

КОМПАРАТИВНА АНАЛИЗА РЕЗУЛТАТА ДВОФАЗНОГ СТРУЈАЊА У ЦЕВИ ОРУЖЈА

A COMPARISONS ANALYSIS RESULTS FOR TWO-PHASE FLOW IN THE SMALL ARMS BARREL

Љубиша Танчић

Вртларска 33, Земун

ljtancic@gmail.com

Душан Регодић

Универзитет Сингидунум, Данијелова 32, Београд

dregodic@singidunum.ac.rs

С а ж е т а к: Разматра се унутрашње балистички проблем процеса опаљења у цев и оружја. Користи се математички модел тзв. двофазног струјања, који се описује системом гасодинамичких парцијалних диференцијалних једначина, не улазећи у њихово извођење. Систем парцијалних диференцијалних једначина решава се нумерички помоћу теорије коначних разлика. При избору нумеричке шеме води се рачуна о условима стабилности и конвергенције. Прорачун по математичком моделу реализован је на персоналном рачунару. Даје се метода експерименталног одређивања притиска барутних гасова и брзине пројектила са резултатима мерења. Резултати мерења се анализирају и упоређују са резултатима математичког модела, дају се одређени закључци и смернице за даљи рад на проблему.

Кључне речи: унутрашња балистика, модел двофазног струјања, цев оружја, компаративна анализа резултата

A b s t r a c t: The interior ballistics problem of firing process in the small arms is considered. A mathematical model of a so-called two-phase flow, which is described by gas - dynamic partial differential equations system, is used, without deducing them. Partial differential equations system has been solved numerical by finite difference method. The equations system convergence and stability conditions are taken by occasion of the scheme choice. Calculations by mathematics model are realized on the PC computer. The research experimental method of propellant gas pressure and velocity projectile with results of measuring is given. The results of measuring are analyzed and they compared with the results of mathematical model and useful conclusions to line of directions for future work on this problem are given.

Key words: interior ballistics, model of two-phase flow, small arms barrel, a comparisons analysis results

1. УВОД

Процес опаљења у цев и стрељачког оружја је гасодинамички процес који је у простору између непокретног дна цеви и покретног пројектила окарактерисан струјањем две фазе: чврсте - сагоревајућа барутна зрна и гасовите - барутних гасова као продуката

сагоревања. Математички модел се развија за произвољан моменат времена у току сагоревања барута, а процес опаљења се посматра од момента када се сагоревањем барута иза пројектила створи довољан притисак при којем ће се кошуљица пројектила урезати у жљебове цеви и доћи до покретања пројектила. Претпоставља се да су у том моменту познати сви почетни и гранични услови. Након завршетка сагоревања барута, двофазно струјање прелази у једнофазно т.ј. у струјање само барутних гасова. Постављени математички модел тада прелази у класичан гасодинамички модел.

2. СИСТЕМ ЈЕДНАЧИНА У ЛАГРАНЖОВИМ КООРДИНАТАМА

На основу полазних претпоставки и Закона о одржању масе, количине кретања и енергије изводи се систем једначина у Ојлеровим координатама t (време) и x (произвољан положај у цеви од чела затварача до дна пројектила), а затим се трансформише у систем са Лагранжовим координатама t и s (смеша барута и барутних гасова у појединим тачкама иза пројектила). Полазне претпоставке и целокупно извођење дато је у [1], а овде се даје само коначан облик једначина:

1. Једначина континуитета за барут :

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

2. Једначина континуитета за барутне гасове :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + a_1 \frac{\partial \rho}{\partial s} + a_2 \frac{\rho(u - u_b)}{\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial s} + \rho a_2 \frac{\partial u}{\partial s} + \rho a_2 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon} \frac{\partial u_b}{\partial s} = \frac{b(\rho_b - \rho)}{\varepsilon} \quad (2)$$

3. Једначина кретања барутних гасова :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + a_1 \frac{\partial u}{\partial s} + a_2 \frac{(k-1)}{(1-\alpha\rho)} \frac{\partial \varepsilon}{\partial s} + a_2 \frac{\varepsilon}{\rho} \frac{(k-1)}{(1-\alpha\rho)^2} \frac{\partial \rho}{\partial s} = f_1 \quad (3)$$

4. Једначина кретања барутних зрна :

$$\frac{\partial u_b}{\partial t} - a_1 \frac{\rho}{\rho_b} \frac{\varepsilon}{(1-\varepsilon)} \frac{\partial u_b}{\partial s} + a_2 \frac{\rho}{\rho_b} \frac{(k-1)}{(1-\alpha\rho)} \frac{\partial \varepsilon}{\partial s} + a_2 \frac{\varepsilon}{\rho_b} \frac{(k-1)}{(1-\alpha\rho)^2} \frac{\partial \rho}{\partial s} = \frac{f}{\rho_b(1-\varepsilon)} \quad (4)$$

5. Једначина енергије :

$$\frac{\partial e}{\partial t} + a_1 \frac{\partial e}{\partial s} + a_3 \frac{\partial \varepsilon}{\partial s} + \frac{\rho a_2}{\rho} \frac{\partial u}{\partial s} + a_4 \frac{\partial u_b}{\partial s} = f_3 - \frac{pb}{\varepsilon\rho} \quad (5)$$

6. Из дефиниције Лагранжове координате " s " добија се :

$$\frac{\partial x}{\partial s} = \frac{1}{a_2} \quad (6)$$

где су параметри струјања: ε - порозност; ρ - густина барутних гасова; u - брзина барутних гасова; u_b - брзина барутних зрна; p - притисак барутних гасова; q – јединична топлота пренета са барутних гасова на барутно зрно; e – јединична унутрашња енергија барутних гасова; x - произвољан положај у цеви од чела затварача до дна пројектила.

Коефицијенти a_1 до a_4 , b , f , f_1 и f_3 су функције параметара струјања. Систем једначина (1) до (6) повезује све параметре струјања осим притиска барутних гасова који се дефинише једначином стања барутних гасова.

Наведени систем једначина важи док траје сагоревање барутних зрна. За случај, када је завршено сагоревање важе следећи услови :

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

па се систем једначина (1) до (6) трансформише у систем који важи до излетања пројектила из цеви.

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

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

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

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

Заменом (10) у (7) до (9) добијају се класичне Ојлерове гасодинамичке једначине. Допунске једначине, почетни и гранични услови дати су у [2].

Парцијалне диференцијалне једначине су општег облика:

$$\frac{\partial Y_k}{\partial t} + \sum_{l=1}^m a_{k,l} \frac{\partial Y_l}{\partial s} = b_k \quad k=1, \dots, m$$

где је : $m=5$ док траје сагоревање барута и $m=3$ након завршетка сагоревања

$a_{k,l}$ – променљиви коефицијенти, од којих су неки једнаки нули

Дати систем једначина је **нелинеаран, нехомоген и нестационаран**, решава се нумерички применом теорије коначних разлика. Над системом се може поставити много нумеричких шема. При избору шеме постављају се три услова :

1. Услов конзистентности - шема не сме да тежи ка решењу неког другог система;
2. Услов стабилности - грешке при прорачуну морају да буду ограничене и
3. Услов конвергенције - услов при којем грешке теже ка нули.

Изводи се услов стабилности и конвергенције нумеричке шеме [3,4] и саставља програм за персонални рачунар који се користи за анализу утицаја полазних параметара [5].

Услов стабилности нумеричке шеме дефинисан је са:

$$\left| \frac{\tau}{h} \lambda_{A_{\max}} \right| \leq 1 \quad \text{где је } \lambda_{A_{\max}} \text{ највећа сопствена вредност матрице } [A].$$

Ако је τ прираштај по времену, h прираштај по S и $\tau = rh$, онда се величина r одређује из услова конвергенције укупне грешке система:

$$A_l = \sum_{k=1}^m a_{k,l} \quad r_{l,i} \leq \frac{1}{|A_l|_i} \quad r = \min_i \left[\min_l (r_{l,i}) \right]$$

3. РЕЗУЛТАТИ ФАКТОРСКОГ ПЛАНА ЕКСПЕРИМЕНТА 2^n

Програмско решење теоријско - нумеричког модела се може тестирати различитим вредностима полазних података који различито утичу на излазне резултате. Сви полазни подаци морају задовољавати Пропис о квалитети производа (ПКП) и Пропис интернационалне перманентне комисије (ЦИП) [6] који дефинишу дозвољене толеранције за поједине параметре. Међутим, као дозвољена вредност појединих параметара може се са истом поузданошћу узети како горња вредност тако и доња вредност параметра.

Да би се оценио утицај полазних података на излазне резултате математичког модела и извршило рангирање реализован је факторски план експеримента 2^n на основу [7]. Резултати факторског плана 2^n су следећи:

- Постоје полазни подаци који немају значајан утицај на модел како самостално тако и у комбинацији са осталим полазним параметрима и то су : коефицијент провођења топлоте (α_0), време претходног периода (t_0), почетни положај пројектила (X_0), густина барутних гасова на почетку првог периода (ρ_0), коефицијент динамичке вискозности (η), коефицијент прелаза топлоте (α_b) и почетна температура барутног зрна (T_{b0}).
- Постоје и параметри који битно утичу на излазне параметре било самостално било у комбинацији са осталим полазним параметрима а то су: притисак форсирања (p_0), маса пројектила (m), маса барутног пуњења (m_b), коволумен барутних гасова (α), попречни пресек цеви (S) и јединична брзина сагоревања барута (u_{z0}),

У табели 1. се дају, дозвољене толеранције од називне мере у процентима, за параметре од прворазредног утицаја на излазне резултате за аутоматску пушку 7.62 mm и муницију која она користи на основу ПКП-а, и ЦИП-а.

Табела 1. Утицај улазних параметара на излазне резултате

Ранг улаза	Параметар	Ниво	Процент %	p_m, bar	$V_0, \text{m/s}$	ранг излаза
1.	p_0	+	20	3009	712	6
		-	20	3009	710	
2.	m	+	1.56	3055	709.7	4
		-	1.56	2964	710	
3.	m_{b0}	+	1.55	3059	717	3
		-	1.55	2959	702	
4.	α	+	1.46	3032	713	5
		-	1.46	2990	709	
5.	S_{z0}	+	1.3	3075	715	2
		-	1.3	2945	704.8	
6.	u_{z0}	+	1.3	3112	721	1
		-	1.3	2906	700	

Након направљене селекције утицајних параметара узимају се сви полазни параметри који повећавају излазне резултате да се добије једна граница излазних резултата табела 2. Полазни параметри су по (ПКП-у) са дозвољеним плусом и са дозвољеним минусом. Затим се узимају сви полазни параметри који смањују излазне резултате и тако се добија друга граница излазних резултата.

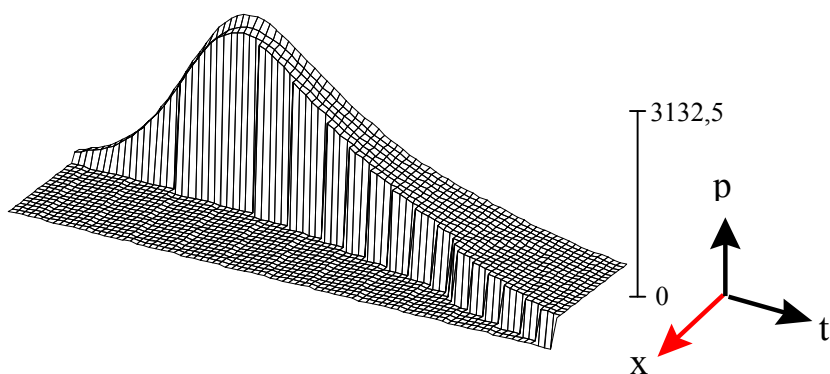
Табела 2. Улазни подаци (максимални, средњи и минимални)

	УЛАП762.мах	УЛАП762.срд	УЛАП762.мин
$u_{z0}, m/sPa$	$8 * 10^{-10}$	$7.9 * 10^{-10}$	$7.8 * 10^{-10}$
m_{b0}, 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	$333.8 * 10^6$ (+9.3%)	$311 * 10^{+06}$	$279.5 * 10^{+06}$ (-8.45%)
$V_0, m/s$	736.7 (+3.1%)	720.8	689.8 (-3.474%)

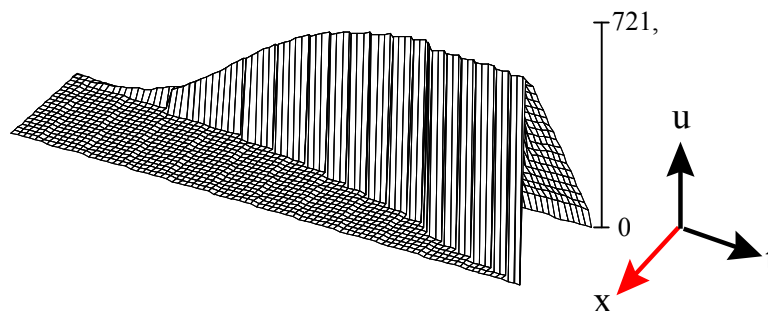
Извођењем програма са граничним вредностима улазних параметара добијају се најниже и највише струјне карактеристике. Од свих струјних карактеристика у раду се приказују и анализирају само притисак барутних гасова и брзина пројектила.

4. РЕЗУЛТАТИ ПРОРАЧУНА ДВОФАЗНОГ СТРУЈАЊА

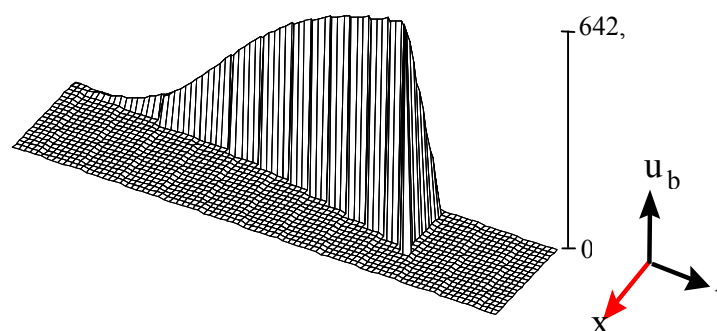
Прорачун се изводи на основу програмског решења написаног у ФОРТРАНУ на ПЦ рачунару. Не даје се програмско решење, већ само резултати прорачуна уз одређени коментар који се приказују у Декартовом координатном систему и у облику фамилије кривих линија. Сликама 1 - 4 приказане су следеће струјне карактеристике: притисак барутних гасова (p), брзина барутних гасова (u_g) и барутних зрна (u_z) и унутрашња енергија барутних гасова (e) као функције времена (t) и положаја у цеви (x). Функција густине барутних гасова слична је функцији притиска.



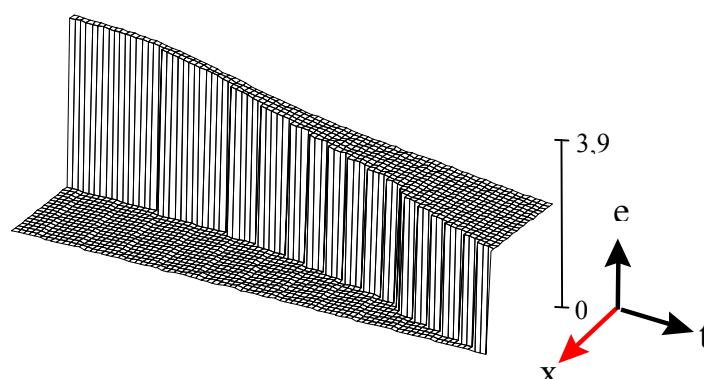
Слика 1. Притисак барутних гасова



Слика 2. Брзина барутних гасова



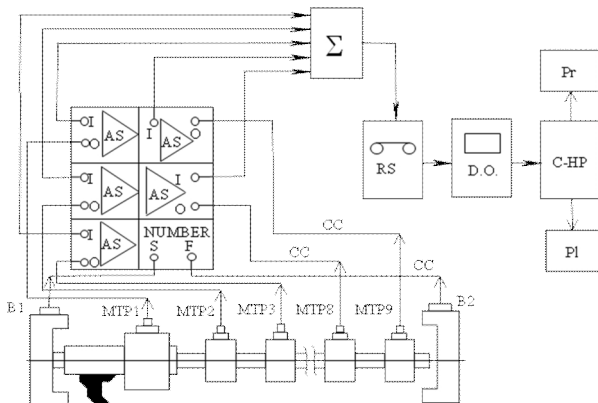
Слика 3. Брзина барутних зрна



Слика 4. Енергија барутних гасова

5. КОМПАРАТИВНА АНАЛИЗА ПРОРАЧУНСКИХ И ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИХ РЕЗУЛТАТА

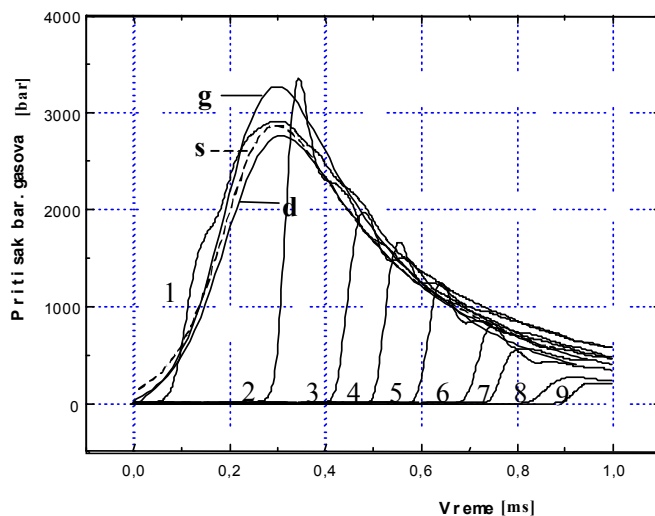
У циљу упоређења прорачунских података и стварних података у оружју извршено је мерење притиска барутних гасова у цеви оружја калибра 7.62 mm. За извођење експеримената извршено је комплетирање сандука, цеви, омотача и носача мерних претвараача притиска. За цев оружја везује се мерни ланац за мерење притиска барутних гасова према блок шеми, слика 5.



Слика 5. Блок шема за мерење и обраду података

МТП - мерни претварач притиска (пиезо сонда), СС - коаксијални кабл, АС - појачало сигнала, RS - регистратор сигнала (мерни магнетофон), D.O. - дигитални осцилоскоп, C-HP - рачунар, Pl - цртач (плотер), Pr - штампач (принтер)

Експериментална истраживања су реализована с циљем добијања стварних података у цеви за време опаљења и ради упоређења са прорачунским подацима. Експериментима су регистроване криве развоја притиска барутних гасова на појединим местима дуж цеви у функцији времена. При сваком опаљењу на одабраном калибру мерен је притисак на 9 места у цеви. Мерно место 1 региструје притисак барутних гасова у чахури метка а остала мерна места су постављена дуж водишта пројектила. Експеримент је понављан најмање 30 пута. Резултати су презентирани у [2] и [4], а овде се користе само средњи експериментални резултати (сл. 6) за аутоматску пушку 7.62 mm.

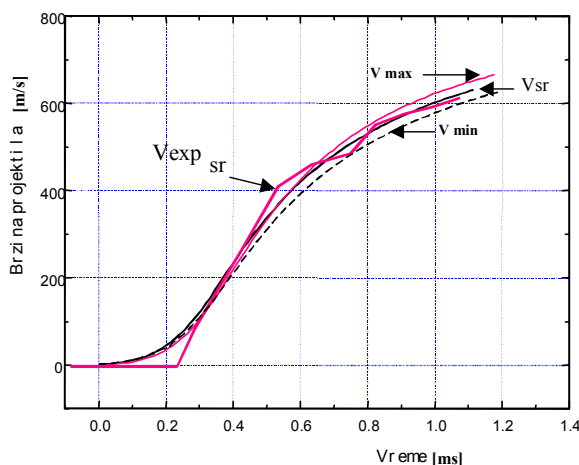


Слика 6. Дијаграми $p(t)$ модела средњих, минималних и максималних полазних података и средњих вредности експеримената за сва мерна места на АП 7,62 mm

На слици 6. приказане су криве притисака свих мерних места и криве модела на мерном месту 1 добијене са "максималним" - (крива g), "средњим" - (крива s) и "минималним" - (крива d) улазним подацима. Слика 6 указује да се усредњени резултати експеримената налазе унутар појаса излазних резултата прорачуна ограничених резултатима "максималног" и "минималног" улаза.

На слици 7. приказане су криве модела добијене са "максималним", "средњим" и "минималним" улазним подацима и експериментална крива усредњених вредности. Просечна средња експериментална вредност почетне брзине пројектила износи 723.6 m/s

а прорачунска износи 721.7 m/s . Ово одступање је незнатно и указује на врло добру сагласност средње експерименталне брзине и прорачунске брзине пројектила у цеви оружја.



Слика 7. Дијаграми $V(t)$ модела средњих, минималних и максималних полазних података и средњих вредности експеримената за сва мерна места на АП 7,62mm

6. ЗАКЉУЧАК

Рад даје теоријско - експерименталну анализу процеса опаљења у цеви оружја на основу експерименталних истраживања и нумеричког моделовања на рачунару. Анализом се дошло до сазнања да средњи услови прорачуна дају оптималне улазно-излазне параметре и прихватљиве резултате прорачуна за конкретно оружје [9].

Компаративном анализом су обухваћени притисак барутних гасова и брзина пројектила у цеви оружја у функцији времена. Резултати експеримената и модела потврђују карактере промена притиска и брзине и основну претпоставку математичког модела да су притисак барутних гасова и брзина пројектила функције времена и пута пројектила. Упоредом експерименталних и прорачунских резултата притисака барутних гасова и брзина пројектила уочава се њихова добра међусобна усаглашеност што потврђује коректност математичког модела.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Цветковић М.: Примена нестационарне гасодинамике на унутрашње балистички проблем оружја малих калибра, докторска дисертација, Високе Војнотехничке школе КоВ ЈНА, Загреб, 1984.
- [2] Танчић Љ.: Нумеричко решење нестационарног модела унутрашње балистике оружја малих калибра, докторска дисертација Војнотехничка академија ВЈ, Београд, 1997.
- [3] Cvetković M., Tančić Lj.: "A comparisons analysis experimental and calculations results for two-phase flow in the small arms", II International Symposium Contemporary Problems of Fluid Mechanics, University of Belgrade, Faculty of Mechanical Engineering, Chair of Fluid Mechanics, Beograd, 1996.
- [4] Цветковић М., Танчић Љ.: Анализа услова нумеричког моделирања двофазног струјања у оружју, XXII Југословенски конгрес теоријске и примевене механике ЈУМЕХ '97, Врњачка бања, 1997.

- [5] Cvetković M., Tančić Lj.: "Initial parameters influence on two phase flow model in the small arms barrel", 6-th Symposium On Theoretical and Applied Mechanics, Republic of Macedonia, Struga, October 1-3, 1998.
- [6] *** : Commission Internationale Permanente (CIP), Geneve, 1985.
- [7] Пантелић И.: Увод у теорију инжењерског експеримента, Раднички универзитет - "Радивој Ћирпанов", Нови Сад, 1976.
- [8] Lj. Tancic, "The experimental research two phase flow parametars in the small arms barrel", Review Technical Research of Yugoslav Army, Belgrade, No 2, P. 3 -9 (1999.)
- [9] M. Cvetkovic, Lj. Tancic, "Two phase flow models sensibility in small arms on initial parameters", Review Technical Research of Yugoslav Army, Belgrade, No 3, P. 3 -7 (1999.)