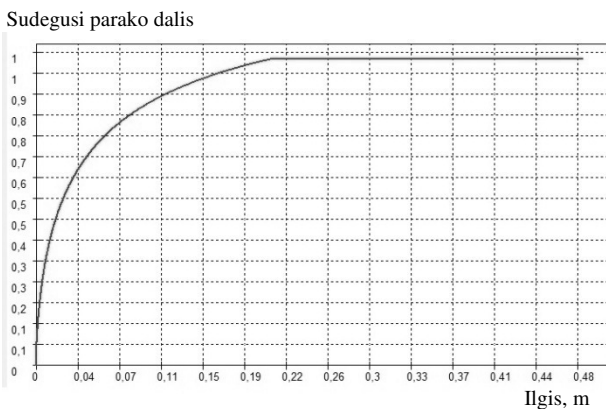
Parako dujų slėgio nuo parako užsidegimo momento iki tol, kol kūnas išlieka iš vamzdžio, kitimas laike parodytas 4 pav. Čia matosi, kad staigus slėgio šuolis (iki 47 MPa) – tai forsavimo slėgis, prie kurio kūnas pradeda judėti.



3 pav. Slėgių priklausomybė nuo vamzdžio ilgio. Pb – slėgis į vamzdžio kanalo dugną, Pvid – vidutinis balistinis slėgis, P0 – slėgis į kulkos dugną



4 pav. Slėgių priklausomybė nuo laiko



5 pav. Sudegusio parako kiekio priklausomybė nuo vamzdžio ilgio

Sudegusio parako kiekio kitimas išilgai vamzdžio, t. y. parako degimo intensyvumas parodytas 5 pav. Iš 5 pav. matoma, kad visas parakas sudega, kai kūnas praeina 20,93 cm, praėjus 43 % vamzdžio ilgio. Sekančius

Literatūra

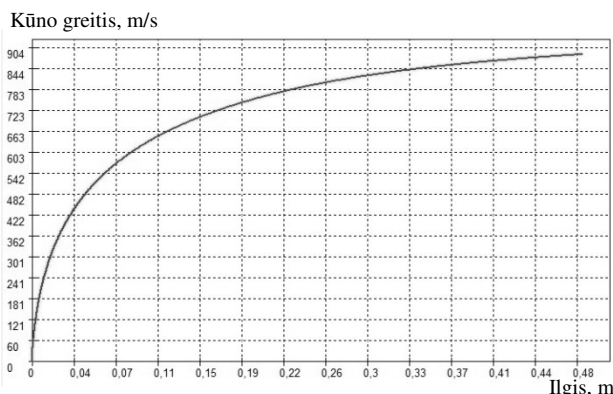
Carlucci, D. E.; Jacobson, S. S.; 2008. *Ballistics – Theory and Design of Guns and Ammunition*.

Denny, M. 2011. The Internal Ballistics of an Air Gun, *The Physics Teacher* 49.

Fedaravičius, A.; Ragulskis, M.; Sližys, E. 2005. Dynamic synthesis of recoil imitation system of weapons, *Mechanika* 51(1).

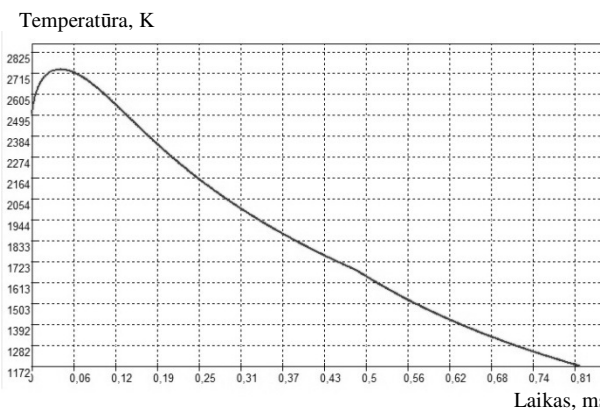
57 % vamzdžio ilgio kūnas juda plečiantis parako dujomis ir degimas jau nevyksta (3-as šūvio periodas).

Kūno greičio kitimas vamzdyje parodytas 6 pav. Kūnas išibėgėja pirmame vamzdžio trečdalyje, o 89 % maksimalaus greičio kūnas pasiekia praėjus 50 % vamzdžio ilgio.



6 pav. Sviedinio greičio priklausomybė nuo vamzdžio ilgio

Parako dujų temperatūros kitimas parodytas 7 pav.



7 pav. Parako dujų temperatūros priklausomybė nuo laiko

Iš grafiko matome, kad maksimali dujų temperatūra sutampa su maksimaliu dujų slėgiu, o vamzdžio gale sumažėja 2,3 karto.

Išvados

Išanalizavus gautus skaitinius rezultatus, nustatyta, kad didžiausi slėgio, temperatūros bei pagreičio rodikliai yra pasiekiami antrojo šūvio periodo pirmajame trečdalyje galime tarti, o 89 % maksimalaus greičio kūnas pasiekia praėjus 50 % vamzdžio ilgio. Tai reiškia, kad optimizuojant parako užtaiso degimą, galima pasiekti tuos pačius greičio ir energijos parametrus, žymiai sumažinant įrenginio gabaritų.

- Gorohovoj, S. A. 2007. *Fizičeskije osnovy funkcionirovanija strelkovo-pušečnogo, artillerijskogo i raketnogo oružija*. (In Russian).
- Homenko, P. J. 1999. *Matematičeskoje modelirovanije vnutriballističeskich processov v stvolnyh sistemah*. (In Russian).
- Jonevičius, V. 2006. *Dviejų susijusių masių vidinės ir išorinės balistikos tyrimas ir taikymas*. Daktaro disertacija. Kaunas: KTU.
- Miropolskij, F. P.; Kuveko, A. E. 1987. *Vnutrenniaja ballistika stvolnyh system i raketyje dvigateli tvordogo topliva*. (In Russian).
- Serebriakov, M. E. 1962. *Vnutrenniaja ballistika stvolnyh system i porohovyh raket*. (In Russian).
- Vaughn, H. R. 1998. *Rifle Accuracy Facts*. Monografija.