OPTIMIZACIJA TEHNIČKOG SISTEMA U FAZI PROJEKTOVANJA

Dušan Regodić
Univerzitet „Singidunum“, Univerzitet „Sinergija“
E-mail: dregodic@sinergija.edu.ba

Ljubiša Tančić
Vojna akademija, Pavla Jurišića Šturma 33, Beograd
E-mail: ljtancic@gmail.com

Sadržaj - *Rad prezentira optimalno rešenje zadatka balističkog projektovanja sistema konkretnog kalibra. Optimalno rešenje ogleda se u izboru najpogodnijih fizičko-hemijskih i balističkih karakteristika baruta, mase baruta, zapremine barutne komore i drugih parametara sa kojima se izvodi unutrašnje balistički proračun na računaru. Dobijeno rešenje se upoređuje sa konkretnim sistemom i izvode se određeni zaključci.*

Ključne reči - *projektovanje sistema, optimizacija*

Abstract - The paper presents solution of task interior ballistic projection weapons for concrete caliber small arms weapons. Optimal solution is looked in selection the best physical - chemical and ballistic characteristics powder, mass powder, powder chamber and other characteristics with him is execution interior ballistics calculation on the computer. Solution is compared with existence solutions and conclusions are given.

Key words: projection small arms weapons, optimization

1. Uvod

Proces opaljenja u cevi sistema je gasodinamički proces koji je u prostoru između nepokretnog dna cevi i pokretnog projektila okarakterisan strujanjem dve faze: čvrste - sagorevajuća barutna zrna i gasovite - barutnih gasova kao produkata sagorevanja. Balističko projektovanje podrazumeva određivanje optimalnih osnovnih konstruktivnih karakteristika cevi, uslova punjenja i energetskih karakteristika opaljenja na osnovu propisa o kvalitetu proizvoda koji se postavljaju pred sistema..

Ovaj zadatak se rešava kao i klasični, s tim što su neki parametri unapred zadani i ne treba ih analizirati. Ovaj zadatak obuhvata i problem modifikacije nekog dela postojećeg sistema na bazi promene balističkih parametara.

Osnovni elementi unutrašnjebalističkog i spoljno balističkog projektovanja su cev, metak i projektil. Današnja teorija sistema predviđa što veći domet i preciznost sistema, pa je tendencija razvoja da se modifikuju postojeći ili konstruišu novi sistemi sa što boljim performansama.

Cilj ovog rada je da se na osnovu definisanih željenih podataka kao što su: početna brzina projektila i maksimalni pritisak barutnih gasova - odrede samo neki optimalni aerodinamički i balistički parametri: najpogodniji model i tip baruta, masa baruta i zapremina barutne komore na osnovu kriterijuma cene koštanja sistema.

2. Matematički model dvofaznog strujanja i rezultati proračuna

Na osnovu zakona o održanju mase, o količini kretanja i o energiji primenom transformacije Gaus-Ostrogradskog razvija se matematički model za proizvoljan momenat vremena u toku sagorevanja baruta. Proces opaljenja se posmatra od momenta kada se sagorevanjem baruta iza projektila stvori dovoljan pritisak pri kojem će se košuljica projektila urezati u žljebove cevi i doći do pokretanja projektila. Pretpostavlja se da su u tom momentu poznati svi početni i granični uslovi. Nakon završetka sagorevanja baruta, dvofazno strujanje prelazi u jednofazno t.j. u strujanje samo barutnih gasova. Postavljeni matematički model tada prelazi u klasičan gasodinamički model. Sistem jednačina izvodi se u Ojlerovim koordinatama t (vreme) i x (proizvoljan položaj u cevi od čela zatvarača do dna projektila), a zatim se transformiše u sistem sa Lagranžovim koordinatama t i s (smeša baruta i barutnih gasova u pojedinim tačkama iza projektila). Polazne pretpostaavke i celokupno izvođenje dato je u [1], a ovde se daje samo konačan oblik jednačina:

1. Jednačina kontinuiteta za barut:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} - \rho\varepsilon(u - u_b)\frac{\partial \varepsilon}{\partial s} - a_2(1-\varepsilon)\frac{\partial u_b}{\partial s} = b$$

uz oznake:

$$a_2 = \rho\varepsilon + \rho_b(1-\varepsilon)$$

$$b = (1-\varepsilon)\rho_b \frac{u_z S_z}{m_z}$$

2. Jednačina kontinuiteta za barutne gasove:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + a_1\frac{\partial \rho}{\partial s} + a_2\frac{\rho(u-u_b)}{\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial s} + \rho a_2\frac{\partial u}{\partial s} + \rho a_2\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon}\frac{\partial u_b}{\partial s} = \frac{b(\rho_b - \rho)}{\varepsilon}$$

uz oznaku:

$$a_1 = \rho_b(1-\varepsilon)(u-u_b)$$

3. Jednačina kretanja barutnih gasova:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + a_1\frac{\partial u}{\partial s} + a_2\frac{(k-1)}{(1-\alpha\rho)}\frac{\partial e}{\partial s} + a_2\frac{e}{\rho}\frac{(k-1)}{(1-\alpha\rho)^2}\frac{\partial \rho}{\partial s} = f_1$$

gde je:

$$f_1 = \frac{1}{\rho\varepsilon}\left[b\rho_b(u_b - u) - f\right]$$

4. Jednačina kretanja barutnih zrna:

$$\frac{\partial u_b}{\partial t} - a_1\frac{\rho}{\rho_b}\frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)}\frac{\partial u_b}{\partial s} + a_2\frac{\rho}{\rho_b}\frac{(k-1)}{(1-\alpha\rho)}\frac{\partial e}{\partial s} + a_2\frac{e}{\rho_b}\frac{(k-1)}{(1-\alpha\rho)^2}\frac{\partial \rho}{\partial s} = \frac{f}{\rho_b(1-\varepsilon)}$$

5. Jednačina energije:

$$\frac{\partial e}{\partial t} + a_1\frac{\partial e}{\partial s} + a_3\frac{\partial \varepsilon}{\partial s} + \frac{pa_2}{\rho}\frac{\partial u}{\partial s} + a_4\frac{\partial u_b}{\partial s} = f_3 - \frac{pb}{\varepsilon\rho}$$

uz oznake:

$$a_3 = p(u-u_b) + \frac{pa_1}{\varepsilon\rho}$$

$$a_4 = a_2\frac{p}{\rho}\frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon}$$

$$f_2 = b\rho_b\left(e_b + \frac{p}{\rho_b} + \frac{u_b^2}{2}\right) - fu_b - \frac{bq}{u_z}$$

$$f_3 = \frac{1}{\varepsilon\rho}\left[f_2 - f_1\rho\varepsilon u - b\rho_b\left(e + \frac{u^2}{2}\right)\right]$$

6. Iz definicije Lagranžove kordinate "s" dobija se:

$$\frac{\partial x}{\partial s} = \frac{1}{a_2}$$

gde su parametri strujanja: ε - poroznost; ρ - gustina barutnih gasova; u - brzina barutnih gasova; u_b - brzina barutnih zrna; p - pritisak barutnih gasova; q - jedinična toplota preneta sa barutnih gasova na barutno zrno; e - jedinična unutrašnja energija barutnih gasova; x - proizvoljan položaj u cevi od čela zatvarača do dna projektila.

Koeficijenti a_1 do a_4, b, f, f_1, f_2 i f_3 su funkcije parametara strujanja. Sistem jednačina (1) do (6) povezuje sve parametre strujanja osim pritiska barutnih gasova koji se definiše jednačinom stanja barutnih gasova.

$$p = \frac{e\rho(k-1)}{(1-\alpha\rho)}$$

Navedeni sistem jednačina važi dok traje sagorevanje barutnih zrna. Za slučaj, kada je završeno sagorevanje važe sledeći uslovi:

$$\varepsilon = 1,\ u_b = 0,\ b = 0,\ f_1 = f_2 = f_3 = 0,\ a_1 = 0,\ a_2 = \rho \text{ i } q = 0$$

pa se sistem jednačina (1) do (6) transformiše u sistem koji važi do izletanja projektila iz cevi.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{e(k-1)}{(1-\alpha\rho)^2}\frac{\partial \rho}{\partial s} + \frac{\rho(k-1)}{(1-\alpha\rho)}\frac{\partial e}{\partial s} = 0 \qquad (7)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho^2 \frac{\partial u}{\partial s} = 0 \qquad (8)$$

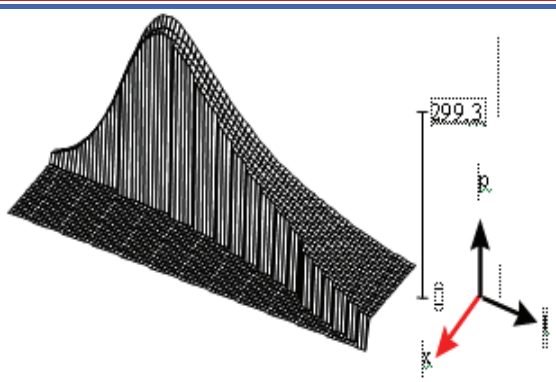
$$\frac{\partial e}{\partial t} + p\frac{\partial u}{\partial s} = 0 \qquad (9)$$

$$\frac{\partial x}{\partial s} = \frac{1}{\rho} \qquad (10)$$

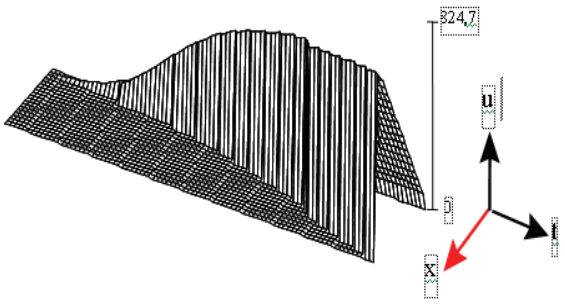
Za numeričko rešavanje datog sistema jednačina koristi se teorija konačnih razlika. Izvode se uslovi stabilnosti i konvergencije numeričke šeme [2],[3] i izrađuje, program za personalni računar koji se koristi za analizu osetljivosti modela na ulazne parametre. Od svih strujnih karakteristika u ovom radu se prikazuju i analiziraju samo pritisak barutnih gasova i brzina projektila u cevi oružja sa srednjim polaznim podacima (slika 1. i 2.).

Tabela 1. Ulazni podaci (maksimalni, srednji i minimalni)

	ULAP762.max	ULAP762.srd	ULAP762.min
$u_{z0}(m/sPa)$	$8*10^{-10}$	$7.9*10^{-10}$	$7.8*10^{-10}$
$m_{z0}(kg)$	0.001645	0.00162	0.0015948
$m(kg)$	0.0080232	0.0079	0.0077767
$S(m^2)$	$4.0733*10^{-07}$	$4.127*10^{-07}$	$4.1806*10^{-07}$
$\alpha(m^3/kg)$	0.0009243	0.00091	0.00089769
$p_0(Pa)$	$1.5*10^{+07}$	$1.25*10^{+07}$	$1*10^{+07}$
$p_m(Pa)$	$333.8*10^{06}$ (+9.3%)	$311*10^{+06}$	$279.5*10^{+06}$ (-8.45%)
$V_0\ (m/s)$	736.7 (+3.1%)	720.8	689.8 (-3.47%)



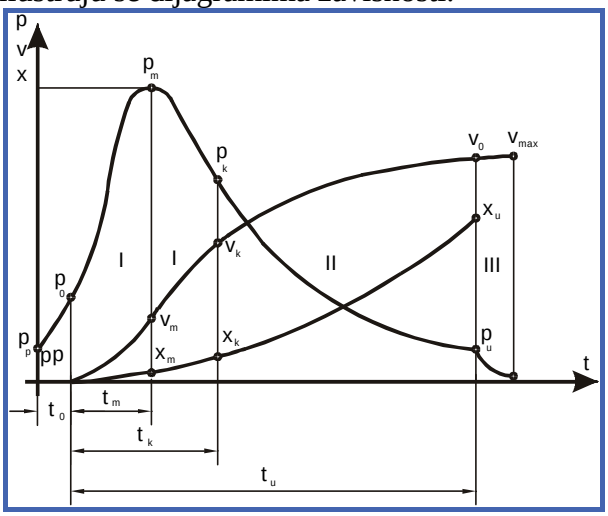
Slika 1. Pritisak barutnih gasova



Slika 2. Brzina strujanja barutnih gasova

Za odabrano oružje, a na osnovu analiza sprovedenih u literaturi [7 i 8] usvaja se barut NC - 08 sa svim fizičko - hemijskim i balističkim karakteristikama bitnih za unutrašnje balistički proračun.

Rezultati UB proračuna dobijaju se programskim rešenjima [9 i 10] modifikovanih za rešenje konkretnog problema i ilustruju se dijagramima zavisnosti.



Slika 3. *Dijagrami zavisnosti* p(t), v(t) i x(t)

Očigledno je da dijagrami zavisnosti unutrašnje balističkih karakteristika u potpunosti ispunjavaju definisani cilj u uvodu. Nakon ove faze projektovanja sledi projektovanje unutrašnje trase cevi sa svim detaljima kao što su: olučenje, prelazni konus, barutna komora itd.

3. Matematički model sa šest stepeni slobode kretanja i rezultati proračuna

Model kretanja sistema sa šest stepeni slobode čine četiri vektorske jednačine:

- izvod vektora položaja sistema

$$\frac{d_r \vec{r}}{dt} = \vec{V}_k \qquad (11)$$

- vektorska jednačina relativnog kretanja centra masa

$$m\frac{d_r \vec{V}_k}{dt} = \Sigma \vec{R} \qquad (12)$$

- kretanje oko centra mase

$$\frac{d\vec{H}^{g}}{dt} = \vec{M} \qquad (13)$$

- veze između ugaonih brzina i izvoda uglova

$$\vec{\Omega} = \vec{\Omega}_E + \dot{\vec{\lambda}} + \dot{\vec{\varphi}} + \dot{\vec{\psi}} + \dot{\vec{\theta}} + \dot{\vec{\Phi}} \qquad (14)$$

Kretanje sistema u odnosu na Zemlju je relativno, a uticaj rotacije Zemlje ugaonom brzinom Ω_E unosi sistemu prenosno kretanje. Brzina kretanja sistema u odnosu na Zemlju V_K predstavlja relativnu brzinu, a izvodi njenih komponenata po vremenu predstavljaju komponente relativnog ubrzanja. Rezultantu spoljnih sila koje deluju na sistem čine: gravitaciona sila Zemlje, aerodinamička sila, prenosna inercijalna sila, reaktivna sila, i Koriolisova sila. U praksi, zbir gravitacione i prenosne inercijalne sile smatramo silom Zemljine teže ubrzanja $\vec{g}$. Kinetički moment i rezultujući moment spoljnih sila računa se za centar mase sistema. Rezultujući moment čini zbir aerodinamičkog momenta i momenta reaktivne sile u odnosu na centar mase. Sila Zemljine teže i inercijalna Koriolisova sila deluju u centru mase sistema te ne stvaraju momente za centar mase.

Projektovanjem ovih vektorskih jednačina leta na aerobalistički koordinatni sistem uz pretpostavku da je tenzor inercije redukovan ($I_Y=I_Z$) dobija se:

- **izvod vektora položaja**

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = L_{OB} \begin{bmatrix} u_k \\ \tilde{v}_k \\ \tilde{w}_k \end{bmatrix} \qquad (15)$$

- tri jednačine izvoda uglova stava

$$\left.\begin{aligned} \dot{\Phi} &= p + \tilde{r}\,tg\theta \\ \dot{\theta} &= \tilde{q} \\ \dot{\psi} &= \frac{\tilde{r}}{\cos\theta} \end{aligned}\right\} \qquad (17)$$

- **šest skalarnih jednačina**

$$\left.\begin{aligned} \dot{u}_k &= \tilde{q}\tilde{w}_k - \tilde{r}v_k + \frac{(X+F_x)}{m} - g\sin\theta - a_{cx} \\ \dot{u}_k &= \tilde{q}\tilde{w}_k - \tilde{r}v_k + \frac{(X+F_x)}{m} - g\sin\theta - a_{cx} \\ \dot{u}_k &= \tilde{q}\tilde{w}_k - \tilde{r}v_k + \frac{(X+F_x)}{m} - g\sin\theta - a_{cx} \end{aligned}\right\} \qquad (16)$$

$$\dot{p} = \frac{(L + L^F)}{I_x}$$

$$\dot{\tilde{q}} = p_b\tilde{r} + \frac{(-I_x p\tilde{r} + \tilde{M} + \tilde{M}^F)}{I_y}$$

$$\dot{\tilde{q}} = p_b\tilde{r} + \frac{(-I_x p\tilde{r} + \tilde{M} + \tilde{M}^F)}{I_y}$$

pri čemu su:

$V_k = \begin{bmatrix} u_k, & \tilde{v}_k, & \tilde{w}_k \end{bmatrix}^T$ -komponente relativne brzine sistema,

$\Omega^b = \begin{bmatrix} p & \tilde{q} & \tilde{r} \end{bmatrix}^T$ - komponente ugaone brzine,

$R = \begin{bmatrix} X & \tilde{Y} & \tilde{Z} \end{bmatrix}^T$ -komponente aerodinamičke sile,

$F = \begin{bmatrix} F_x & F_y & F_z \end{bmatrix}^T$ - komponente reaktivne sile,

$M^a = \begin{bmatrix} L & \tilde{M} & \tilde{N} \end{bmatrix}^T$ - komponente aerodinamičkog momenta,

$M^F = \begin{bmatrix} L^F & M^F & N^F \end{bmatrix}^T$ - komponente reaktivnog momenta,

$H = \begin{bmatrix} I_x p & I_y\tilde{q} & I_y\tilde{r} \end{bmatrix}^T$ -komponente kinetičkog momenta.

Ovim diferencijalnim jednačinama neophodno je pridružiti algebarsku jednačinu

$$p_b = \tilde{r}\, tg\theta \qquad (18)$$

komponente Koriolisovog ubrzanja u aerobalističkom koordinatnom sistemu

$$a = \begin{bmatrix} a_{cx} \\ a_{cy} \\ a_{cz} \end{bmatrix} = 2\Omega_E^b \tilde{V}_k \qquad (19)$$

Za rotirajući sistem malih dometa vektor stanja sadrži dvanaest komponenata:

$$\left[x,\ y,\ z,\ u_k,\ \tilde{v}_k,\ \tilde{w}_k,\ p,\ q,\ \tilde{r},\ \tilde{\Phi},\ \theta,\ \psi \right]$$

Programsko rešenje **„PROGRAM SB06.FOR"** za personalni računar, napravljeno je u programskom jeziku **FORTRAN**, i sastoji se od četiri celine:

1. Datoteka **SB06U. DAT.** - ulazna datoteka
2. Program **SB06. FOR.** - glavni program
3. Datoteka **SB061. DAT**. - izlazna datoteka.
4. Datoteka **SB062. DAT**. - izlazna datoteka.

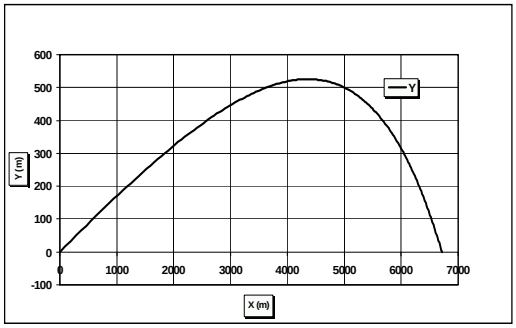
Program **SB06.FOR** namenjen je za detaljan proračun i simulaciju kretanja sistema. Prema jednoj opciji program proračunava karakteristične parametre stabilnosti leta sistema. Integracija diferencijalnih jednačina vrši se metodom Runge-Kuta sa četiri približenja.

Tačnost proračuna zavisi od: koraka integracije, tačnosti i broja derivativa aerodinamičkih koeficijenata, definisane brzine vetra i reaktivne sile. U tabeli 2. dat je sadržaj i primer modela ulazne datoteke sistema.

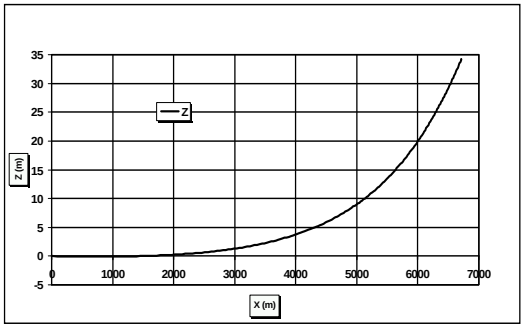
Tabela 2.

Sadržaj ulazne datoteke **SB06U. DAT**	**Primer ulazne datoteke SB06U. DAT**
T0, H,TK, XK, ZK	0.0, 0.001, 22., 15000., 0.0
T1, T2, NDT, NSTAB	0.0, 0.0, 100, 1
VW0, DVW, AW0S, DAWS, FW, HI0S	0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0
(X(K),K=1,3)	0.0, 0.0, 0.0
(X(K),K=4,6)	985.00, 0.0, 0.0
(X(K),K=7,9)	6297., 1.034811, 7.726234
FI0S, TETA0S, PSI0S	235., 10.0, 0.005

Na slici 4. je prikazana promena ordinate kretanja za odgovarajuće daljine pri polaznom uglu $\theta=10^0$. Na slici 5. je prikazana promena pravca kretanja za odgovarajuće daljine pri polaznom uglu $\theta_0=10^0$.

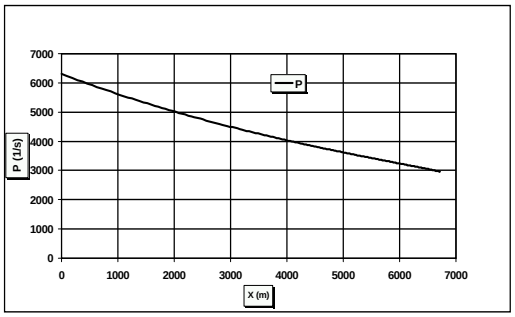


Slika 4. Promena ordinate kretanja sistema za polazni ugao $\theta_0=10^0$

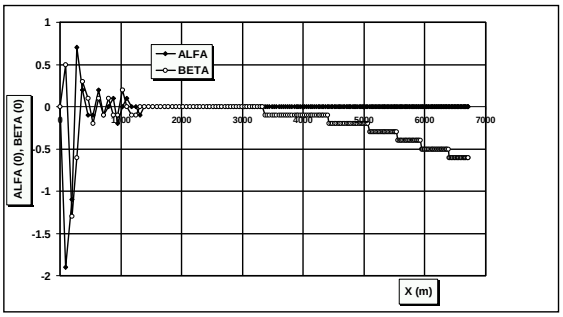


Slika 5. Promena pravca u toku kretanja z za odgovarajuće daljine pri polaznom uglu $\theta_0=10^0$

Na slici 6. prikazana je promena brzina **V** za odgovarajuće daljine **x** pri polaznom uglu $\theta_0=10^0$. Na slici 7. prikazana je promena napadnih uglova α i β za odgovarajuće daljine x pri polaznom uglu $\theta_0=10^0$.



Slika 6. Promena vrednosti brzine V za odgovarajuće daljine x pri polaznom uglu $\theta_0=10^0$



Slika 7. Promena vrednosti napadnih uglova α i β za odgovaraju}e domete x pri polaznom uglu $\theta_0=10^0$

4. Zaključak

Tendencije usavršavanja postojećih i razvoj novih tehničkih sistema su povećanje dometa, tačnosti, preciznosti i brzine gađanja. Usavršava se i municija, a povećavaju se efekti dejstva projektila na cilju. Smanjuje se ukupna masa oružja a time i masa cevi i ostvaruju se bolja svojstva taktičke i strategijske pokretljivosti.

Rad prezentira unutrašnje i spoljno balističko projektovanje oružja/oruđa, konkretnog kalibra. Osnovni cilj rada, ogleda se u izboru optimalnih balističkih parametara: modela i tipa baruta, mase baruta i zapremine barutne komore, aerodinamičkog oblika i uslova leta letilice. Informacioni sistem omogućuje analizu svih uticajnih parametara na kretanje sistema. Tokom proračuna korišteni si numerički programi u programskom jeziku Fortran. Tokom svih simulacija tehnički sistem se ponašao dinamički i žiroskopski stabilnim.

Posle projektovanja unutrašnje trase cevi sledi projektovanje spoljne trase cevi. Posle izbora optimalne aerodinamičke konfiguracije realizuje se proračun naprezanja i izbor materijala za letilicu. Analiza efekata na cilju je od posebnog značaja sa aspekta efikasnosti tehničkog sistema.

Literatura:

[1] Cvetković M.: Primena nestacionarne gasodinamike na unutrašnje balistički problem oružja malih kalibara, doktorska disertacija, VVTŠ KoV JNA, Zagreb, 1984.

[2] Tančić LJ.: Numeričko rešenje nestacionarnog modela unutrašnje balistike oružja malih kalibara, VTA VJ, Beograd, 1997.

[3] Tančić LJ.: Zbirka zadataka iz unutrašnje balistike, Sektor za ŠONID - VTA, Beograd, 1999.

[4] Regodić, D., *Spoljna balistika*, Vojna akademija, Beograd, 2006

[5] Regodić, D., Zbirka zadataka iz spoljne balistike, Vojna akademija, Beograd 2003.

[6] McCOY, R.L., *Modern exterior ballistics*, Schiffer Military History, Atglen PA, 1999

[7] Lebedev, A.A., Cernobrovkin L.S., *Dinamika poleta*, Mashinostroenie, Moskva, 1973