



(12) CERERE DE BREVET DE INVENȚIE

(21) Nr. cerere: a 2009 00791

(22) Data de depozit: 05.10.2009

(41) Data publicării cererii:  
30.07.2014 BOPI nr. 7/2014

(71) Solicitant:  
• HOMUTESCU TIBERIU NICOLAE,  
STR. HUȘI NR.9, BL.B37, AP.32,  
SECTOR 4, BUCUREȘTI, B, RO

(72) Inventatori:  
• HOMUTESCU TIBERIU NICOLAE,  
STR. HUȘI NR.9, BL.B37, AP.32,  
SECTOR 4, BUCUREȘTI, B, RO

(54) **METODĂ DE SIMULARE NUMERICĂ, BAZATĂ PE METODA VOLUMELOR FINITE, PENTRU REZOLVAREA PROBLEMEI DIRECTE A BALISTICII INTERIOARE PENTRU SISTEMELE BALISTICE CAL. 40X46 MM CU DOUĂ CAMERE DE PRESIUNE**

(57) Rezumat:

Invenția se referă la o metodă pentru punerea în evidență a fenomenelor care apar și se desfășoară într-o țeavă a unei arme, sau într-o cameră de ardere a unui motor de rachetă. Metoda conform invenției realizează o simulare numerică prin care se analizează evoluția parametrilor termodinamicii ai gazelor și produselor de ardere, pentru a se obține variația presiunii în camerele de înaltă și joasă presiune și a vitezei unei grenade în țeava unui aruncător, în funcție de spațiu și timp, și se bazează pe următoarele considerente: pulbera de bază se consideră sferică, puternic degresivă și, ca atare, nu are suprafață de ardere constantă; se adoptă ca lege a vitezei de ardere legea exponențială; pulbera de bază arde într-o cameră de înaltă presiune (CIP), atingând o valoare la care se deschid ajutoarele și continuă arderea pulberii în această cameră (CIP), gazele rezultate trecând într-o cameră de joasă presiune (CJP), unde presiunea începe să crească, iar în camera de înaltă presiune (CIP) se atinge presiunea maximă, după terminarea arderii pulberii fiind continuată scurgerea gazelor în camera de joasă presiune (CJP), presiunea din camera de înaltă presiune (CIP) scăzând, crește cea din camera de joasă presiune (CJP), la un moment dat

ajungându-se la un echilibru prin egalarea presiunilor; de transferul de căldură de la gazele de pulbere la monteculă, pereții tubului cartuș și țeavă ținându-se cont prin diminuarea forței pulberii, iar transformările se consideră izoterme doar până la terminarea arderii pulberii de bază, urmând apoi destinderea adiabatică a gazelor.

Revendicări: 7  
Figuri: 37

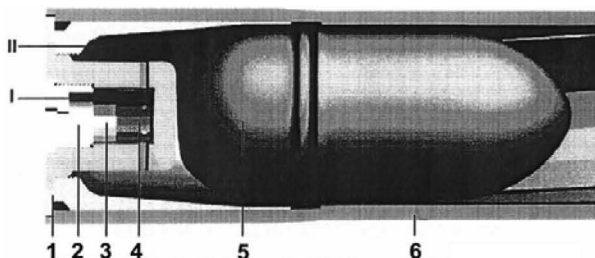


Fig. 1



OFICIUL DE STAT PENTRU INVENȚII ȘI MĂRC.	
Cerere de brevet de invenție	
Nr. ....	2009 00791
Data depozit ....	05-10-2009

## DESCRIEREA INVENȚIEI

### ***“Metoda de simulare numerică pentru rezolvarea problemei directe a balisticii interioare pentru sistemele balistice cal. 40 x 46 mm cu două camere de presiune, bazată pe metoda volumelor finite”***

Prin *“Metoda de simulare numerică pentru rezolvarea problemei directe a balisticii interioare pentru sistemele balistice cal. 40 x 46 mm cu două camere de presiune, bazată pe metoda volumelor finite”* se realizează rezolvarea problemei directe a balisticii interioare pentru gurile de foc cu două camere de presiune prin folosirea unor simulări numerice bazate pe metode ce folosesc tehnici de volume finite, aplicabile în domeniul mecanicii fluidelor. Această metodă de calcul este o metodă de simulare numerică prin care se analizează evoluția parametrilor termodinamici ai gazelor și produselor de ardere, obținându-se variația presiunii în camerele de înaltă și joasă presiune și a vitezei grenadei în țeava runcătorului în funcție de spațiu și timp.

#### **I. INTRODUCERE**

Balistica interioară a sistemelor de armament reprezintă totalitatea fenomenelor care apar și se desfășoară în țeava armelor sau în camerele de ardere a motoarelor rachetă.

Scopul general al studiilor de balistică interioară pentru un sistem definit de armament este determinarea evoluției presiunii gazelor și a mișcării proiectilului în spațiu și timp (numită și problema directă a balisticii interioare).

Caracteristicile principale de balistică interioară sunt caracteristici de performanță (de exemplu viteza inițială a proiectilului) sau de siguranță (de exemplu presiunea maximă).

Aceste mărimi trebuie să fie cunoscute cu precizie pentru a asigura îndeplinirea cerințelor de siguranță și compatibilitate ale sistemului de armament.

Organizarea de principiu a unui sistem de armament cu două camere de presiune este prezentată în fig. 1

În cazul sistemelor balistice cu două camere de presiune, balistica interioară începe cu inițierea capsei de aprindere care produce gaze și produși solizi fierbinți care se răspândesc în

încărcătura de pulbere principală. Temperatura elementelor de pulbere din încărcătura de azvârlire crește prin diferite mecanisme de transfer termic: conducție, convecție și radiație. În momentul atingerii temperaturii de aprindere elementele de pulbere se aprind. Aprinderea este urmată de deflagrație, proces prin care elementele de pulbere sunt transformate în gaze. Inițial procesul se desfășoară într-un volum constant, în interiorul camerei de înaltă presiune. Presiunea crește rapid, iar viteza de ardere crește o dată cu presiunea, debitul de masă a gazelor de ardere crește în mod continuu.

După depășirea unei valori limită a presiunii din camera de înaltă presiune, gazele se scurg în camera de joasă presiune, constituită din volumul dinapoia grenadei.

La o funcționare normală, odată cu creșterea continuă a presiunii, are loc și creșterea forței exercitate de gaze pe baza grenadei. La un moment dat, forța exercitată pe baza grenadei, pentru o valoare a presiunii numită presiunea de start, atinge valoarea forței de extracție a grenadei din tubul cartuș, producându-se detașarea celor două elemente și angrenarea brâului forțator în ghinturi. În acest moment grenada își începe mișcarea în țevă.

Deși deplasarea grenadei provoacă creșterea volumului ocupat de gazele de ardere, ceea ce presupune o scădere a presiunii, acest lucru nu are loc în prima fază întrucât combustia continuă, producându-se din ce în ce o cantitate mai mare de gaze. Totuși, la un moment dat, creșterea presiunii încetează, viteza de creștere a volumului depășind viteza de producere a gazelor. În acest moment se atinge valoarea maximă a presiunii.

În a doua fază, în care presiunea scade, grenada continuă să fie accelerată până atinge gura țevii ( $t=t_g$ ;  $x_p=x_g$ ). În acest timp presiunea scade până la aproximativ a șasea parte din valoarea presiunii maxime, o valoare în continuare mult mai mare decât presiunea atmosferică.

În timpul destinderii gazelor de ardere, dacă arma și muniția au fost proiectate corespunzător, încărcătura de azvârlire arde complet. Este preferabil ca acest lucru să se întâmple înainte ca grenada să părăsească țeava, altfel eficiența balistică este mică, flacăra la gura țevii mare și se produce o cantitate mare de fum.

## II. REZOLVAREA PROBLEMEI DIRECTE A BALISTICII INTERIOARE PENTRU SISTEMELE DE ARMAMENT CU DOUĂ CAMERE DE PRESIUNE PRIN METODA DE INTEGRARE NUMERICĂ. STUDIU DE CAZ

Datorită posibilităților limitate de calcul de la data formulării teoriei care abordează fenomenul tragerii cu armamentul gazodinamic *au fost admise unele ipoteze simplificatoare*, pentru studiul problemei directe a balisticii interioare.

S-a elaborat o *metodă numerică de calcul pentru soluționarea ecuațiilor balisticii interioare a sistemelor de armament cu două camere de presiune*, bazată pe teoria lui Corner, *la care s-au adus unele modificări* (legea de ardere nu mai este cea liniară, pulberea de bază nu mai are suprafața de ardere constantă, fiind puternic regresivă, transformările se consideră izoterme doar până la terminarea combustiei pulberii de bază, urmând apoi destinderea adiabatică a gazelor).

*Modelul matematic propus rezolvă problema fundamentală a balisticii interioare prin integrarea numerică a ecuațiilor și relațiilor specifice fenomenului tragerii cu un sistem de armament cu două camere*. Avându-se în vedere avantajele calculului numeric, pentru modelul matematic propus, *o parte din ipotezele simplificatoare au fost înlăturate*.

*Modelul matematic simplificat propus se integrează numeric prin metoda Runge-Kutta*, adoptându-se un increment de integrare de  $0,5e-6$  secunde ( $0,5 \mu s$ ).

Pentru a valida modelul de calcul propus există posibilitatea de a compara rezultatele obținute cu rezultatele obținute pe cale experimentală. Astfel a fost conceput un dispozitiv experimental numit "dispozitiv static".

Acest dispozitiv reproduce în condiții de laborator combustia pulberii în CÎP și scurgerea gazelor în CJP, în condițiile în care "grenada", simulată prin închizătorul dispozitivului, rămâne pe loc.

Cu alte cuvinte, dispozitivul static este o bombă manometrică cu două camere de presiune.

Ulterior s-a efectuat o *aplicație pentru cazul unui dispozitiv dinamic*, respectiv *simularea sistemului de armament cu două camere de presiune*.

**Date de intrare în aplicația "DISPOZITIVUL STATIC"**

Wo1	1.43e-6	[m <sup>3</sup> ]
Wo2	22.7e-6	[m <sup>3</sup> ]
Dens	1600	[Kg/m <sup>3</sup> ]
Omega	0.6e-3	[kg]
Omega_a	0.028e-3	[kg]
ForP	680000	[J/kg]
ForP_a	250000	[J/kg]
Alfa	0.00116	[m <sup>3</sup> /kg]
Ro	4.474e-3	[m]
Delta	419.6	[Kg/m <sup>3</sup> ]
Aaj	6*3.1416e-6	[m <sup>2</sup> ]
Pjo	101325	[Pa]
vardo	1.011e-6	
niu	0.86	
Kapa	1.26	

**Rezultate obținute****DISPOZITIV STATIC**

t <sub>Pa</sub> = 0.0005 ms	Pa = 67.3214 bari
t <sub>Pimax</sub> = 0.1705 ms	Pi max = 2038.18 bari
t <sub>Pjo</sub> = 0.1353 ms	P2 o = 1.445 bari
t <sub>Pj max</sub> = 0.8815 ms	Pj max = 179.0227 bari
t <sub>FI max</sub> = 0.1875 ms	FI max = 0.461243
t <sub>PSI max</sub> = 0.5425 ms	PSI max = 0.9950
t <sub>Umax</sub> = 0.1705 ms	U max = 14.1481 m/s
t <sub>Qe max</sub> = 0.1535 ms	Qe max = 3.8286 kg/s
t <sub>Qa max</sub> = 0.1700 ms	Qa max = 2.9351 kg/s

Variația presiunii P<sub>1</sub> și P<sub>2</sub> a gazelor în CÎP și CJP este prezentată în fig. 2.

**Date de intrare în aplicația „DISPOZITIVUL DINAMIC”**

Wo1	1.43e-6	[m <sup>3</sup> ]
Wo2	16.313e-6	[m <sup>3</sup> ]
Dens	1600	[Kg/m <sup>3</sup> ]
Omega	0.6e-3	[kg]
Omega_a	0.028e-3	[kg]
ForP	680000	[J/kg]
ForP_a	250000	[J/kg]
Alfa	0.00116	[m <sup>3</sup> /kg]
Ro	4.474e-3	[m]
Delta	419.6	[Kg/m <sup>3</sup> ]
Aaj	6*3.1416e-6	[m <sup>2</sup> ]
Pjo	101325	[Pa]
Atv	1256.6e-6	[m <sup>2</sup> ]

Mp	0.210	[kg]
Rcon	346.4	[J/kg.K]
Xg	0.275	[m]
vardo	1.011e <sup>-6</sup>	
niu	0.86	
Kapa	1.26	

**Rezultate obținute**

**DISPOZITIV DINAMIC**

$t_{Pa} = 0.0005$ ms	$Pa = 67.3214 \times 10^5$ Pa
$t_{1max} = 0.1705$ ms	$P_{1max} = 2038.18 \times 10^5$ Pa
$t_{2ini} = 0.1535$ ms	$P_{2ini} = 1.61 \times 10^5$ Pa
$t_{2max} = 0.429$ ms	$P_{2max} = 188.21 \times 10^5$ Pa
$t_{FIini} = 0.154$ ms	$FI_{ini} = 0.435$
$t_{FImax} = 0.188$ ms	$FI_{max} = 0.46$
$t_{PSImax} = 0.542$ ms	$PSI_{max} = 0.995$
$t_{Umax} = 0.17$ ms	$U_{max} = 14.15$ m/s
$t_{Ufin} = 0.745$ ms	$U_{fin} = 1.28$ m/s
$t_{Qe0} = 0.0005$ ms	$Qe_0 = 0.3012$ kg/s
$t_{Qemax} = 0.154$ ms	$Qe_{max} = 3.83$ kg/s
$t_{Qefin} = 0.27$ ms	$Qe_{fin} = 1.001$ kg/s
$t_{Qefin} = 0.271$ ms	$Qe_{fin} = 0$ kg/s
$t_{Qa0} = 0.154$ ms	$Qa_0 = 2.88$ kg/s
$t_{Qamax} = 0.17$ ms	$Qa_{max} = 2.94$ kg/s
$t_{Qa fin} = 0.3780$ ms	$Qa_{fin} = 1.0008$ kg/s
$t_{Qa fin} = 0.3784$ ms	$Qa_{fin} = 0.0000$ kg/s
$t_{Vini} = 0.206$ ms	$V_{ini} = 1.01$ m/s
$t_g = 3.955$ ms	$V_g = 89.14$ m/s
$t_g = 3.955$ ms	$X_p = 0.2674$ m
$X_p = 0.2674$ m	$V_g = 89.14$ m/s
$t_{T2max} = 0.746507$ ms	$T_{2max} = 1961.19$ K
$t_{T2min} = 3.955$ ms	$T_{2min} = 1077.3$ K
$t_{Xi} = 0.176$ ms	$X_i = 0,000001$ m
$t_g = 3.955$ ms	$X_g = 0.2674$ m

Variațiile presiunilor  $P_i$  și  $P_j$  a gazelor în CÎP și CJP, precum și variația cu timpul și cu spațiul a vitezei grenadei în țeavă sunt prezentate în fig. 3÷7.

### III. DESCRIEREA METODEI DE SIMULARE NUMERICĂ PENTRU REZOLVAREA PROBLEMEI DIRECTE A BALISTICII INTERIOARE PENTRU SISTEMELE BALISTICE CAL. 40 X 46 MM CU DOUĂ CAMERE DE PRESIUNE

Datorită complexității fenomenului tragerii cu un sistem de armament cu două camere de presiune, au fost admise unele ipoteze simplificatoare pentru studiul problemei directe a balisticii interioare.

Admiterea acestor ipoteze conferă un caracter simplificator al modelului matematic stabilit pentru rezolvarea problemei directe a balisticii interioare prin metode numerice de integrare a ecuațiilor diferențiale. Introducerea fiecărei ipoteze în calcule nu face decât să genereze câte un set de erori care, în final, denaturează rezultatele.

Astfel, am încercat o îmbunătățire a rezultatelor și modului de rezolvare a problemei balisticii interioare pentru gurile de foc cu două camere de presiune prin *stabilirea unei metode de simulare numerică pentru rezolvarea problemei directe a balisticii interioare pentru gurile de foc gazodinamice*.

*Metoda de calcul a parametrilor balisticii interioare pentru aruncătoarele de grenade a presupus și studiu de caz și validarea acesteia* (trageri în bomba manometrică și stabilirea legii vitezei de ardere, testarea în dispozitivul static și simularea numerică în dispozitivul dinamic).

Prin "*Metoda de simulare numerică pentru rezolvarea problemei directe a balisticii interioare pentru sistemele balistice cal. 40 x 46 mm cu două camere de presiune, bazată pe metoda volumelor finite*" se realizează o îmbunătățire a rezultatelor și modului de rezolvare a problemei directe a balisticii interioare pentru gurile de foc cu două camere de presiune prin folosirea unor simulări numerice bazate pe metode ce folosesc tehnici de volume finite, aplicabile în domeniul mecanicii fluidelor. Această metodă de calcul este o metodă de simulare numerică prin care se analizează evoluția parametrilor termodinamici ai gazelor și produselor de ardere (combustia), aplicată în tridimensional (3D).

Modelul matematic propus conține **6 ecuații**, respectiv ecuațiile programului FLUENT *de mecanica fluidelor compresibile* (ecuația de conservare a masei, a impulsului pe cele 3 direcții, a energiei și ecuația de stare a gazelor), la care se atașează și **2 ecuații specifice balisticii interioare** (ecuația de ardere a pulberii, legea de mișcare a grenadei), cu opt necunoscute ( $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ ,  $p$ ,  $T$ ,  $\rho$ ,  $u$ ,  $s$ ). Se stabilește astfel o metodă de calcul a parametrilor balisticii interioare

pentru gurile de foc ce utilizează muniție cu două camere de presiune (aruncătoarele de grenade) folosind simularea numerică în domeniul fluidelor.

**Ecuațiile modelului matematic**, în formă vectorială, sunt următoarele:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v}) = S_m \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} \cdot (\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h, \\ p \cdot (w_1 - \alpha) = R \cdot T \\ u = u_1 \cdot p^v \\ F = p \cdot s = \varphi \cdot m \frac{dv}{dt} = \varphi \cdot m \cdot v \frac{dv}{dl} \end{array} \right.$$

unde:

$\rho$	densitatea gazului
$\vec{v}$	viteza grenadei
$S_m$	sursa
$p$	presiunea gazelor pulberii în spațiul din spatele grenadei
$\vec{\tau}$	tensorul stres
$\vec{\rho g}$	forța gravitațională
$k_{eff}$	conductivitatea efectivă ( $k+k_t$ , unde $k_t$ este conductivitatea termică turbulentă), definită în acord cu modelul de turbulență utilizat
$\vec{J}_j$	fluxul de difuzie a speciei $j$
$S_h$	include căldura reacției chimice și alte surse volumetrice de căldură definite
$w_1$	volum masic
$u$	viteza de ardere
$u_1$	coeficientul presiunii
$v$	exponentul presiunii
$\vec{F}$	forța externă
$m=q/g$	masa grenadei
$\varphi$	coeficient de masă fictivă
$F$	rezultanta forțelor exterioare pe suprafața grenadei

La modelul matematic se atașează un model fizic, model prin care se introduc proprietățile materialelor, se face alegerea pulberii echivalente, se introduc noțiunile de solid, de fluid compresibil, de vâscozitate, de transfer termic, produsele de ardere fiind gaze etc.

Rezolvarea problemei prin simularea numerică în domeniul fluidelor s-a realizat în programul FLUENT, prin utilizarea solverului bazat pe presiune, cu metoda segregării. Astfel, se



ia fiecare ecuație separat și se rezolvă pe rând. Prin utilizarea solverului bazat pe presiune, cu metoda cuplată, efortul de calcul crește, tinând cont că în acest fel se rezolvă simultan toate ecuațiile.

FLUENT este un program de calcul destinat modelării mișcării fluidelor și transformării acestora în geometrii complexe. Programul furnizează o flexibilitate completă a rețelei de volume finite (meșei), incluzând și capacitatea de a rezolva problemele curgerii folosind rețele nestructurate, care pot fi generate cu ușurință în geometrii complexe. Tipul de meșe suportate include meșe 2D triunghiulare, patrulatere, 3D tetraedrale/hexaedrale/piramidale/poliedrale și meșe hibride. FLUENT permite deasemenea „șlefuirea” sau „înăsprirea” meșei pe baza soluțiilor curgerii.

Programul FLUENT este scris în limbajul “C” și utilizează la maxim flexibilitatea și puterea limbajului. Acest lucru face ca memoria dinamică alocată, structura de date și controlul flexibil al solverului să fie utilizate cu eficiență. În plus, FLUENT utilizează o arhitectură client-server, care îi permite să ruleze în mod separat procese simultane pe unitatea de calcul. Această arhitectură permite o execuție eficientă, un control interactiv și o flexibilitate completă între diferite tipuri de mașini și sisteme de operare.

Pentru rezolvarea ecuațiilor liniare din modelul matematic propus se folosește un model discretizat, realizându-se discretizarea ecuațiilor prin calculul valorilor acestora pe un volum de control, respectiv în celule, pe cele trei direcții.

Pentru rezolvarea ecuațiilor liniare din modelul matematic propus se folosește un model discretizat, realizându-se discretizarea ecuațiilor prin calculul valorilor acestora pe un volum de control, respectiv în celule, pe cele trei direcții. La o iterație se calculează densitatea  $\rho$ , a cărei valoare se introduce în iterația următoare pentru calculul celorlalte necunoscute.

Volumul de control, de dimensiuni finite sau infinitezimale, reprezintă o zonă din spațiu, mărginită de o suprafață de control perfect permeabilă la orice schimb de masă, impuls sau energie și asupra căreia pot acționa forțe exterioare. Volumul de control trebuie să fie raportat la un sistem de referință, față de care poate fi în repaus sau în mișcare. Dacă suprafața de control este perfect impermeabilă la orice transfer de masă, impuls sau energie, atunci se obține noțiunea de volum material (sistem termodinamic simplu).

Avantajul lucrului cu programul FLUENT îl reprezintă posibilitatea introducerii de noi noțiuni în calculul necunoscutelor, a proprietăților materialelor, eliminarea ipotezelor simplificatoare etc.

Din aceste considerente, stabilirea metodei, respectiv stabilirea ecuațiilor utilizate, a condițiilor de lucru, a materialelor folosite și a proprietăților acestora trebuie făcută cu foarte mare atenție.

Astfel, am formulat o metodă pentru rezolvarea problemei directe a balisticii interioare a gurilor de foc cu două camere de presiune, fundamentată pe un model fizic care ia în considerare cu acuratețe sporită proprietățile fenomenelor reale care au loc în timpul tragerilor. În această metodă, foarte multe dintre ipotezele simplificatoare introduse de metodele convenționale de rezolvare a problemei directe a balisticii interioare au fost eliminate și substituite cu analize cantitative.

Utilizarea programului FLUENT, prezintă următoarele avantaje:

- abordarea problemei curgerii fluidului în sistemele de armament cu două camere de presiune, în trei dimensiuni, ca problemă axialsimetrică, luând în considerare deplasările gazului pe trei direcții;
- introducerea proprietăților produselor de ardere ca funcții de temperatura (căldura specifică, conductivitatea, vâscozitatea moleculară);
- asigurarea acurateții calculului, superior altor metode ca urmare a posibilității introducerii stratului limită atașat pereților ce separă fluidul de mediul exterior;
- analiza locală în orice punct al domeniului ocupat de produsele de ardere;

Soluțiile obținute prin simulări numerice cu ajutorul programului FLUENT se apropie exponențial de cele reale sau de rezultatele determinărilor experimentale.

Avantajele utilizării modelului matematic propus:

- posibilitatea introducerii unor noi noțiuni în calculul necunoscutelor (ex.: vâscozitatea, transferul termic la perete, forța de rezistență la înaintarea grenadei în țevă, frecarea în ghinturi etc.);
- introducerea proprietăților materialelor și ale fluidului utilizat;
- eliminarea ipotezelor simplificatoare utilizate la modelul matematic prin integrarea ecuațiilor și sistemelor de ecuații diferențiale (modelul clasic).

Metoda de rezolvare propusă *se poate utiliza cu succes la proiectarea unui sistem balistic nou*, în care probele de laborator, uzină și poligon se reduc drastic.

Acest fapt influențează *reducerea costurilor de fabricație, de dezvoltare industrială, testare-evaluare și introducere în fabricație.*

#### IV. VALIDAREA METODEI ȘI A MODELULUI MATEMATIC PROPUȘ

După stabilirea modelului matematic s-a inițiat o aplicație de simulare pentru validarea rezultatelor obținute, respectiv a metodei propuse.

IV.1 Rezultate înregistrate la tragerile experimentale executate în anul 2003 sunt prezentate în tabelul următor:

**Tabelul 1**

	$t_{\text{sparg ajut}} [\mu\text{s}]$	$t_{P_{1\text{max}}} [\mu\text{s}]$	$P_{1\text{max}} [\text{bari}]$	$t_{P_{2\text{max}}} [\mu\text{s}]$	$P_{2\text{max}} [\text{bari}]$
Tr 1	85	85	2000	397	184
Tr 2	85	117	2280.00	411	196
Tr 3	85	132	2200.00	411	204

Variația presiunilor în CÎP și CJP este prezentată în fig. 8.

Graficele înregistrate pe osciloscop au fost digitizate, la cele trei trageri obținându-se următoarele variații ale presiunilor în CÎP și CJP:

**Tabelul 2**

	$t_{p_{1\text{max}}} [\mu\text{s}]$	$P_{1\text{max}} [\text{bari}]$	$t_{p_{2\text{max}}} [\mu\text{s}]$	$P_{2\text{max}} [\text{bari}]$
Tr 1	81.86	2000.24	531.54	188.73
Tr 2	125.45	2280.00	552.27	199.64
Tr 3	121.76	2200.00	564.27	209.35

Imaginile variației presiunii gazelor în CÎP și CJP, la cele trei trageri executate în anul 2003, sunt prezentate în fig. 9÷11.

#### IV.2 SIMULAREA FENOMENELOR CARE SE PRODUC LA TRAGERILE CU DISPOZITIVUL STATIC UTILIZÂND METODA DE SIMULARE NUMERICĂ

În cadrul determinărilor experimentale prin teste de laborator a caracteristicilor balistice statice ale pulberilor, respectiv evoluția presiunii în CÎP și CJP, a fost conceput un sistem de testare statică, care reproduce dimensional cele două camere, de înaltă și joasă presiune.

Testul este static deoarece elementul constructiv care substituie grenada este fix. Astfel, a fost construit un capac pentru obturarea dispozitivului, capac în care este practicat un orificiu pentru transductorul piezoelectric care măsoară presiunea în CÎP.

Pentru verificarea metodei propuse de simulare numerică în domeniul fluidelor, în programul FLUENT a fost modelat un dispozitiv static similar cu cel utilizat la determinările experimentale, pe baza cotelor și dimensiunilor măsurate pe acestea.

Prin simularea numerică a acestei metode de testare se verifică arderea amorsei, se controlează evoluția în timp a presiunilor în cele două camere, fără mișcarea grenadei, se verifică legea vitezei de ardere a pulberii, variația fracțiunii de pulbere arse  $\psi$ , a debitelor gazelor rezultate în urma arderii elementului de pulbere echivalent și a gazelor scurse prin ajutaje, variația densității în CÎP și CJP, variația temperaturii în CÎP și CJP etc.

Dimensiuni relevante ale Sistemului de testare statică sunt prezentate în fig. 12.

Modelul sistemului de armament cu două camere de presiune a fost discretizat ca în fig. 2. Discretizarea modelului a fost efectuată într-o rețea axialsimetrică dinamică. De asemenea, au fost precizate elementele sistemului, frontierele domeniului fluid și elementele rețelelor, statică și dinamică, de discretizare.

Discretizarea modelului desenat în GAMBIT pentru Sistemul de testare statică este prezentată în fig. 13.

### DATE DE INTRARE ÎN APLICAȚIA “DISP STATIC”

$\omega$  este masa încărcăturii de pulbere =  $0,6 \times 10^{-3}$ , [kg]

$d_{aj}$  este diametrul ajutajelor,  $d_{aj} = 2 \times 10^{-3}$ , [m]

$p_{ref}$  este presiunea de referință,  $p_{ref} = 101325$  [Pa]

$f = 80,0 \times 10^4$  [J/kg]

R este constanta gazelor  $R = \frac{\bar{R}}{M_{mol}} = 346,44$  [J/kg K]

$\alpha$  este covolumul,  $\alpha = 0,00116$  [m<sup>3</sup>/kg]

R este raza elementului de pulbere echivalent  $R = 0,004474$  [m]

$u_1$  este coeficientul legii vitezei de ardere,  $u_1 = 1,0011e-06$

$v$  este exponentul presiunii din legea vitezei de ardere,  $v = 0,86$

**Tabelul 3**

T [K]	500	1000	1500	2000	2500	3000
$C_p$ [J/Kg·K]	1336,53	1500,558	1613,135	1692,401	1740,696	1773,952
$\mu$ [Kg/m·s]	$2,475 \cdot 10^{-5}$	$4,0913 \cdot 10^{-5}$	$5,3736 \cdot 10^{-5}$	$6,5393 \cdot 10^{-5}$	$7,574 \cdot 10^{-5}$	$8,5393 \cdot 10^{-5}$
R [J/Kg·K]	346,43	346,43	346,43	346,43	346,43	346,43
$\lambda$ [W/m·K]	0,0438	0,0791	0,1099	0,1389	0,1646	0,1885
k	1,349894	1,300166	1,273489	1,257383	1,248468	1,242679
a [m/s]	483,55	671,13	813,49	933,38	1039,84	1136,44

### Rezultate obținute în aplicația “DISP STATIC”

DISP STATIC			
$tp1_{max}$	0.000218 ms	$P_{1_{max}}$	2,092.18 bari
$tp1_{max TRAD}$	0.000213 ms	$P_{1_{max TRAD}}$	2,163.46 bari
$tp2_{min}$	0.000191 ms	$P_{2_{min}}$	0.207479 bari
$tp2_{min TRAD}$	0.000197 ms	$P_{2_{min TRAD}}$	0.000001 bari
$tp2_{max}$	0.000656 ms	$P_{2_{max}}$	186.87 bari
$tp2_{max TRAD}$	0.000644 ms	$P_{2_{max TRAD}}$	187.61 bari

$t_{0 Qa}$	0.000191 ms	$Q_{a \text{ start}}$	0.000002 kg/s
$t_{Qa \text{ max}}$	0.000215 ms	$Q_{a \text{ max}}$	2.43 kg/s
$t_{Qe \text{ min}}$	0.00001 ms	$Q_{e \text{ min}}$	0.0083 kg/s
$t_{Qe \text{ max}}$	0.000193 ms	$Q_{e \text{ max}}$	4.062 kg/s
$t_{\text{sparg aj}}$	0.000191 ms	$PSI_{\text{sparg aj}}$	0.357449
$t_{PSI 0.995}$	0.000654 ms	$PSI$	0.995
$t_{T_{\text{max CIP}}}$	0.000192 ms	$T_{\text{max CIP}}$	2,252.83 K
$t_{T_{\text{max CJP}}}$	0.000314 ms	$T_{\text{max CJP}}$	2230.74 K
$t_{\rho_{\text{max CIP}}}$	0.000236 ms	$\rho_{\text{max CIP}}$	219.229 kg/m <sup>3</sup>
$t_{\rho_{\text{max CJP}}}$	0.00164 ms	$\rho_{\text{max CJP}}$	25.549 kg/m <sup>3</sup>

Variațiile presiunilor  $P_1$  și  $P_2$  a gazelor în CÎP și CJP, valori *mediate* și valori *măsurate cu traductori piezoelectrice fictivi* precum și variația cu timpul și cu spațiul a vitezei grenadei în țevă sunt prezentate în fig. 14÷17.

### IV.3 SIMULAREA NUMERICĂ A PROBLEMEI DIRECTE A BALISTICII INTERIOARE PENTRU SISTEMELE CU DOUĂ CAMERE DE PRESIUNE

Metodă de simulare numerică bazată pe metoda volumelor finite pentru rezolvarea problemei directe a balisticii interioare (Dispozitivul dinamic al simulării)

#### DATE DE INTRARE ÎN APLICAȚIA “LANS-GREN”

$\omega$  este masa încărcăturii de pulbere,  $\omega = 0,6 \times 10^{-3}$  [kg]

$d_{aj}$  este diametrul ajutoarelor,  $d_{aj} = 2 \times 10^{-3}$  [m]

$p_{ref}$  este presiunea de referință,  $p_{ref} = 101325$  [Pa]

$f = 80,0 \times 10^4$  [J/kg]

R este constanta gazelor,  $R = \frac{\bar{R}}{M_{mol}} = 346,44$  [J/kg K]

$\alpha$  este covolumul,  $\alpha = 0,00116$  [m<sup>3</sup>/kg]

R este raza elementului de pulbere echivalent,  $R = 0,004474$  [m]

$u_1$  este coeficientul legii vitezei de ardere,  $u_1 = 1,0011e-06$

$v$  este exponentul presiunii din legea vitezei de ardere,  $v = 0,86$

Tabelul 4

T [K]	500	1000	1500	2000	2500	3000
$C_p$ [J/Kg·K]	1336,53	1500,558	1613,135	1692,401	1740,696	1773,952
$\mu$ [Kg/m·s]	$2,475 \cdot 10^{-5}$	$4,0913 \cdot 10^{-5}$	$5,3736 \cdot 10^{-5}$	$6,5393 \cdot 10^{-5}$	$7,574 \cdot 10^{-5}$	$8,5393 \cdot 10^{-5}$
R [J/Kg·K]	346,43	346,43	346,43	346,43	346,43	346,43
$\lambda$ [W/m·K]	0,0438	0,0791	0,1099	0,1389	0,1646	0,1885
k	1,349894	1,300166	1,273489	1,257383	1,248468	1,242679
a [m/s]	483,55	671,13	813,49	933,38	1039,84	1136,44

Discretizarea modelului pentru Metoda de simulare numerică bazată pe metoda volumelor finite pentru rezolvarea problemei directe a balisticii interioare este prezentată în fig. 18 ÷ 19

Modelul sistemului de armament cu două camere de presiune pentru dispozitivul dinamic a fost discretizat ca în fig. 18. Au fost precizate elementele sistemului, frontierele domeniului fluid și elementele rețelilor de discretizare, statice și dinamice (elementul de pulbere și corpul grenadei).

În cazul sistemului analizat, cu o configurație interioară variabilă, s-a utilizat o rețea de discretizare dinamică care permite ajustarea în funcție de modul în care evoluează combustia, în așa fel încât în orice moment al analizei fenomenului, domeniul ocupat de produsele de combustie să fie ocupat de volume finite cu dimensiuni rezonabile.

#### Rezultate obținute în aplicația "LANS-GREN"

LANS-GREN-2			
$t_{P1 \max}$	0.000212 ms	$P_{1 \max}$	2,083.44 bari
$t_{P1 \max \text{ TRAD}}$	0.000213 ms	$P_{1 \max \text{ TRAD}}$	2,192.94 bari
$t_{P2 \min}$	0.00019 ms	$P_{2 \min}$	3,339 bari
$t_{P2 \min \text{ TRAD}}$	0.00019 ms	$P_{2 \min \text{ TRAD}}$	2,180 bari
$t_{P2 \max}$	0.000428 ms	$P_{2 \max}$	215.51 bari
$t_{P2 \max \text{ TRAD}}$	0.000432 ms	$P_{2 \max \text{ TRAD}}$	213.86 bari
$t_{Qa}$	0.000192 ms	$Q_a \text{ start}$	0.65 ks/s
$t_{Qa \max}$	0.000238 ms	$Q_a \max$	2.46 kg/s
$t_{Qe \min}$	0.00001 ms	$Q_e \min$	0.0083 kg/s
$t_{Qe \max}$	0.000193 ms	$Q_e \max$	4.11 kg/s
$t_{\text{sparg aj}}$	0.00019 ms	$PSI_{\text{sparg aj}}$	0.357
$t_{PSI 0.995}$	0.000648 ms	$PSI$	0.995
$t_{T \max \text{ CIP}}$	0.000192 ms	$T_{\max \text{ CIP}}$	2,259.78 K
$t_{T \max \text{ CJP}}$	0.000396 ms	$T_{\max \text{ CJP}}$	1,689.47 K
$t_{\rho \max \text{ CIP}}$	0.000233 ms	$\rho_{\max \text{ CIP}}$	218.08 kg/m <sup>3</sup>
$t_{\rho \max \text{ CJP}}$	0.000442 ms	$\rho_{\max \text{ CJP}}$	36.632 kg/m <sup>3</sup>
$t_g$	0.00406 ms	$V_g$	86.52 m/s
		$X_g$	0.2674 m
		$X_{\max}$	0.3923 m
		$V_{X \max}$	86.69 m/s
		$\Delta X$	0.1249
		$\Delta V$	0.17 m/s

Variațiile cu timpul a presiunilor gazelor,  $P_1$  și  $P_2$ , mediate și citite cu traductori piezoelectrice fictivi, precum și variația cu timpul și cu spațiul a vitezei grenadei în țevă sunt prezentate în fig. 20÷26. Variația presiunii și temperaturii în simulările numerice – DISPOZITIVUL DINAMIC este prezentată în fig. 27

## V. STUDIUL COMPARATIV AL REZULTATELOR OBȚINUTE

### Compararea rezultatelor *experimentale* cu cele obținute prin *integrare numerică*

În figurile următoare se prezintă în aceleași grafice rezultatele obținute la tragerile experimentale și prin integrare numerică, pentru o facilă comparație a acestora.

Variația presiunii gazelor în CÎP și CJP, obținută la tragerile experimentale în dispozitivul static și prin integrare numerică este prezentată în fig. 28÷30.

1. **Presiunea maximă în CÎP**  $p_{int}$ , obținută teoretic (prin integrare), are valoarea de 2038,18 bari, în timp ce presiunea  $p_{1 exp}$ , obținută experimental, se situează în intervalul 2000 ÷ 2280 bari (**imprecizie de max. 10 %**). Acest lucru se datorează faptului că simularea numerică nu ține seama de unii parametri ca de exemplu: masa încărcăturii de azvârlire, care poate varia, compoziția granulometrică a pulberii, grosimea și proprietățile materialului căpușelii etc;
2. **Presiunea maximă în CJP**  $p_{2 int}$  obținută prin **integrare numerică** are valoarea maximă de 188,21 bari, în timp ce  $p_{2 exp}$  se încadrează în intervalul 188,73 ÷ 209,35 bari, ceea ce înseamnă o imprecizie de 10 %;
3. Evoluția în timp a  $p_{2 int}$  este în sensul unei descreșteri rapide pentru rezultatele integrării numerice, datorită faptului că rezultatele experimentale sunt obținute cu dispozitivul static, la care CJP rămâne închisă și nu apare destinderea gazelor ca urmare a mișcării grenadei în țeavă și, ulterior, destinderii la presiunea atmosferică;
4. În urma analizării rezultatelor obținute la tragerile experimentale în dispozitivul static de presiune, comparativ cu cele obținute la integrarea numerică pentru rezolvarea problemei directe a balisticii interioare pentru sistemele de armament cu două camere de presiune, se constată ca **alura curbilor pentru variația presiunii în CÎP și CJP, până la desertizarea grenadei și începerii mișcării acesteia în țeava aruncătorului este similară**, valorile maxime obținute încadrându-se în intervalele determinate experimental, **cu o imprecizie de max. 10 %**.

## **Compararea rezultatelor *experimentale* cu cele obținute prin *simulare numerică* în FLUENT la tragerile cu Dispozitivul static de presiune**

Variațiile presiunii gazelor în CÎP și CJP, obținută la tragerile experimentale în dispozitivul static și prin simulare numerică cu Dispozitivul static sunt prezentate în fig. 31÷33.

**1. Presiunea maximă în CÎP  $P_{1sim\ max}$** , obținută prin **simulare numerică** în FLUENT în dispozitivul static are valoarea de 2163,47 bari, în timp ce presiunea  $P_{1\ exp}$ , obținută experimental, se situează în intervalul 2000 ÷ 2280 bari (**imprecizie de max. 5 %**). Creșterea gradului de precizie se datorează faptului că în simularea numerică în FLUENT *au fost eliminate o parte din ipotezele simplificatoare*, iar *datele de intrare în aplicație sunt valori determinate*: masa încărcăturii de azvârlire, grosimea și proprietățile materialului dispozitivului, a căptușelii etc;

**2. Evoluția în timp a presiunii în CJP** obținută prin simulare numerică în FLUENT  $P_{2\ sim}$  *este în sensul unei descreșteri lente*, rezultatele fiind obținute cu dispozitivul static, la care CJP rămâne închisă și presurizată. Astfel, în CJP, după atingerea valorii maxime, presiunea coboară cu cca. 5 bari, ca urmare a transferului termic realizat între gazele rezultate în urma arderii pulberii și pereții dispozitivului static, respectiv al bombei manometrice cu dublă cameră de presiune;

**3. Presiunea maximă în CJP,  $P_{2\ sim\ max}$**  obținută prin **simulare numerică** în dispozitivul static are valoarea maximă de 187,61 bari, în timp ce  $P_{2\ exp}$  se încadrează în intervalul 188,73 ÷ 209,35 bari, **ceea ce înseamnă o imprecizie de 10 %**;

**4.** Față de modelul matematic propus pentru rezolvarea problemei directe a balisticii interioare pentru sistemele de armament cu două camere de presiune prin metoda de integrare numerică, *în cazul simulării numerice în FLUENT a fost efectuat calculul forței și covolumului pulberii P-60*, a fost stabilită *legea vitezei de ardere pentru pulberea de bază* ținându-se cont și de *influența amorsorului*, evaluându-se influența acestuia asupra combustiei inițiale a pulberii și evoluția presiunii în această primă etapă etc. Toate aceste considerente fac ca rezultatele simulării numerice să se suprapună într-o măsură foarte mare peste rezultatele obținute la tragerile reale.



**Compararea rezultatelor obținute prin *integrare* și *simulare numerică* în FLUENT în Dispozitivul dinamic**

Peste graficele de variație a presiunii în CÎP și CJP, precum și de variație a vitezei în funcție de timp și de spațiu obținute prin integrare numerică la tragerea cu dispozitivul dinamic, au fost suprapuse graficele de variație a presiunii în CÎP și CJP și a vitezei obținute prin simularea numerică în FLUENT la tragerea cu dispozitivul dinamic, măsurate cu traductorul fictiv, rezultatele obținute fiind prezentate în figurile următoare.

Astfel, la rezolvarea problemei directe a balisticii interioare pentru sistemele de armament cu două camere de presiune prin *integrare* și *simulare numerică* au fost obținute următoarele rezultate:

**Tabelul 5**

	$t_{P1max}$ [ms]	$P_{1max}$ [bari]	$t_{P2max}$ [ms]	$P_{2max}$ [bari]	$t_g$ [ms]	$V_g$ [m/s]	$X_g$ [m]	
<i>INTEGRARE</i>	0,17	2038,18	0,428	188,21	3,955	89,14	0,267	
<i>SIMULARE</i>	<i>Cu traductor</i>	0,212	2192,94	0,432	213,86	4,060	86,52	0,267
	<i>Fără traductor</i>	0,212	2083,44	0,428	215,51			

Variațiile presiunii gazelor în CÎP și CJP, obținută prin integrare și simulare numerică cu Dispozitivul dinamic sunt prezentate în fig. 34÷36.

## VI. VALIDAREA MODELULUI MATEMATIC PENTRU REZOLVAREA PROBLEMEI DIRECTE A BALISTICII INTERIOARE A GURILOR DE FOC GAZODINAMICE CU DOUĂ CAMERE DE PRESIUNE

Analizând comparativ rezultatele, se pot desprinde următoarele concluzii importante:

1. Față de modelul matematic propus pentru rezolvarea problemei directe a balisticii interioare pentru sistemele de armament cu două camere de presiune prin metoda de integrare numerică, *în cazul simulării numerice în FLUENT a fost efectuat calculul forței și covolumului pulberii P-60, a fost stabilită legea vitezei de ardere pentru pulberea de bază ținându-se cont și de influența amorsorului, evaluându-se influența acestuia asupra combustiei inițiale a pulberii și evoluția presiunii în această primă etapă etc.* Toate aceste considerente determină ca rezultatele simulării numerice să se suprapună într-o măsură foarte mare peste rezultatele obținute la tragerile reale;
2. La rezolvarea problemei directe a balisticii interioare pentru sistemele de armament cu două camere de presiune prin integrare numerică, la  $t = 0$  [ms] presiunea de amorsare  $p_a$  are valoarea de 68 bari. Prin deplasarea spre dreapta a graficului presiunii obținute prin integrare numerică, în sensul timpului, cu valoarea corespunzătoare atingerii presiunii de amorsare, respectiv  $\Delta t = 0,0643$  ms, se obține valoarea timpului la care se realizează presiunea maximă,  $t_{p1 \text{ exp max dep}} = 0,235$  ms. Astfel, alura graficelor presiunilor în CÎP obținute prin integrare numerică și prin simulare numerică în dispozitivul dinamic este identică;
3. Presiunea maximă  $p_{1int}$ , obținută prin integrare numerică are valoarea de 2038,18 bari, în timp ce presiunea  $p_{1sim}$ , obținută prin simulare numerică este 2192,94 bari (presiunea medie: 2083,44 bari).
4. În fig. 34 b, la 0,8 ms se observă pe curba presiunii obținută prin simulare numerică o ușoară denivelare a graficului, fapt care indică terminarea arderii pulberii, continuând cu destinderea adiabatică a gazelor;
5. Presiunea în CJP  $p_{2int}$  obținută prin integrare numerică are valoarea maximă de 188,21 bari, în timp ce  $p_{2sim}$  obținută prin simulare numerică este 213,86 bari (presiunea medie: 215,51 bari);

6. Variația dintre *valorile vitezelor* obținute prin cele două moduri de calcul dă câștig de cauză determinării prin integrare numerică, respectiv *89,14 m/s*, față de *86,52 m/s*, obținută prin simularea numerică.
7. În cazul simulării numerice *au fost luate în calcul toate fenomenele și procesele care au loc pe timpul perioadei de deplasare a grenadei în țeavă* (frecarea, transferul termic, etc.) prin introducerea coeficientului de masă fictivă
8. Diferențele valorice între mărimile determinate prin integrare numerică și cele determinate prin simulare numerică sunt datorate introducerii unor ipoteze de lucru în cazul metodei clasice.
  - i. Astfel, *ipoteza care introduce cea mai mare eroare este cea a combustiei izoterme* (temperatura este constantă pe timpul arderii pulberii, fapt injustificat de valorile obținute la simularea numerică, ceea ce determină și creșterea presiunii proporțional cu creșterea temperaturii;
  - ii. De asemenea, trecerea produselor din CÎP în CJP prin ajutaje, în calculul analitic a fost considerată staționară, debitul de trecere fiind determinat cu relațiile specifice, stabilite pentru ajutajele ideale. În cazul abordat, *ajutajele au la intrare și la ieșire pierderi locale de presiune datorate formei*. Ajutajul ideal și ajutajul dintre CÎP și CJP sunt prezentate în fig.37.
9. *Evoluția în timp a presiunilor în CÎP și CJP*, pentru ambele determinări, *este în sensul unei descreșteri rapide*, datorită faptului că rezultatele sunt obținute cu dispozitivul dinamic, la care CJP se deschide ca urmare a mișcării grenadei în țeavă și părăsirea acesteia, având loc destinderea adiabatică a gazelor și, ulterior, destinderea la presiunea atmosferică;
10. Presiunea în CJP, *P2 sim max, obținută prin simulare numerică în dispozitivul static* are valoarea maximă de *187,61 bari*, în timp ce *P2 exp* se încadrează în intervalul *188,73 ÷ 209,35 bari, ceea ce înseamnă o imprecizie de 10 %*;
11. *Presiunea maximă în CÎP, P1 sim max, obținută prin simulare numerică în FLUENT în dispozitivul static* are valoarea de *2163,47 bari*, în timp ce presiunea *P1 exp*, obținută experimental, se situează în intervalul *2000 ÷ 2280 bari (imprecizie de max. 5 %)*. *Creșterea gradului de precizie se datorează faptului că în simularea numerică în FLUENT au fost eliminate o parte din ipotezele simplificatoare, iar datele de intrare în aplicație sunt valori determinate: masa încărcăturii de azvârlire, grosimea și proprietățile materialului dispozitivului, a căptușelii etc*

12. În urma analizării rezultatelor obținute la integrarea și simularea numerică pentru rezolvarea problemei directe a balisticii interioare pentru sistemele de armament cu două camere de presiune, se constată faptul că *alura curbelor pentru variația presiunii în CÎP și CJP este identică, iar imprecizia obținută în cazul vitezelor este de max. 3 %.*

## VII. DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

Complexitatea și noutatea problemelor abordate în teză oferă specialiștilor din domeniu oportunități de aprofundare a fenomenelor evidențiate în această lucrare, fenomene nestudiate suficient până în prezent și care au o mare importanță în studiul parametrilor balisticii interioare a sistemelor de armament cu două camere de presiune.

În viitor consider că este necesar să se extindă cercetările în următoarele direcții:

- Introducerea *stratului limită la peretele țevii* aruncătorului pentru studiul transferului termic între gazele rezultate în urma arderii pulberii de bază și ale produselor de ardere și materialul din care este construită țeava aruncătorului;
- *Realizarea țevii* pentru aruncătorul cal.40 mm *prin turnare*, din oțel, fără prelucrare ulterioară;
- Posibilitatea *înlocuirii pulberii de azvârlire* folosite, sau modificarea compoziției acesteia prin introducerea unor aditivi, aspect ce ar conduce la modificarea fenomenului arderii, respectiv a modelului folosit pentru calculul balisticii interioare a sistemului;
- Se poate *aprofunda influența scurgerii gazelor prin mai multe ajutaje*, acestea producând perturbări și fenomene care încă nu au fost luate în considerare.

În cadrul institutelor de cercetare-proiectare, cu ajutorul metodei de simulare numerică pentru rezolvarea problemei directe a balisticii interioare pentru sistemele balistice cal. 40 x 46 mm cu două camere de presiune propusă, *se pot proiecta sisteme balistice noi*, după cum urmează:

- cu ajutorul programului GAMBIT, se pot aduce modificări ale dimensiunilor și formei:
  - elementului de pulbere echivalent;
  - elementelor interioare ale grenadei;
  - ajutajelor.

➤ cu ajutorul programului FLUENT:

- se pot introduce proprietăți noi pentru pulberea de bază;
- se poate introduce *stratul limită la peretele țevii aruncătorului*.

În acest fel, costurile și numărul probelor de laborator, uzină și poligon se reduc drastic.

Acest fapt influențează ***reducerea costurilor de fabricație, de dezvoltare industrială, testare-evaluare și introducerea în fabricație.***

## LISTA NOTAȚIILOR ȘI SIMBOLURILOR

### P1

Calibrul	$d$	[mm]
Masa aruncătorului	$m$	[kg]
Masa încărcătorului	$m_i$	[kg]
Masa loviturii	$q$	[kg]
Lungimea aruncătorului	$L$	[mm]
Lungimea țevii	$L_t$	[mm]
Lungimea părții ghintuite	$L_g$	[mm]
Lățimea	$l$	[mm]
Înălțime	$h$	[mm]
Viteza la gura țevii	$V_g$	[m/s]
Viteza medie a grenadei	$V_{med}$	[m/s]
Bătaia maximă	$X_{max}$	[m]
Bătaia eficace	$X_{ef}$	[m]
Distanța minimă de siguranță	$D_{sig}$	[m]
Cadența		[lov/min]
Presiunea în cameră	$P$	[Pa]
Raza letală	$r$	[m]

### P2

Densitatea pulberii	$\rho$	[g/cm <sup>3</sup> ]
Masa pulberii	$\omega$	[g]
Masa amorsei	$\omega_a$	[g]
Densitatea de încărcare	$\Delta$	[g/cm <sup>3</sup> ]
Porozitatea	$\phi$ ( $\phi_r$ - relativă sau $\phi_{abs}$ - absolută)	
Volumul camerei de încărcare	$W_0$	[cm <sup>3</sup> ]
Masa volumică absolută a pulberii	$\rho_{pb}$	[g/cm <sup>3</sup> ]
Densitatea gravimetrică a pulberii	$\rho_{gr}$	[g/cm <sup>3</sup> ]
Forța pulberii	$f_p$	[J/kg]
Lucrul mecanic	$L_m$	[J]
Covolumul gazelor	$\alpha$	[dm <sup>3</sup> /kg]
Constanta universală a gazelor	$R$	[J/(mol K)]
Căldura specifică medie a gazelor	$\bar{c}_v$	[J/(g K)]
Masa moleculară a gazelor de combustie	$M_p$	[g/mol]
Masa atomică	$M_i$	[g/mol]
Căldura de formare a pulberii	$Q_{f,m}$	[kcal/kg]
Căldura de explozie	$Q_e$	[kcal/kg]
Participația molară	$K_j$	
Numărul total de moli	$n$	[mol/g]
Constante de echilibru	$K_i$	
Constanta funcției de formă	$\theta$	
Funcția de formă a pulberii	$\Phi(z), S/S_0$	

Aria suprafeței elementului de pulbere	$S_p$	[cm <sup>2</sup> ]
Volumul elementului de pulbere	$V_p$	[cm <sup>3</sup> ]
Viteza liniară de combustie	$r(P)$	[cm/s]
Coeficientul vitezei de combustie	$\beta$	[(cm/s)/MPa]
Exponentul vitezei de combustie	$\alpha$	
Vivacitatea statică a pulberii	$A$	[1/(MPa s)]
Vivacitatea dinamică a pulberii	$L$	[1/(MPa s)]
Vivacitatea relativă	$V_r^*$	[1/(MPa s)]
Presiunea maximă a gazelor	$P_{max}$	[Pa], [bari]
Timpul de întârziere	$t_i$	[s]
Timpul de funcționare	$t_f$	[s]
Impulsul maxim	$I_{max}$	[N·s/mm <sup>2</sup> ]
Volumul monteculei (bombei manometrice)	$W_0$	[cm <sup>3</sup> ]
Viteza de combustie	$u$	[mm/s]
Coeficientul vitezei de combustie	$u_j$	[mm/(s·bar)]
Fracțiunea de pulbere arsă	$\Psi$	
Temperatura de explozie	$T_{exp}$	[K]
Temperatura calorimetrică	$T_{cal}$	[K]
Coeficientul de participare	$X_i$	
Energia de formare	$E_{fp}$	[J / Kg]
<b>P3</b>		
Camera de înaltă presiune	$C\hat{I}P$	
Camera de joasă presiune	$CJP$	
Masa încărcăturii	$\omega$	[Kg]
Densitatea de încărcare	$\Delta = \omega / W_{0.1}$	[g/cm <sup>3</sup> ]
Volumul camerei de înaltă presiune (CIP)	$W_{01}$	[cm <sup>3</sup> ]
Volumul camerei de joasă presiune (CJP)	$W_{02}$	[cm <sup>3</sup> ]
Densitatea pulberii	$\delta$	[g/cm <sup>3</sup> ]
Forța pulberii sau energia specifică	$f$	[J/kg]
Covolumul gazelor de pulbere	$\alpha$	[dm <sup>3</sup> /kg]
Fracțiunea de pulbere arsă	$\Psi = \omega_{ars} / \omega$	
Presiunea în camera de înalta presiune	$p_1, p_i$	[Pa]
Presiunea în camera de joasă presiune	$p_2, p_j$	[Pa]
Presiunea în camera de înaltă presiune în momentul pătrunderii gazelor în camera de joasă presiune (la momentul $t_0$ )	$p_{1'}$	[Pa]
Presiunea în camera de joasă presiune în momentul ( $t_0$ ) când grenada se desertizează de tubul cartuş	$p_{20}$	[Pa]
Indice corespunzător momentului ( $t_k$ ) la care întreaga cantitate de pulbere a ars	$k$	
Indice corespunzător momentului ( $t_g$ ) la care grenada părăsește lansatorul	$g$	
Presiunea atmosferică	$P_{jo}$	[Pa]
Masa încărcăturii de amorsare	$\omega_a$	[kg]
Densitatea încărcăturii de bază	$\delta$	[Kg/m <sup>3</sup> ]

Forța pulberii de amorsare	$f_a$	[J/kg]
Suprafața ajutorului	$A_{aj}$	[m <sup>2</sup> ]
Aria țevii	$A_v$	[m <sup>2</sup> ]
Masa grenadei	$M_p$	[kg]
Raza ajutorului	$r_{aj}$	[m]
Viteza de ardere	$u$	[m/s]
Coeficientul presiunii din legea vitezei de ardere	$u_1$	[m/(s·bar)]
Exponentul presiunii din legea vitezei de ardere	$v$	
Raza inițială a elementului de pulbere	$r_o$	[m]
Raza elementului de pulbere la un moment dat	$r$	[m]
Indice corespunzător momentului ( $t_k$ ) la care întreaga cantitate de pulbere a ars	$k$	
Fracțiunea de pulbere arsă	$\psi = \omega_{ars} / \omega$	
Fracțiunea de gaze rămase în CÎP	$\varphi$	
Fracțiunea de gaze trecute în CJP	$\psi - \varphi$	
Fracțiunea de gaze scurse în camera de joasă presiune	$\eta$	
Presiunea finală produsă de amorsă	$p_{ao}$	[Pa]
Presiunea	$p$	[Pa]
Presiunea de amorsare	$p_a$	[Pa]
Aria de ardere la un moment dat a granulei sferice de pulbere	$A$	[m <sup>2</sup> ]
Debitul gazelor produse de arderea elementului de pulbere	$Q_e$	[Kg/s]
Debitul gazelor scurse prin ajutoare	$Q_a$	[Kg/s]
Presiunea inițială în CJP	$P_{jo}$	[Pa]
Temperatura în CÎP	$T_i$	[K]
Temperatura în CJP	$T_j$	[K]
Pantele lui $\psi$ pe intervalul de integrare	$K1, K2, K3, K4$	
Media ponderată a pantelor	$K$	
Pantele lui $\varphi$ pe intervalul de integrare	$L1, L2, L3, L4$	
Media ponderată a pantelor	$L$	
Viteza grenadei	$V_{po}, V_p$	[m/s]
Spațiul parcurs de grenadă în țevă	$X_{po}, X_p$	[m]
Lucrul mecanic	$L$	[J]

**P4**

Timpu de întârziere a aprinderii	$t_{10}$	[μs]
Presiunea de spargere a căpăcelului	$P_{1s}$	[Pa]
Timpu de spargere al căpăcelului	$t_{1s}$	[μs]
Timpu de atingere a presiuni maxime în CÎP	$t_{1max}$	[μs]
Presiunea maximă în CÎP	$P_{1max}$	[Pa]
Timpu de întârziere a presurizării CJP	$t_{21}$	[μs]
Presiunea maximă în CJP	$P_{2max}$	[Pa]
Timpu de atingere a presiuni maxime în CJP	$t_{2max}$	[μs]
Viteza inițială medie a grenadei	$V_{5med}$	[m/s]
Deviația standard a vitezei inițiale	$r_v$	[m/s]



**P5**

Camera de joasă presiune	$C\hat{I}P$	
Camera de înaltă presiune	$CJP$	
Volumul camerei de înaltă presiune	$W_{01}$	[m <sup>3</sup> ]
Volumul camerei de joasă presiune	$W_{02}$	[m <sup>3</sup> ]
Presiunea atmosferică	$P_{jo}$	[Pa]
Masa încărcăturii de bază	$\omega$	[g]
Masa încărcăturii de amorsare	$\omega_a$	[g]
Densitatea încărcăturii de bază	$\delta$	[Kg/m <sup>3</sup> ]
Densitatea de încărcare	$\Delta = \omega/W_{01}$	[Kg/m <sup>3</sup> ]
Forța pulberii sau energia specifică	$f$	[J/kg]
Forța pulberii de amorsare	$f_a$	[J/kg]
Covolumul gazelor de pulbere	$\alpha$	[dm <sup>3</sup> /kg]
Suprafața ajutorajului	$A_{aj}$	[mm <sup>2</sup> ]
Aria țevii	$A_{tv}$	[mm <sup>2</sup> ]
Masa grenadei	$M_p$	[kg]
Raza ajutorajului	$r_{aj}$	[mm]
Viteza de ardere	$u$	[m/s]
Coeficientul presiunii din legea vitezei de ardere	$u_l$	[m/s·bar]
Exponentul presiunii din legea vitezei de ardere	$v$	
Raza elementului de pulbere echivalentă	$Ro$	[mm]
Indice corespunzător momentului ( $t_k$ ) la care întreaga cantitate de pulbere a ars	$k$	
Fracțiunea de pulbere arsă	$\psi = \omega_{ars}/\omega$	
Fracțiunea de gaze rămase în CÎP	$\varphi$	
Fracțiunea de gaze trecute în CJP	$\psi - \varphi$	
Fracțiunea de gaze scurse în camera de joasă presiune	$\eta$	
Presiunea finală produsă de amorsă	$p_{ao}$	[Pa]
Presiunea	$p$	[Pa]
Presiunea de amorsare	$p_a$	[Pa]
Aria de ardere la un moment dat a granulei sferice de pulbere	$A$	[mm <sup>2</sup> ]
Debitul gazelor produse de arderea elementului de pulbere	$Qe$	[m <sup>3</sup> /s]
Debitul gazelor scurse prin ajutoraje	$Qa$	[m <sup>3</sup> /s]
Presiunea în camera de înalta presiune	$p_1$	[Pa]
Presiunea în camera de joasă presiune	$p_2$	[Pa]
Viteza de scurgere a gazelor	$v$	[m/s]
Viteza inițială a grenadei/ Viteza grenadei la un moment dat	$V_{po}, V_p$	[m/s]
Spațiul parcurs de grenadă în țeavă	$X_{po}, X_p$	[mm]
Densitatea	$\rho$	[Kg/m <sup>3</sup> ]
Sursa	$S_m, S_h, S_\phi, S_v$	
Presiunea statică	$\bar{p}$	[Pa]
Tensorul stres	$\tau$	
Forța gravitațională	$\vec{\rho g}$	
Forța externă	$\vec{F}$	[N]

Vâscozitatea moleculară	$\mu$	
Tensorul unitate	$I$	
Viteza de rotație	$v_z$	[rot/s]
Volum masic	$w_1$	[cm <sup>3</sup> ]
Volumul molar al gazului	$V_m$	
Raportul căldurilor specifice	$\gamma = c_p / c_v$	
Produsul vâscozității turbulente	$G_v$	
Distrugerea cauzată de vâscozitatea turbulentă	$Y_v$	
Constante	$\sigma_v, C_{b2}$	
Vâscozitatea cinematică moleculară	$\nu$	
Conductivitatea efectivă	$k_{eff}$	
Fluxul de difuzie a speciei j	$\vec{J}_j$	
Entalpia	$h$	
Rezultanta forțelor exterioare pe suprafața grenadei	$F$	
Coeficient de masă fictivă	$\phi$	
Vectorul viteză	$\vec{v}$	
Vectorul ariei suprafeței;	$\vec{A}$	
Coeficientul de difuzie pentru $\phi$	$\Gamma_\phi$	
Gradientul lui $\phi$	$\nabla\phi$	
Valoarea lui $\phi$ care trece prin fața f	$\phi_f$	
Fluxul de masă ce trece prin fața f	$\rho_f v_f \cdot \vec{A}_f$	
Aria feței f	$\vec{A}_f$	[mm <sup>2</sup> ]
Gradientul lui $\phi$ pe fața f	$\nabla\phi_f$	[cm <sup>3</sup> ]
Coeficientul de masă fictivă	$\mu$	
Presiunea de referință	$p_{ref}$	[Pa]

# REVENDICĂRILE

## **Metodei de simulare numerică pentru rezolvarea problemei directe a balisticii interioare pentru sistemele balistice cal. 40 x 46 mm cu două camere de presiune, bazată pe metoda volumelor finite**

### **I. INTRODUCERE**

Balistica interioară a sistemelor de armament reprezintă totalitatea fenomenelor care apar și se desfășoară în țeava armelor sau în camerele de ardere a motoarelor rachetă.

Scopul general al studiilor de balistică interioară pentru un sistem definit de armament este rezolvarea problemei directe a balisticii interioare, respectiv determinarea evoluției presiunii gazelor și a mișcării proiectilului în spațiu și timp.

Combustia pulberii pe timpul tragerii cu un sistem de armament reprezintă un proces fizico-chimic complex, pe parcursul căruia are loc o transformare foarte rapidă a energiei chimice a pulberii, mai întâi în energie termică a gazelor, iar apoi în energie cinetică de mișcare a proiectilului, încărcăturii de azvârlire și țevii. Tragerea este un proces termodinamic și gazodinamic complex și rapid, aproape instantaneu. Sursa de energie utilizată sunt combustibilii chimici, sub forma de pulberi balistice, caracterizați de o mare cantitate de energie chimică.

*Balistica interioară* studiază transformarea energiei chimice a pulberii în energia mecanică (cinetică) servind la propulsarea proiectilului

La sistemele de armament cu cameră dublă de presiune există camera de ardere sau camera de înaltă presiune, în care are loc combustia pulberii la presiune ridicată (cameră prevăzută cu mai multe orificii (ajutaje) prin care se scurg gazele rezultate în urma combustiei pulberii) și camera gurii de foc sau camera de joasă presiune, în care se scurg gazele din camera de ardere, a căror presiune maximă este de câteva ori mai mică decât cea a gazelor din camera de înaltă presiune.

Studiul fenomenelor și proceselor care au loc pe timpul tragerii, respectiv pe timpul arderii pulberii și a produselor de ardere, generării și destinderii gazelor și pe timpul deplasării

proiectilului în interiorul țevii guri de foc au făcut obiectul de studiu a mai multor cercetători și oameni de știință, dintre care enumerez:

- Eduard D. Lowry - *Interior Ballistics*, Doubleday, 1968;
- *John Corner* - *Theory of Interior Ballistics of Guns*, Wiley (New York), 1950, Exemplar original de la Universitatea din Wisconsin – Madison, 443 pagini;
- *Interior ballistics of guns* - American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1979;
- *Gun propulsion technology* - American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1988;
  
- R. E. Sorkin – *Teoriia vnutrikamernykh protsessov v raketnykh sistemakh na tverdom toplive*, "Nauka," Glav. red. fiziko-matematicheskoi litry, 1983;
- Franklin Weston Mann, - *The bullet's flight from powder to target*, Riling Arms Books Co., 1965;
- Kirill Petrovich Staniukovich, - *Gazodinamicheskie osnovy vnutrennei ballistiki*, Gos. izdvo obor. promyshl., 1957;
- Forest Ray Moulton, - *New methods in exterior ballistics*, The University of Chicago Press, 1926;
- Jean Ottenheimer - *Balistique intérieure*, A. Colin, 1926;
- Pashkievitch - *Interior ballistics*, G.P.O., 1892;
- Harold Leonard Brode, James E. Enstrom - *A numerical method for calculating interior ballistics*, Rand Corp., 1970;
- M. E. Serebryakov, - *Interior ballistics*, The Catholic University of America, Air Technical Intelligence Center, 1950.

## II. STADIUL CUNOSCUT AL TEHNICII

*Rezolvarea analitică* a problemei fundamentale în maniera clasică se efectuează pe baza ecuațiilor diferențiale și algebrice ale balisticii interioare. Datorită complexității fenomenului tragerii cu un sistem de armament cu două camere de presiune, pentru calculul de balistică interioară prin metode numerice de integrare a ecuațiilor și sistemelor de ecuații diferențiale ordinare, respectiv pentru studiul variației presiunii gazelor de pulbere în cele două camere și a

vitezei grenadei în funcție de spațiul parcurs de acesta în țevă și de timp, au fost admise unele ipoteze simplificatoare:

1. *Procesele care au loc în camera de joasă presiune nu influențează arderea pulberii în camera de înaltă presiune și scurgerea gazelor prin ajutaje (orificii), dacă este îndeplinită condiția:*

$$p_2 \leq p_1 \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma + 1}},$$

unde:  $p_1$  - presiunea din camera de ardere;

$p_2$  - presiunea din camera gurii de foc;

$\gamma$  - indicele adiabatic;

2. *Pulberea are suprafața de ardere constantă;*

3. *Legea vitezei de ardere este de forma*

$$u = u_1 \cdot p,$$

unde:  $u$  - viteza de ardere;

$u_1$  - coeficientul (caracteristica) vitezei de ardere

$v$  - coeficientul exponențial al presiunii;

4. *Presiunea maximă a gazelor în cele două camere se realizează la terminarea arderii pulberii;*

5. *Curgerea gazelor prin ajutaj este permanentă și unidimensională;*

6. *Compoziția gazelor nu se schimbă, ceea ce permite ca pentru forța pulberii  $f$  și covolumul gazelor de pulbere  $\alpha$  să se considere valori constante;*

7. *Transferul de căldură între gazele de pulbere și pereții țevii se ia în considerare indirect, fie prin micșorarea forței pulberii  $f$ , fie prin mărirea indicelui adiabatic  $\theta = \gamma - 1$ ;*

8. *Transformările se consideră izoterme;*

9. *Gazele de pulbere din cele două camere se consideră în echilibru, ceea ce permite utilizarea ecuației de stare sub forma:*

$$p_1 \cdot (W_1 - \alpha) = RT$$

unde:  $p_1$  - presiunea gazelor;

$W_1$  - volumul camerei de înaltă presiune;

$R$  - constanta gazelor;

$T$  - temperatura de combustie;

10. *Aruncarea elementelor de pulbere prin ajutaj nu are loc;*

11. Lucrurile mecanice secundare sunt proporționale cu lucrul mecanic principal al mișcării de translație a proiectilului și se evaluează cu ajutorul coeficientului de masă fictivă  $\varphi$ , considerat constant;

12. Tăierea brâului forțator în ghinturile țevii se consideră instantanee, admitându-se că proiectilul nu se mișcă până când gazele de pulbere nu ating presiunea  $p_0$ , numită presiune de forțare;

13. Indicele  $\theta = \gamma - 1$  se consideră constant, deși variază odată cu temperatura gazelor de pulbere, de la o valoare mare, când temperatura gazelor este  $T_1$ , la o valoare mai mică, când temperatura este  $T_g$ ;

14. Lucrul mecanic secundar consumat pentru învingerea rezistenței aerului din țevă, lucrul mecanic consumat pentru deformarea elastică a țevii și energia termică care se pierde prin cedare de căldură și prin scăparea gazelor printre proiectil și peretele țevii se neglijează;

15. Mișcarea proiectilului în țevă se studiază până în momentul când acesta părăsește gura de foc.

Rezolvarea problemei directe a balisticii interioare pentru sistemele balistice cu două camere de presiune în maniera clasică, respectiv stabilirea variației presiunii în cele două camere și a vitezei grenadei în funcție de spațiul parcurs de aceasta în țevă și în funcție de timp, prin integrarea numerică a ecuațiilor și relațiilor care alcătuiesc modelul matematic al fenomenului tragerii cu un sistem balistic cu două camere de presiune a fost prezentată de **CORNER J.**, în lucrarea "**Theory of Interior Ballistics of Guns**", Wiley (New York), 1950.

Ulterior, au fost abordate gradual modelele și metodele teoretice, apte a fi utilizate pentru rezolvarea problemei directe a balisticii interioare a sistemelor de armament, fiecare dintre acestea abordând totuși câte un set de ipoteze simplificatoare, astfel:

- **Rezolvarea problemei fundamentale pe baza legii geometrice de ardere a pulberii:**
  - pulberea arde conform legii geometrice;
  - se renunță la ipoteza tăierii instantanee a brâului forțator în ghinturile țevii și se consideră că aceasta se produce treptat, așa cum se întâmplă în realitate.
  - coeficientul de masă fictivă  $\varphi$  nu se mai consideră constant, el calculându-se la fiecare pas de integrare în funcție de mărimile de care depinde.

- nu se mai neglijează pierderile de energie prin cedare de căldură, ele luându-se în considerare prin intermediul forței pulberii
- **Rezolvarea problemei fundamentale pe baza legii fizice de ardere a pulberii**
- se utilizează ca lege pentru arderea pulberii legea fizică în locul legii geometrice, utilizând datele experimentale obținute în urma arderii pulberii în bomba manometrică la densități de încărcare mult mai mici decât cele din gurile de foc. Pentru legea vitezei de ardere se utilizează expresia  $u = Ap^v$ , în care exponentul presiunii nu mai este constant și egal cu unu ca în cazul anterior. De această dată el este variabil și se determină ca o funcție de presiunea  $P(\tau)$  din bomba manometrică.
- se renunță la ipoteza tăierii instantanee a brâului forțator în ghinturile țevii și se consideră că aceasta se produce treptat, așa cum se întâmplă în realitate.
- coeficientul de masă fictivă  $\varphi$  nu se mai consideră constant, el calculându-se la fiecare pas de integrare în funcție de mărimile de care depinde.
- pierderile de energie prin cedare de căldură nu se mai neglijează, ele luându-se în considerare prin intermediul forței pulberii
- **Rezolvarea problemei fundamentale ca o problemă de dinamica gazelor:**
- toate elementele de pulbere (propulsant) care alcătuiesc încărcătura de azvârlire au aceleași dimensiuni și încep să ardă în același moment de timp;
- gazele provenite din arderea pulberii (propulsantului) se consideră în repaus până la începerea mișcării proiectilului, când presiunea, aceeași în toate secțiunile țevii, atinge valoarea  $P_{const.}$ ;
- gazele provenite din arderea pulberii și elementele de pulbere care nu au ars formează un amestec omogen care se mișcă cu aceeași viteză;
- legea de ardere a pulberii se exprimă cu ajutorul relației  $\psi = \chi \cdot z(1 + \lambda \cdot z + \mu \cdot z^2)$ ;
- rezistența opusă la mișcarea proiectilului în țeavă se neglijează, adică ecuația de mișcare a proiectilului are forma  $\varphi \cdot m_p \frac{dv}{dt} = s \cdot P_{pr}$ ;
- camera de încărcare nu are lărgire, adică aria secțiunii transversale a țevii este aceeași și este egală cu  $s$ ;

- reculul țevii nu se ia în considerare;
- pierderile prin transfer de căldură se neglijează.

### III. PROBLEMELE TEHNICE CE TREBUIE REZOLVATE

Admiterea ipotezelor conferă un caracter simplificator al modelului matematic stabilit pentru rezolvarea problemei directe a balisticii interioare prin metode numerice de integrare a ecuațiilor diferențiale. Introducerea fiecărei ipoteze în calcule nu face decât să genereze câte un set de erori care, în final, denaturează rezultatele, astfel:

- *utilizarea unei legi geometrice pentru viteza de ardere presupune utilizarea unei pulberi de bază cu suprafața de ardere constantă și uniformă, lucru care nu este posibil decât teoretic, aceasta realizându-se prin “blindarea suprafețelor” elementului de pulbere, lăsându-i liberă o singură suprafață de ardere;*
- *presiunea maximă a gazelor în cele două camere nu se realizează la terminarea arderii pulberii, regimul de funcționare pentru gurile de foc gazodinamice fiind specific, astfel: pulberea de bază arde în CÎP, atinge o valoare la care se rup căpăcelele. Se continuă arderea pulberii în CÎP, gazele rezultate trec în CJP, unde presiunea începe să crească, iar în CÎP se atinge presiunea maximă. După terminarea arderii pulberii se continuă scurgerea gazelor în CJP, presiunea din CÎP scade, crește cea din CJP, la un moment dat ajungându-se la un echilibru (egalarea presiunilor);*
- *transferul de căldură între gazele de pulbere și pereții țevii se va lua în considerare indirect, fie prin micșorarea forței pulberii  $f$ , fie prin mărirea indicelui adiabatic  $\theta = \gamma - 1$ . Prin simularea numerică, acesta se realizează prin intermediul conductibilității termice și transferului termic de-a lungul suprafețelor;*
- *la rezolvarea problemei directe prin metoda clasică, transformarea se consideră izotermă, la rezolvarea problemei directe prin simularea numerică transformarea se va considera izentropă.*

Astfel, pentru îmbunătățirea rezultatelor și modului de rezolvare a problemei directe a balisticii interioare pentru gurile de foc cu două camere de presiune ***am formulat o metodă de simulare numerică pentru rezolvarea problemei directe a balisticii interioare pentru sistemele balistice cal. 40 x 46 mm cu două camere de presiune, bazată pe metoda volumelor finite,***



*fundamentată pe un model fizic care ia în considerare cu acuratețe sporită proprietățile fenomenelor reale care au loc în timpul tragerilor.*

În această metodă, foarte multe dintre *ipotezele simplificatoare introduse de metodele convenționale de rezolvare a problemei directe a balisticii interioare sunt eliminate și substituite cu analize cantitative.*

Metoda de simulare numerică pentru problema directă lărgeste sfera de aplicare a balisticii interioare la spațiile cu două și trei dimensiuni.

	<i>Rezolvarea problemei directe a balisticii interioare pentru sistemele balistice cu două camere de presiune în maniera clasică</i>	<b>Model matematic</b> pentru rezolvarea problemei directe a balisticii interioare pentru sistemele balistice cu două camere de presiune prin simularea numerică în domeniul fluidelor
1	<p>Procesele care au loc în camera de joasă presiune nu influențează arderea pulberii în camera de înaltă presiune și scurgerea gazelor prin ajutaje (orificii), dacă este îndeplinită condiția: <math>p_2 \leq p_1 (2/(\gamma+1))^{\gamma/(\gamma+1)}</math>,</p> <p>unde: <math>p_1</math> - presiunea din camera de ardere;  <math>p_2</math> - presiunea din camera gurii de foc;  <math>\gamma</math> - indice adiabatic</p>	<p>Această condiție se menține și în cazul modelului matematic simplificat, respectiv fenomenele din CÎP nu sunt influențate de presiunea din CJP dacă:</p> $p_2 < p_1 \left( \frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma+1}}$
2	<i>Pulberea are suprafața de ardere constantă</i>	<b>Pulberea echivalentă se consideră de formă sferică, cu raza inițială R și respectă condițiile de echivalență stabilite anterior. Suprafața de ardere nu este constantă</b> , acest lucru putându-se realiza numai teoretic, prin "blindarea" suprafețelor elementului de pulbere, lăsându-i liberă o singură suprafață de ardere.
3	<p>Legea vitezei de ardere este geometrică, de forma: <math>u = u_1 \cdot p</math>,</p> <p>unde:  <math>u</math> - viteza de ardere;  <math>u_1</math> - coeficientul presiunii</p>	<b>Se adoptă ca lege a vitezei de ardere pentru pulberea de bază legea exponențială</b> așa cum a fost determinată în Cap.2, respectiv: $u = u_1 \cdot p^v$ ,
		<p>unde:  <math>u</math> - viteza de ardere;  <math>u_1</math> - coeficientul presiunii  <math>v</math> - exponentul presiunii</p>

4	<i>Presiunea maximă a gazelor în cele două camere se realizează la terminarea arderii pulberii</i>	<i>Pulberea de bază arde în CÎP, atinge o valoare la care se rup căpăcelele. Se continuă arderea pulberii în CÎP, gazele rezultate trec în CJP, unde presiunea începe să crească, iar în CÎP se atinge presiunea maximă. După terminarea arderii pulberii se continuă scurgerea gazelor în CJP, presiunea din CÎP scade, crește cea din CJP, la un moment dat ajungându-se la un echilibru (egalarea presiunilor)</i>
5	<i>Curgerea gazelor prin ajutoraj este permanentă și unidimensională</i>	<i>Curgerea gazelor prin ajutoraj nu este permanentă și unidimensională</i>
6	<i>Compoziția gazelor nu se schimbă</i>	<i>Compoziția gazelor nu se schimbă</i>
7	<i>Transferul de căldură între gazele de pulbere și pereții țevii se ia în considerare indirect, fie prin micșorarea forței pulberii f, fie prin mărirea indicelui adiabatic <math>\beta = \gamma - 1</math></i>	<i>La simulările în FLUENT a fost introdus și transferul termic</i>
8	<i>Transformarea se consideră izotermă</i>	<i>Transformările se consideră izoterme doar până la terminarea arderii pulberii de bază, urmând apoi destinderea adiabatică a gazelor</i>
9	<i>Gazele de pulbere din cele două camere se consideră în echilibru, ceea ce permite utilizarea ecuației de stare sub forma: <math display="block">p_1 \cdot (W_1 - \alpha) = RT</math>unde: <math>p_1</math> – presiunea gazelor; <math>W_1</math> – volumul camerei de înaltă presiune; <math>R</math> – constanta gazelor; <math>T</math> – temperatura de combustie</i>	<i>Produsele de ardere ale pulberii se consideră în echilibru</i>
10	<i>Aruncarea elementelor de pulbere prin ajutoraj nu are loc</i>	<i>Pulberea arde integral în CÎP</i>

Metoda se bazează pe metode ce folosesc tehnici de volume finite, aplicabile în domeniul mecanicii fluidelor. Metoda de simulare se rezolvă axial simetric și tridimensional (3D).

Modelul matematic al metodei de simulare propusă constă scrierea și rezolvarea ecuațiilor fundamentale ale mecanicii fluidelor, respectiv ecuațiile programului FLUENT de mecanica fluidelor compresibile.

Astfel, în reprezentare scalară, avem **6 ecuații fundamentale ale mecanicii** fluidelor (*ecuația de conservare a masei, a impulsului pe cele 3 direcții, a energiei și ecuația de stare a gazelor - ecuația van der Waals*).

La aceste ecuații, suplimentar, se atașează și **două ecuații specifice balisticii interioare** (*legea vitezei de ardere a pulberii pentru pulberea folosită sau pulberea echivalentă - ecuația de combustie și legea de mișcare a grenadei*), fiind introduse toate ecuațiile care descriu fenomenul, în complexitatea lui.

Ca necunoscute avem  $\rho, V_x, V_y, V_z, p, T, u, s$ .

Condiții inițiale:  $v = 0$ ;

Condiții la limită: ca **domeniu de lucru** se adoptă **fluidul**, în varianta unui fluid **compresibil**, la care se aplică **proprietățile gazului real**. Acesta este **delimitat de o frontieră**, respectiv de **pereții camerelor** de înaltă și joasă presiune, de **țeava aruncătorului** de grenade și **grenada** propriu-zisă.

Avându-se în vedere că **programul FLUENT permite introducerea tuturor proprietăților produselor de ardere** (gaze și elemente de pulbere), **se vor utiliza datele obținute din calcul termodinamic al pulberii P-60**, respectiv **se vor introduce caracteristicile și proprietăților în funcție de timp**. La modelul matematic se atașează proprietățile materialelor, se introduc noțiunile de solid, de fluid compresibil, de vâscozitate, de transfer termic, produsele de ardere sunt gaze etc.

Ca domeniu de lucru **se adoptă fluidul**, în varianta unui fluid **compresibil**, la care **se aplică proprietățile gazului real**. Acesta este delimitat de o frontieră, respectiv de pereții camerelor de înaltă și joasă presiune, de țeava aruncătorului de grenade și grenada propriu-zisă.

**Pentru rezolvarea ecuațiilor liniare** din modelul matematic propus **se folosește un model discretizat**, realizându-se **discretizarea ecuațiilor prin calculul valorilor acestora pe un volum de control, respectiv în celule, pe cele trei direcții**.

La o iterație, se calculează densitatea, a cărei valoare se introduce în iterația următoare pentru calculul celorlalte necunoscute.

**Sistemul de ecuații** definit anterior **este supus unor transformări de discretizare**, unde **câmpurile continue sunt înlocuite cu câmpuri discrete de valori definite în centrele volumelor de control**.

**Baza metodelor utilizate în programul FLUENT este reprezentată de tehnicile de calcul cu volume finite (de control).** Această tehnică **presupune divizarea domeniului ocupat de fluid în subdomenii de formă simplă**, figuri sau corpuri geometrice elementare (pentru problemele în 2D, triunghiuri, patrulatere iar pentru problemele în 3D, tetraedre, prisme, hexaedre).

Acuratețea soluțiilor este condiționată de **rețeaua de discretizare**. O rețea rafinată conduce la o **precizie de calcul superioară**, în schimb implică un **efort de calcul mai mare**. De asemenea, pe rețeaua de discretizare se pot introduce traductori și prize virtuale pentru extragerea datelor care prezintă interes.

Avantajele utilizării modelului matematic propus:

- posibilitatea introducerii unor noi parametri în calculul necunoscutelor (ex.: vâscozitatea, transferul termic la perete, forța de rezistență la înaintarea grenadei în țevă, frecarea în ghinturi etc.);
- introducerea proprietăților materialelor și ale fluidului utilizat;
- eliminarea ipotezelor simplificatoare utilizate la modelul matematic prin integrarea ecuațiilor și sistemelor de ecuații diferențiale (clasic).

Din aceste considerente, stabilirea metodei, respectiv stabilirea ecuațiilor utilizate, a condițiilor de lucru, a materialelor folosite și a proprietăților acestora trebuie făcută cu foarte mare atenție.

Aplicația a fost realizată în **programul FLUENT**, care utilizează o tehnică de control bazată pe volume pentru a converti o ecuație generală de transport a scalarilor la o ecuație algebrică care poate fi rezolvată numeric. Această tehnică a volumelor de control constă din integrarea ecuației de transport în fiecare volum de control, rezultând o ecuație discretă care exprimă legea de conservare pe un volum de control de bază.

FLUENT este un program de calcul destinat modelării mișcării fluidelor și transformării acestora în geometrii complexe. Programul furnizează o flexibilitate completă a rețelei de volume finite (meșei), incluzând și capacitatea de a rezolva problemele curgerii folosind rețele nestructurate, care pot fi generate cu ușurință în geometrii complexe. Tipul de meșe suportate include meșe 2D triunghiulare, patrulatere, 3D tetraedrale/hexaedrale/piramidale/poliedrale și meșe hibride. FLUENT permite deasemenea “șlefuirea” sau „înăsprirea” meșei pe baza soluțiilor curgerii.

Programul FLUENT este scris în limbajul "C" și utilizează la maxim flexibilitatea și puterea limbajului. Acest lucru face ca memoria dinamică alocată, structura de date și controlul flexibil al solverului să fie utilizate cu eficiență. În plus, FLUENT utilizează o arhitectură client-server, care îi permite să ruleze în mod separat procese simultane pe unitatea de calcul. Această arhitectură permite o execuție eficientă, un control interactiv și o flexibilitate completă între diferite tipuri de mașini și sisteme de operare.

Programul FLUENT este cel mai mare furnizor din lume de servicii și software pentru calculul dinamicii fluidelor. Programul oferă soluții de uz general pentru o întreagă gamă de aplicații industriale, cu un nivel înalt de automatizare, în special module dedicate. Programul oferă, de asemenea, servicii de consultanță în domeniul calculului dinamicii fluidelor la nivel mondial.

Utilizarea programului FLUENT, prezintă **următoarele avantaje:**

- abordarea problemei curgerii fluidului în sistemele de armament cu două camere de presiune, în trei dimensiuni, ca problemă axialsimetrică, luând în considerare deplasările gazului pe trei direcții;
- introducerea proprietăților produselor de ardere ca funcții de temperatura (căldura specifică, conductivitatea, vâscozitatea moleculară);
- asigurarea acurateții calculului, superior altor metode ca urmare a posibilității introducerii stratului limită atașat pereților ce separă fluidul de mediul exterior;
- analiza locală în orice punct al domeniului ocupat de produsele de ardere;

Soluțiile obținute prin simulări numerice cu ajutorul programului FLUENT se apropie exponențial de cele reale sau de rezultatele determinărilor experimentale.

**Arderea pulberii** este procesul de propagare a reacției arderii în grosimea elementelor de pulbere, pe o direcție normală la suprafața elementelor de pulbere.

Viteza de ardere depinde de presiunea gazelor care înconjoară pulberea, de natura pulberii, de temperatura pulberii și de viteza de scurgere de-a lungul suprafeței pulberii.

Se poate considera că pulberea arde în straturi paralele sau concentrice. Această proprietate permite să se stabilească o lege în ceea ce privește afluența de gaze pe timpul arderii, adică cu alte cuvinte, să se regleze fenomenul tragerii între anumite limite.

Un aspect de noutate l-a constituit aplicarea metodei de simulare numerică **pentru interpretarea rezultatelor experimentale la tragerile cu bomba manometrică.**

Pentru determinarea legii vitezei de ardere, respectiv pentru simularea în bomba manometrică, se va realiza eliminarea amorsei din bomba manometrică, considerându-se că pulberea de bază se autoaprinde, eliminându-se influența amorsorului.

Simulările numerice în FLUENT au ca scop calibrarea pulberii echivalente, respectiv determinarea caracteristicilor elementului echivalent de pulbere, în vederea ridicării curbelor de presiune ale pulberii reale după alura celor obținute la tragerile experimentale prin metoda aproximațiilor succesive.

Parametrii ajustați ai pulberii echivalente sunt:

- coeficientul vitezei de ardere;
- exponentul presiunii;
- temperatura de combustie a produselor de ardere ale pulberii de bază.

Se urmărește realizarea prin simulare a presiunii maxime, duratei de ardere și a temperaturii maxime.

**Pulberea reală** conține un număr mare de elemente cu forme, uneori mai simple, alteori mai complicate. Modelarea fluidului în vecinătatea elementelor reale de pulbere este foarte dificilă și implică o rețea foarte fină de elemente finite, care ar atrage după sine un efort de calcul considerabil.

Depășirea acestei dificultăți este posibilă prin înlocuirea pulberii reale cu o pulbere echivalentă, fără ca regimul de funcționare a gurii de foc să fie afectat. Pulberea echivalentă poate avea un număr redus de elemente cu forma și dimensiunile diferite de elementele pulberii reale.

Se formulează următoarele condiții de echivalență între pulberea echivalentă și cea reală:

1. Compoziția chimică a pulberii echivalente nu diferă de compoziția chimică a pulberii reale;
2. Cantitatea de pulbere se păstrează, respectiv masele celor două pulberi sunt egale;
3. Densitatea pulberii este aceeași;
4. Produsele de ardere sunt generate în timp cu același debit;
5. Legea exponențială de ardere își păstrează forma, dar valoarea coeficientului presiunii  $u_f$  se modifică în funcție de forma și dimensiunile elementelor de pulbere.

Pentru cazul în care pulberea echivalentă păstrează forma pulberii reale, coeficientul vitezei de ardere se modifică învers proporțional cu dimensiunea de referință a elementului de pulbere reală.

Dacă se modifică și forma elementului de pulbere, coeficientul vitezei de ardere devine o funcție de dimensiunea caracteristică și de fracțiunea de pulbere arsă  $\psi$ , deoarece schimbarea formei nu menține similitudinea suprafețelor de ardere.

Fiecare situație particulară se tratează pe baza legii geometrice de ardere.

**Legea de ardere pentru pulberea echivalentă** se stabilește folosind diagrama pulberilor ridicată în bomba manometrică pentru pulberea reală, din care, prin eliminarea efectului amorsei se obține o curbă la care la care alura corespunde arderii pulberii reale cu inițiere prin autoaprindere. Pulberea echivalentă se consideră de formă sferică, cu raza inițială R și respectă condițiile de echivalență stabilite anterior.

De asemenea, avându-se în vedere că rezultatele de la tragerile experimentale au fost obținute în condiții reale, la simulările în FLUENT a fost introdus și **transferul termic**. Astfel, peretele bombei a fost declarat ca oțel și au fost introduse proprietățile acestuia, respectiv conductivitatea termică și căldura specifică la presiune constantă.

T [K]	273,15	373,15	473,15	573,15	673,15	873,15	1173,15
$\lambda$ [W/m·K]	59,313	52,335	52,335	46,520	44,194	37,216	33,727

T [K]	273,15	293,15	373,15	673,15	1073,15	1473,15
$C_p$ [J/Kg·K]	465	477	519	628	850	917

Avându-se în vedere că programul FLUENT **permite introducerea tuturor proprietăților** produselor de ardere (gaze și elemente de pulbere), se vor utiliza datele obținute din *calcul termodinamic al pulberii P-60*, respectiv se vor introduce caracteristicile și proprietăților în funcție de timp:

T [K]	500	1000	1500	2000	2500	3000
$C_p$ [J/Kg·K]	1336,53	1500,558	1613,135	1692,401	1740,696	1773,952
$\mu$ [Kg/m·s]	$2,475 \cdot 10^{-5}$	$4,0913 \cdot 10^{-5}$	$5,3736 \cdot 10^{-5}$	$6,5393 \cdot 10^{-5}$	$7,574 \cdot 10^{-5}$	$8,5393 \cdot 10^{-5}$
R [J/Kg·K]	346,43	346,43	346,43	346,43	346,43	346,43
$\lambda$ [W/m·K]	0,0438	0,0791	0,1099	0,1389	0,1646	0,1885
k	1,349894	1,300166	1,273489	1,257383	1,248468	1,242679
a [m/s]	483,55	671,13	813,49	933,38	1039,84	1136,44

La prima simulare s-a folosit ca dată de intrare temperatura teoretică de ardere (2300 K), obținută la calculul termochimic al pulberii P-60. Ajustările parametrilor s-au făcut proporțional cu abaterile, până la până la atingerea unei limite de convergență de 2%.

De asemenea, la analiza tragerilor în bomba manometrică, datorită duratelor scurte de ardere (max. 1,8 ms), s-a neglijat pierderea de energie prin transfer termic pe durata arderii.

Pentru stabilirea coeficienților din legea de ardere se va face **calibrarea pulberii echivalente**, respectiv se vor simula trageri într-o bombă manometrică pentru a obține rezultatele obținute la tragerile experimentale.

**Validarea rezultatelor** se va efectua prin simularea tragerilor în celelalte două bombe manometrice.

La simulările executate în FLUENT se introduce o **corecție (omogenizare) a temperaturii** de ardere cu 1 ‰, avându-se în vedere că la arderea reală a pulberii sferice, elementele de pulbere tind să se împrăștie, astfel încât temperatura este omogenă în toată camera de înaltă presiune, față de elementul echivalent, unde gazele curg "liniștit" în vecinătatea acestuia.

Se face mențiunea că alegerea formei legii vitezei de ardere a fost decisă de faptul că suprapunerea și coincidența curbelor de presiune a fost obținută prin folosirea formei exponențiale a acesteia.

De asemenea, coeficientul vitezei de ardere și exponentul presiunii pot lua perechi de valori diferite, în funcție de domeniul presiunii maxime determinată în urma tragerilor experimentale și de alura curbelor. Astfel, pentru a ridica panta curbelor de presiune se adoptă valori mai mici pentru exponentul presiunii și valori mai mari pentru coeficientul vitezei de ardere, respectiv pentru a coborî se adoptă valori mai mari pentru exponent și valori mai mici pentru coeficient.

Din ecuația **bilanțului energetic pe timpul tragerii**, rezultă faptul că diferența de energie a gazelor pulberii în cele două stări termice ale acestora ( $T$  și  $T_1$ ) este egală cu totalul lucrurilor mecanice exterioare executate de gaze.

Lucrurile mecanice secundare sunt evaluate cu ajutorul coeficientului  $\phi$ , denumit **coeficient de evaluare a lucrurilor mecanice secundare**.

Sistemele de armament cu două camere de presiune, fiind sisteme neconvenționale, nu există date despre modul de calcul al coeficientului de masă fictivă la frecarea între grenadă și țeava aruncătorului (aluminiu – aluminiu). Ca urmare, datele obținute în aplicație se vor corela cu rezultatele obținute la tragerile experimentale.

Astfel, se va adopta pentru coeficientul de masă fictivă valoarea de  $\mu = 1,15$ , pierderile termice fiind luate separat în calcul prin transferul termic.



Prin introducerea transferului termic, s-a declarat materialul țevii ca aluminiu, programul FLUENT atribuindu-i proprietățile și caracteristicile materialului și efectuând transferul termic la frecarea dintre grenadă și țevă, pe timpul deplasării grenadei.

Cu ajutorul metodei de simulare numerică pentru rezolvarea problemei directe a balisticii interioare pentru sistemele balistice cal. 40 x 46 mm cu două camere de presiune propusă, **se pot proiecta sisteme balistice noi**. Se pot aduce modificări ale dimensiunilor și formei elementului de pulbere echivalent, a elementelor interioare ale grenadei, ale ajutorajelor. De asemenea, se pot introduce proprietăți noi pentru pulberea de bază și se poate introduce *stratul limită la peretele țevii* aruncătorului. În acest fel, costurile și numărul probelor de laborator, uzină și poligon se reduc drastic.

Acest fapt influențează **reducerea costurilor de fabricație, de dezvoltare industrială, testare-evaluare și introducerea în fabricație.**

#### IV. REVENDICĂRI

**1. Metodă de simulare numerică pentru rezolvarea problemei directe a balisticii interioare pentru sistemele balistice cal. 40 x 46 mm cu două camere de presiune, bazată pe metoda volumelor finite** caracterizată prin faptul că, în reprezentare scalară, conține **6 ecuații fundamentale ale mecanicii** fluidelor (*ecuația de conservare a masei, a impulsului pe cele 3 direcții, a energiei și ecuația de stare a gazelor - ecuația van der Waals*). La aceste ecuații, suplimentar, se atașează și **două ecuații specifice balisticii interioare** (*legea vitezei de ardere a pulberii pentru pulberea folosită sau pulberea echivalentă - ecuația de combustie și legea de mișcare a grenadei*), fiind introduse toate ecuațiile care descriu fenomenul, în complexitatea lui:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v}) = S_m \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho \cdot \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot \left( k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v}) \right) + S_h \\ p \cdot (w_1 - \alpha) = R \cdot T \\ u = u_1 \cdot p^v \\ F = p \cdot s = \varphi \cdot m \frac{dv}{dt} = \varphi \cdot m \cdot v \frac{dv}{dl} \end{array} \right.$$

Ca necunoscute avem  $\rho, V_x, V_y, V_z, p, T, u, s$ .

Condiții inițiale:  $v = 0$ ;

Condiții la limită: ca *domeniu de lucru* se adoptă *fluidul*, în varianta unui fluid *compresibil*, la care se aplică *proprietățile gazului real*. Acesta este *delimitat de o frontieră*, respectiv de *peretele camerelor* de înaltă și joasă presiune, de *țeava aruncătorului* de grenade și *grenada* propriuzisă;

2. Metodă de simulare numerică, conform revendicării 1, **caracterizată prin aceea că sistemul de ecuații** definit anterior *este supus unor transformări de discretizare*, unde *câmpurile continue sunt înlocuite cu câmpuri discrete de valori definite în centrele volumelor de control*.

3. Metodă de simulare numerică, conform revendicării 1, **caracterizată prin aceea că elimină ipotezele simplificatoare introduse de metodele convenționale de rezolvare a problemei directe a balisticii interioare, substituindu-le cu analize cantitative, astfel:**

a) Pulberea de bază se consideră *sferică, puternic degresivă* și ca atare nu mai are suprafața de ardere constantă;

b) Se adoptă ca lege a vitezei de ardere *legea exponențială*;

c) Pulberea de bază arde în CÎP, atingând o valoare la care se deschid ajutajele. Se continuă arderea pulberii în CÎP, gazele rezultate trec în CJP, unde presiunea începe să crească, iar în CÎP se atinge presiunea maximă. După terminarea arderii pulberii se continuă scurgerea gazelor în CJP, presiunea din CÎP scade, crește cea din CJP, la un moment dat ajungându-se la un echilibru (*egalarea presiunilor*);

d) De transferul de căldură de la gazele de pulbere la monteculă, pereții tubului cartuș și țeavă (transferul termic) se ține cont prin *diminuarea forței pulberii  $f$* ;

e) Transformările se consideră izoterme doar până la terminarea arderii pulberii de bază, urmând apoi *destinderea adiabatică a gazelor*.

4. Metodă de simulare numerică, conform revendicării 1, **caracterizată prin aceea că lărgeste sfera de aplicare a balisticii interioare la spațiile cu două și trei dimensiuni, rezolvându-se axial simetric și tridimensional (3D)**;

5. Metodă de simulare numerică, conform revendicării 1, **caracterizată prin aceea că permite introducerea tuturor proprietăților produselor de ardere** (gaze și elemente de pulbere), și la care *se utilizează datele obținute din calcul termodinamic al pulberii P-60*, respectiv sunt *introduse caracteristicile și proprietățile în funcție de timp*;

**6. Metodă de simulare numerică**, conform revendicării 1, **caracterizată prin aceea că se atașează proprietățile materialelor, se introduc noțiunile de solid, de fluid compresibil, de vâscozitate, de transfer termic, produsele de ardere sunt gaze;**

**7. Metodă de simulare numerică**, conform revendicării 1, **caracterizată prin aceea că permite introducerea transferului termic**, declarându-se materialul țevii ca aluminiu, programul FLUENT atribuindu-i proprietățile și caracteristicile materialului și efectuând transferul termic la frecarea dintre grenadă și țevă, pe timpul deplasării grenadei.

# DESENE

## la care se face referire în Descrierea invenției

Fig. 1 – Organizarea de principiu a unui sistem de armament cu două camere de presiune

I – Camera de înaltă presiune (camera de ardere)

II – Camera de joasă presiune (camera gurii de foc)

1. Tub cartuș; 2. Surub port amorsă; 3. Montecula; 4. Căpăcel cupru; 5. Corpul grenadei; 6. Țeava aruncătorului

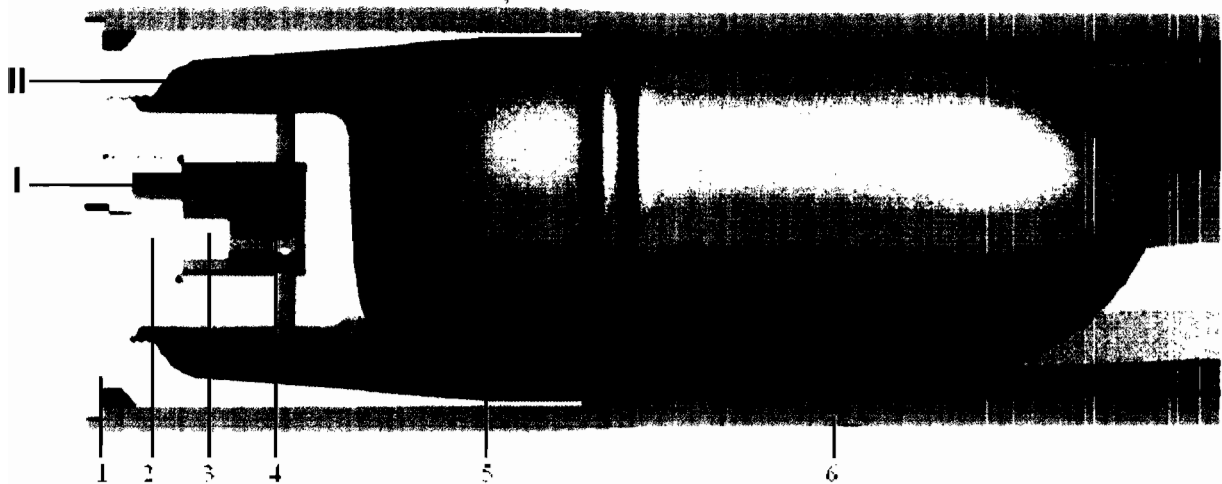
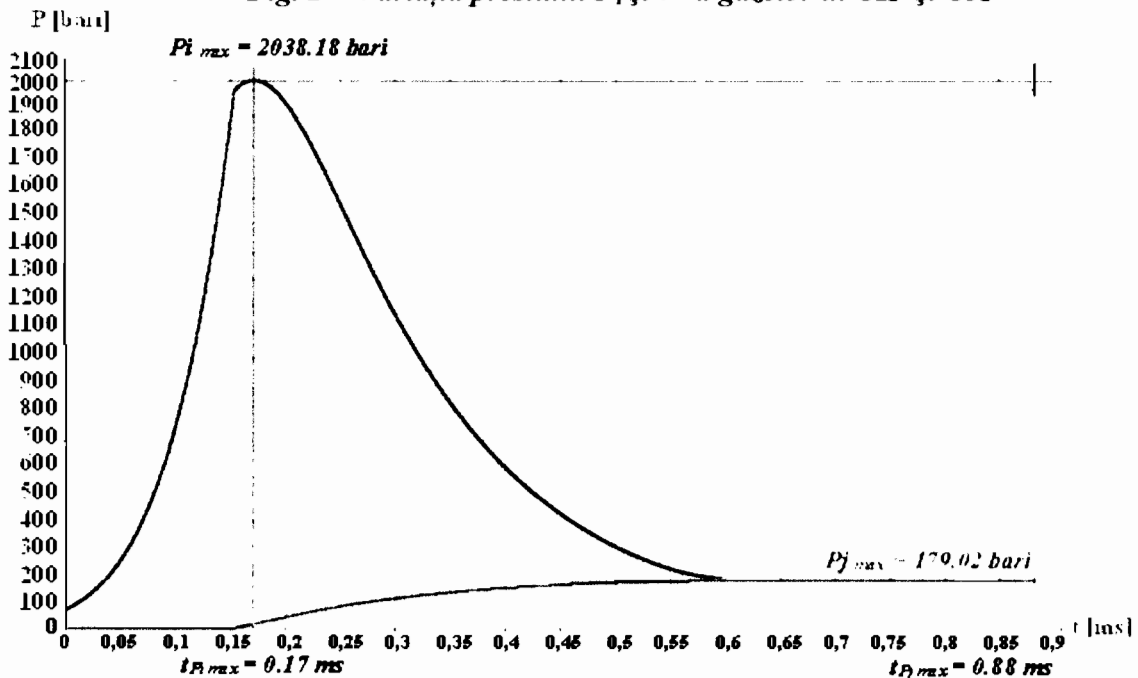
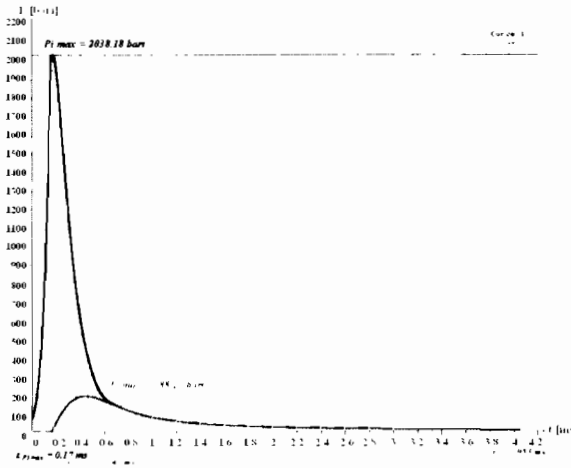


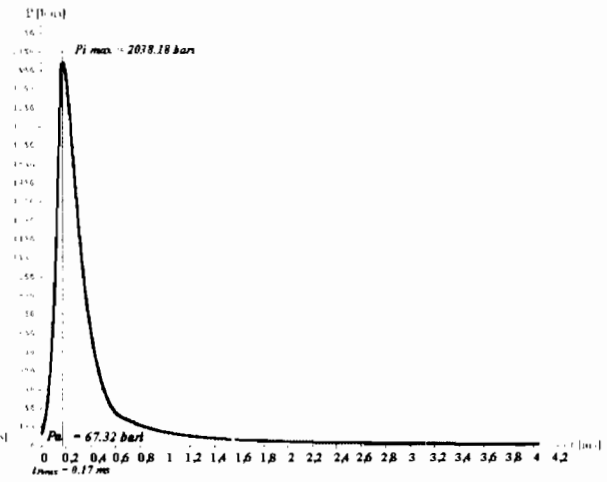
Fig. 2 – Variația presiunii  $P_1$  și  $P_2$  a gazelor în CÎP și CJP



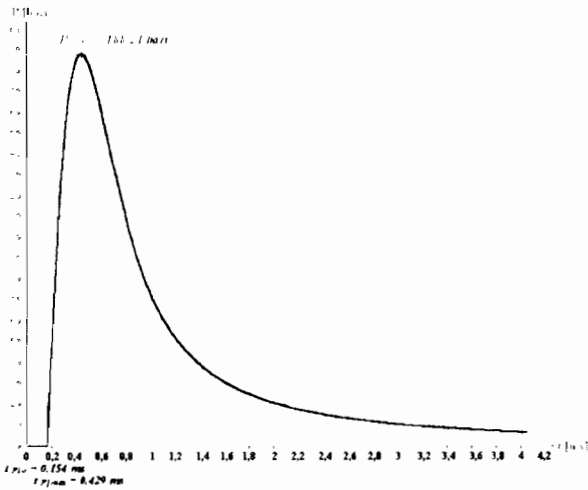
**Fig. 3 - Variația presiunii  $P_i$  și  $P_j$  a gazelor în CÎP și CJP**



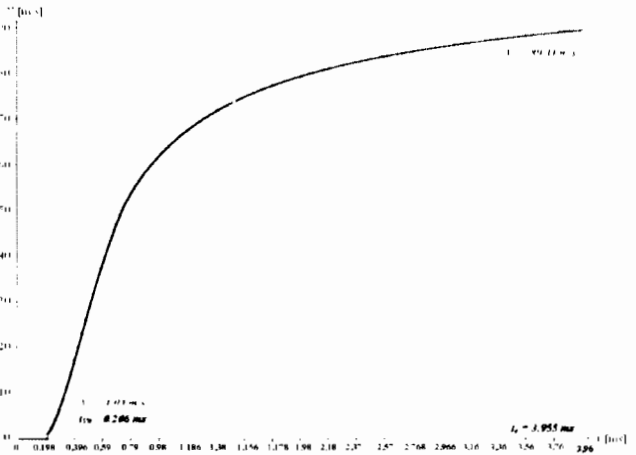
**Fig. 4 - Variația presiunii  $P_i$  a gazelor în CÎP**



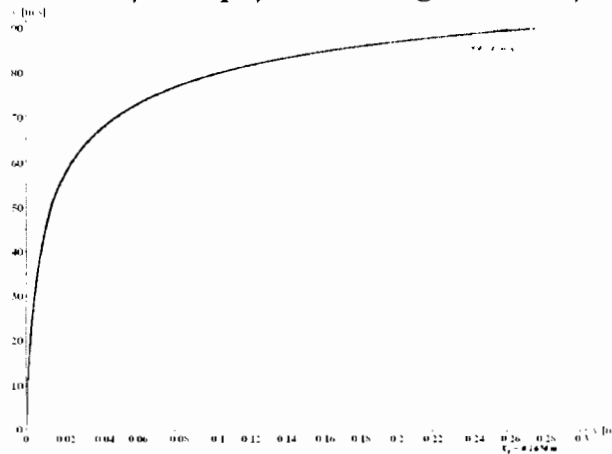
**Fig. 5 - Variația presiunii  $P_j$  a gazelor în CJP**



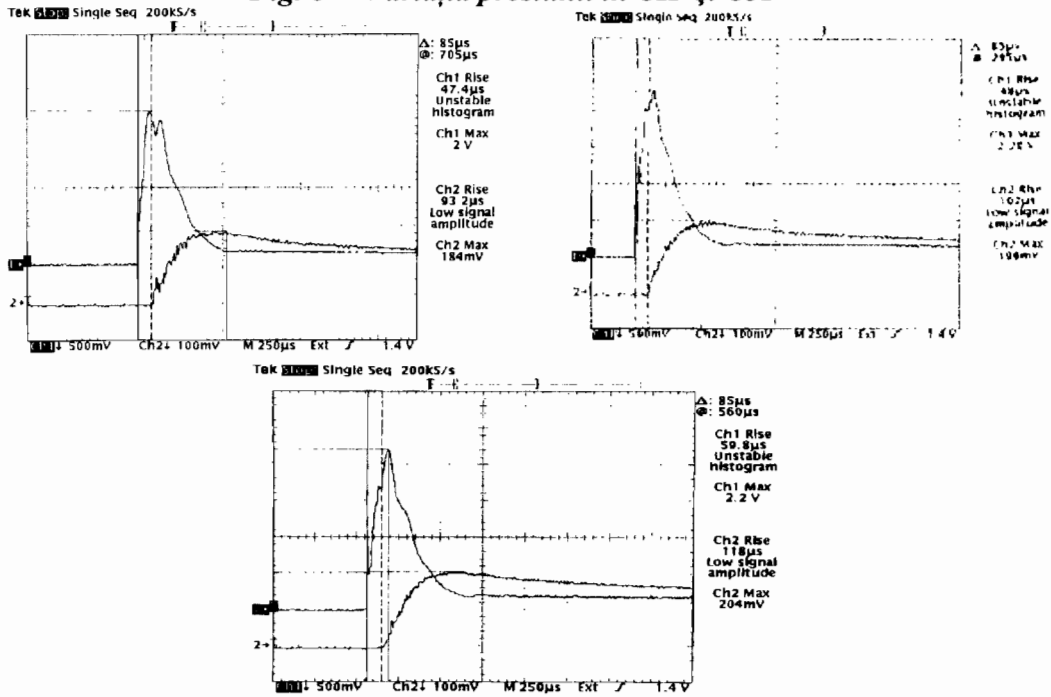
**Fig. 6 - Variația cu timpul a vitezei grenadei în țevă,  $V$**



**Fig. 7 - Variația cu spațiul a vitezei grenadei în țevă,  $V$**



**Fig. 8 – Variația presiunii în CÎP și CJP**



**Fig. 9 – Variația presiunii gazelor în CÎP și CJP, Tragerea 1 – 2003**

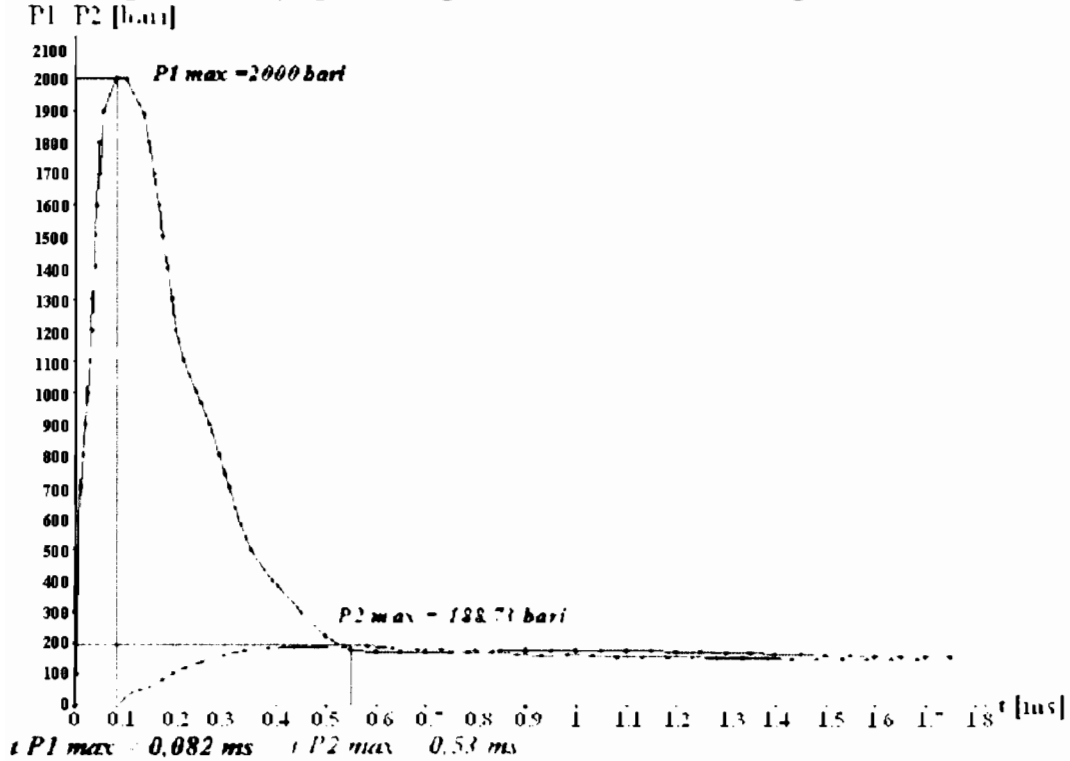


Fig. 10 – Variația presiunii gazelor în CÎP și CJP, Tragerea 2 – 2003

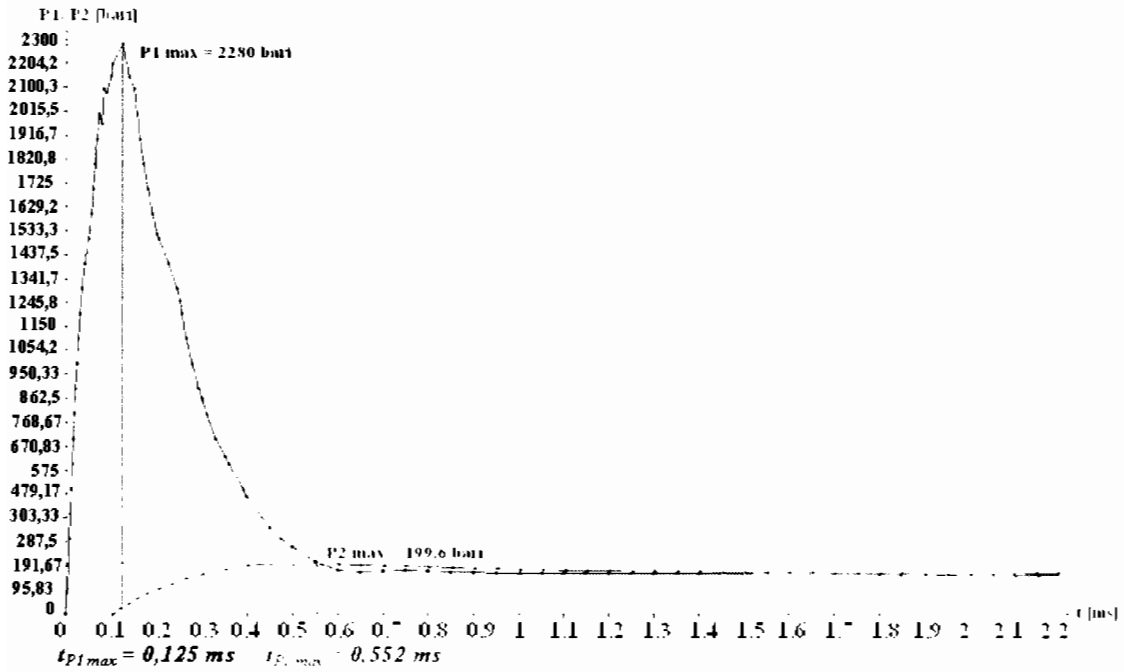


Fig. 11 – Variația presiunii gazelor în CÎP și CJP, Tragerea 3 – 2003

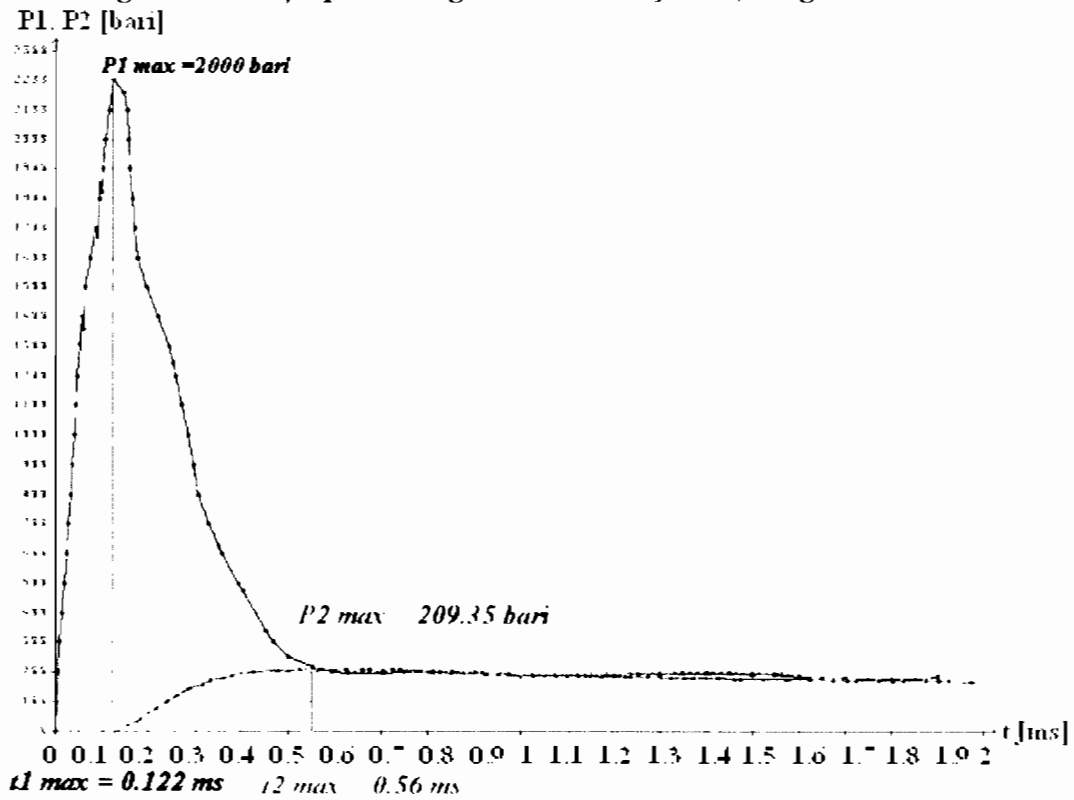
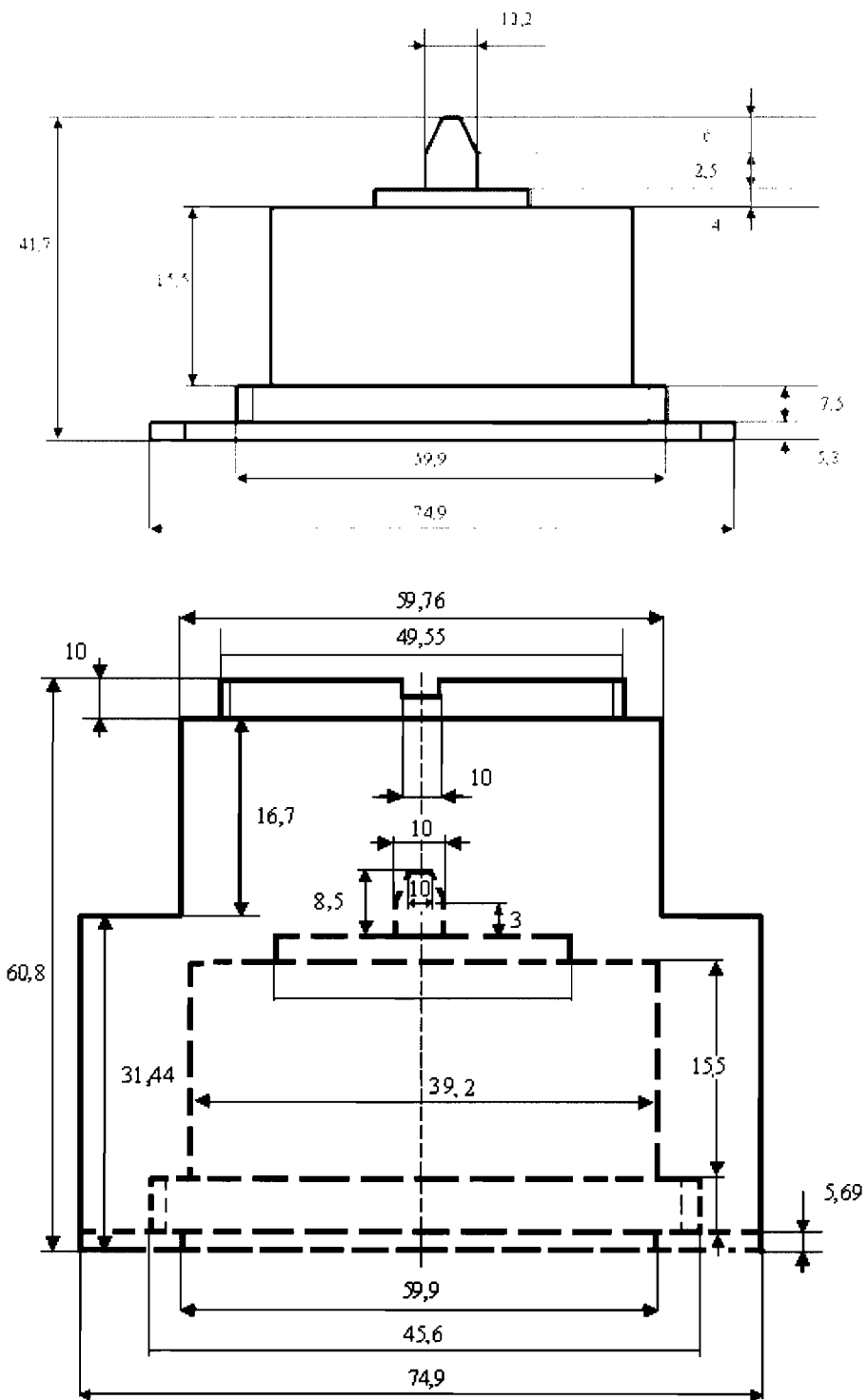


Fig.12 – Dimensiuni relevante ale Sistemului de testare statică





**Fig.13 – Discretizarea modelului desenat în GAMBIT pentru Sistemul de testare statică**

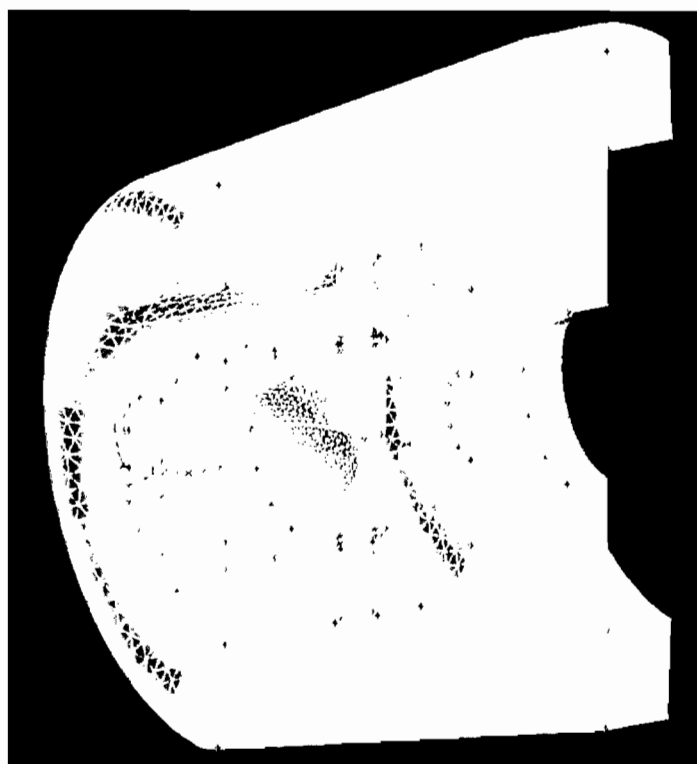
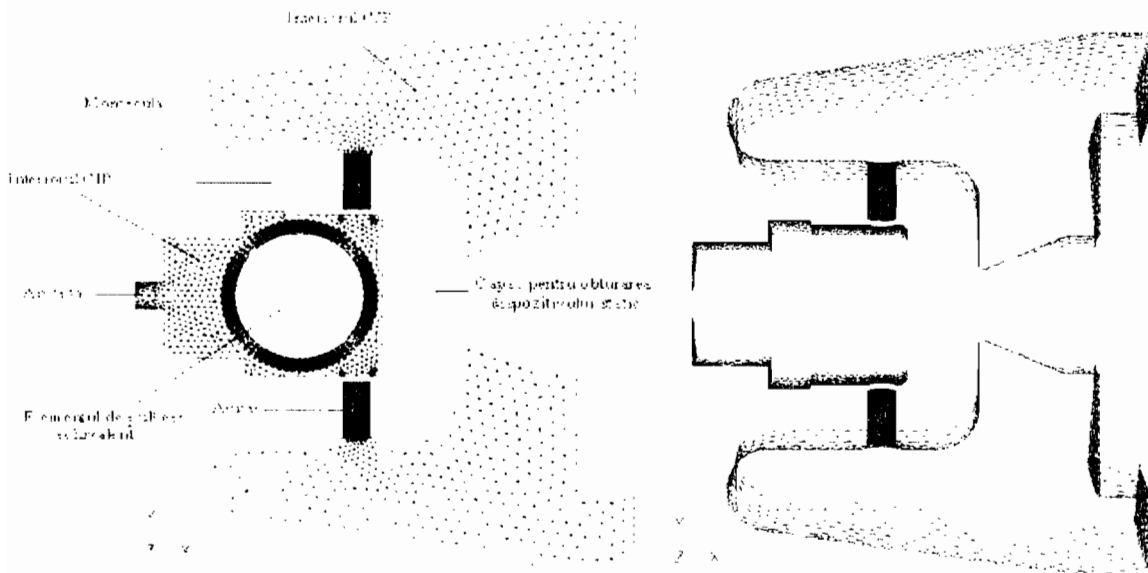


Fig. 14 - Variația presiunii  $P_1$  și  $P_2$  a gazelor, mediate

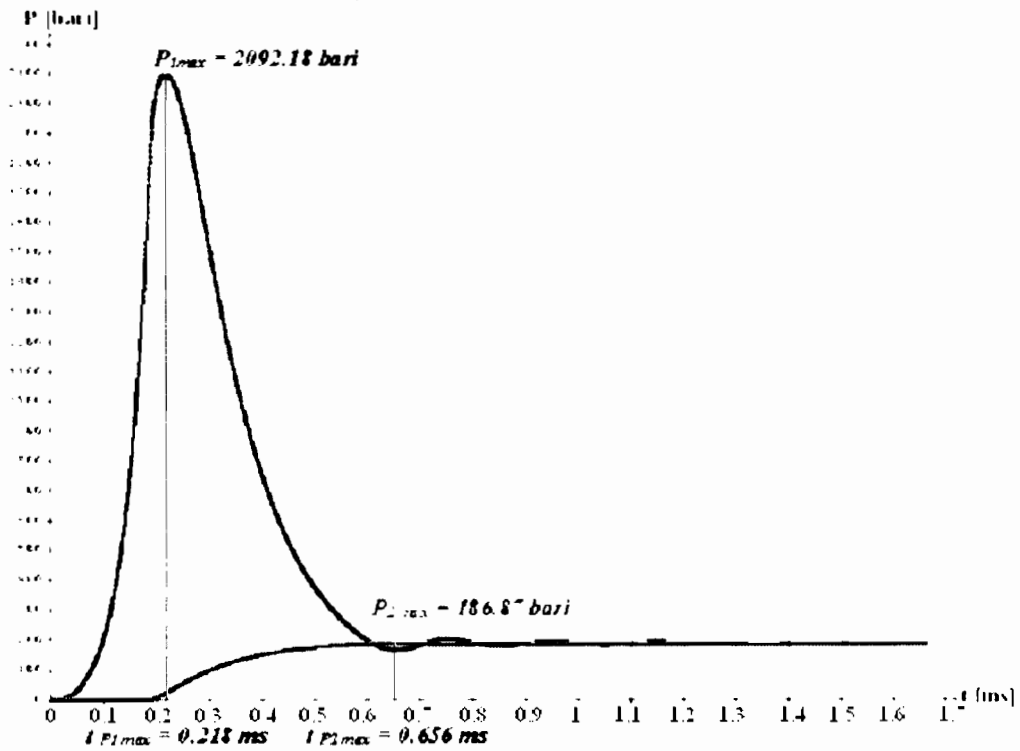
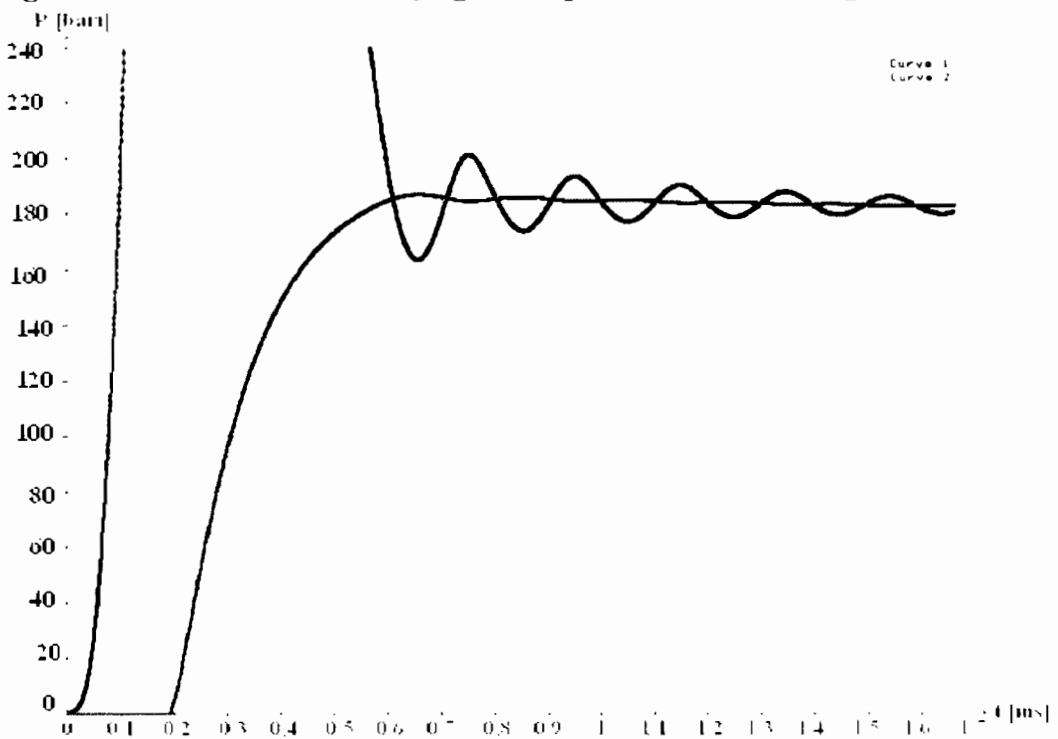
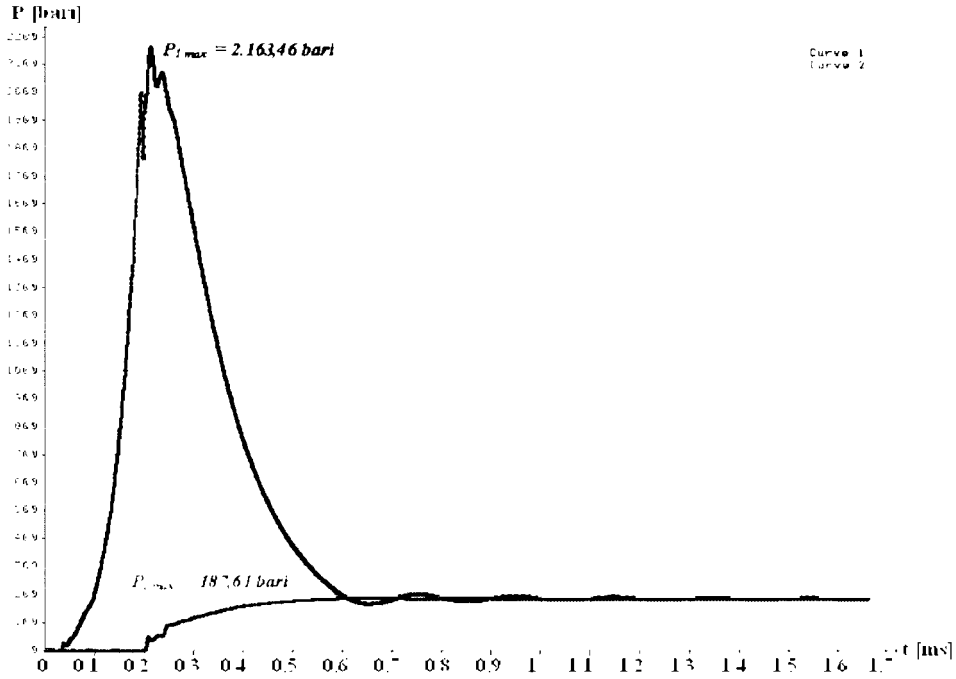


Fig. 15 - Detaliu de amortizare și egalare a presiunilor  $P_1$  și  $P_2$  a gazelor, mediate



**Fig. 16 - Variația  $P_1$  și  $P_2$  a gazelor măsurate cu traductori piezoelectrice fictivi**



**Fig. 17 - Detaliu de amortizare și egalare a presiunilor  $P_1$  și  $P_2$  a gaze lor – “ciocuri” de presiune, citite cu traductorii fictivi**

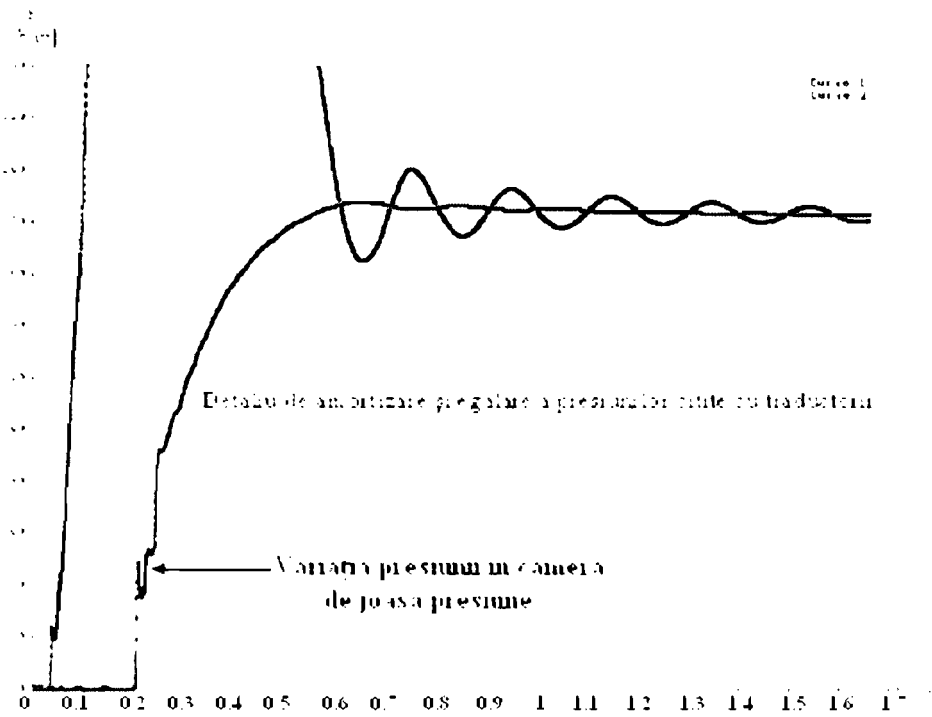
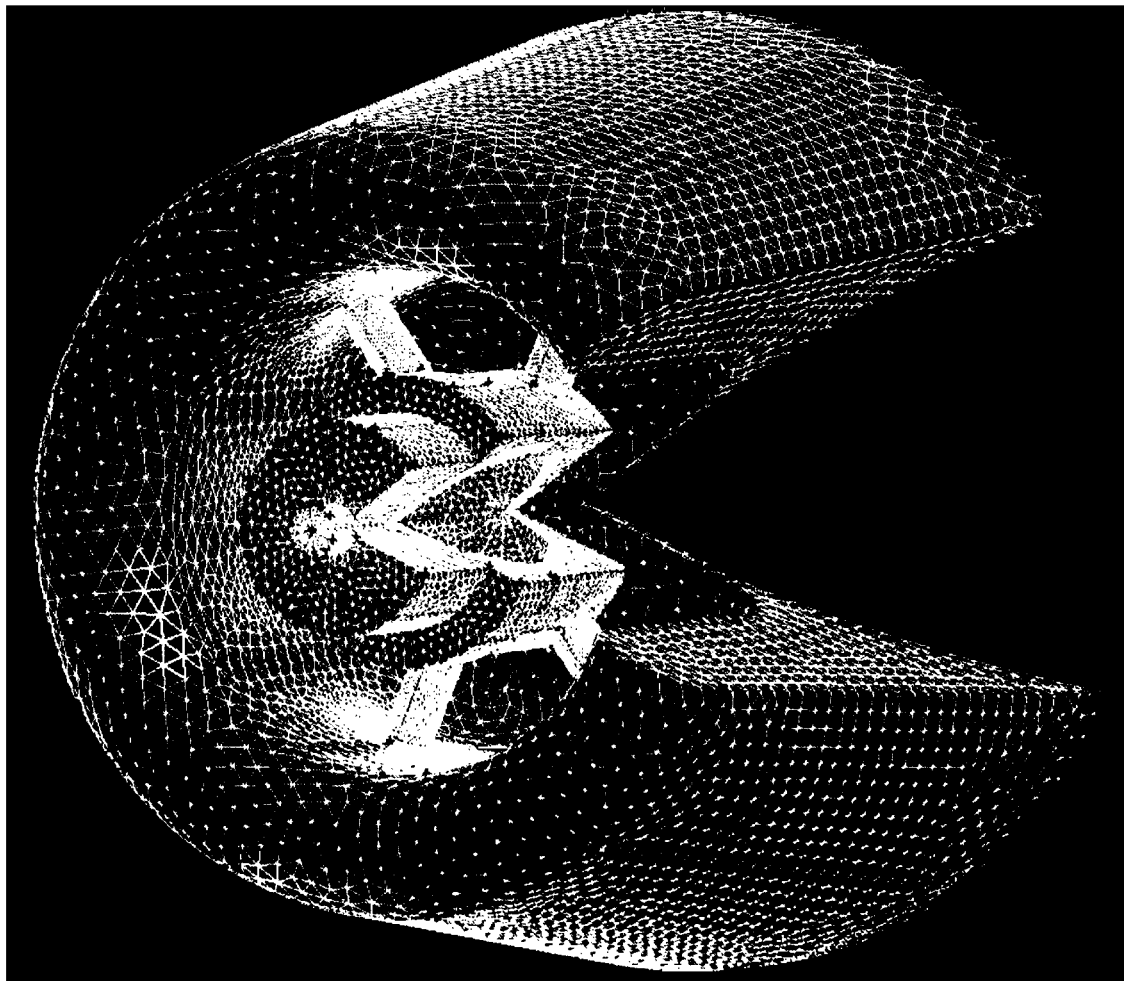
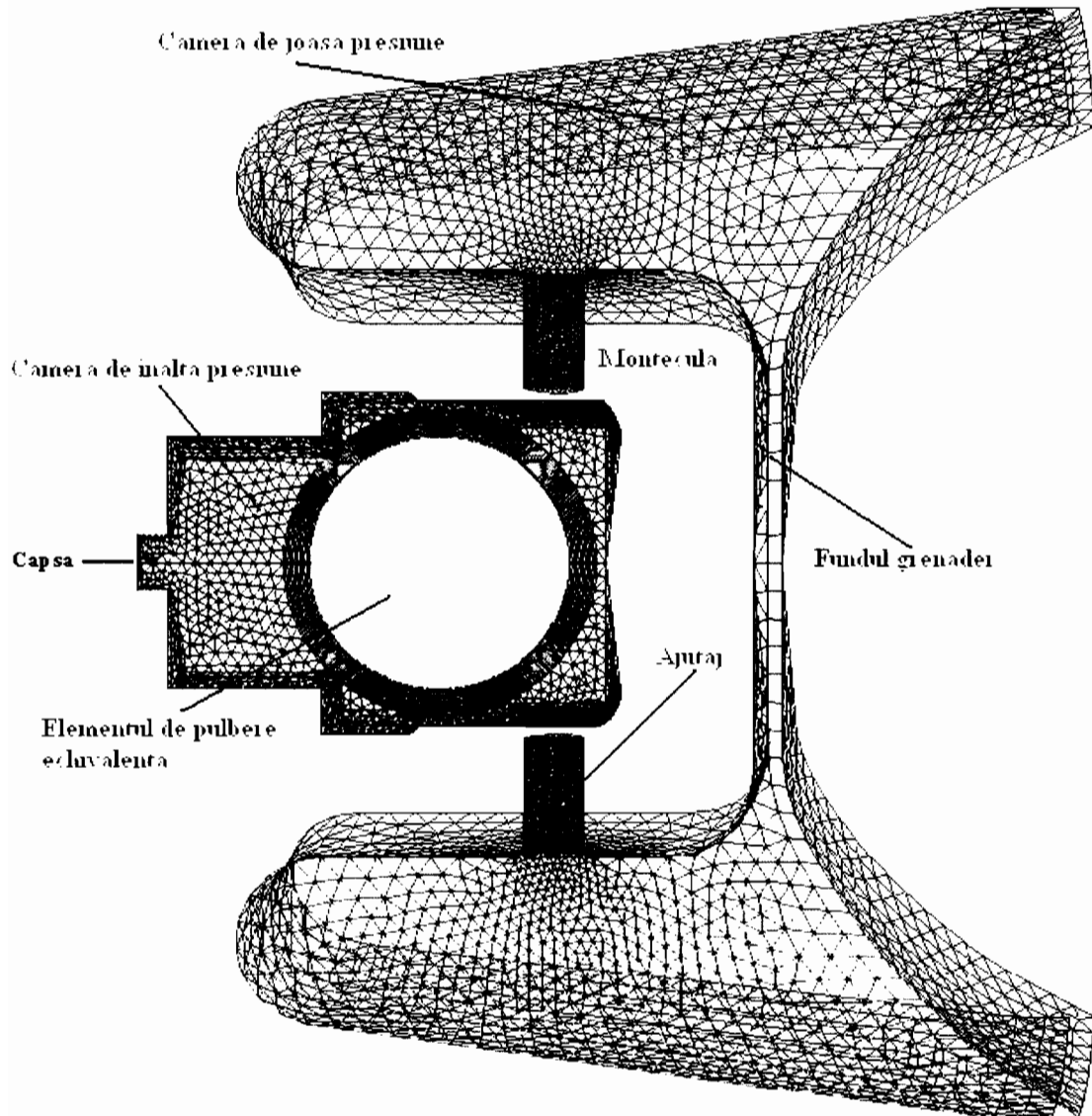


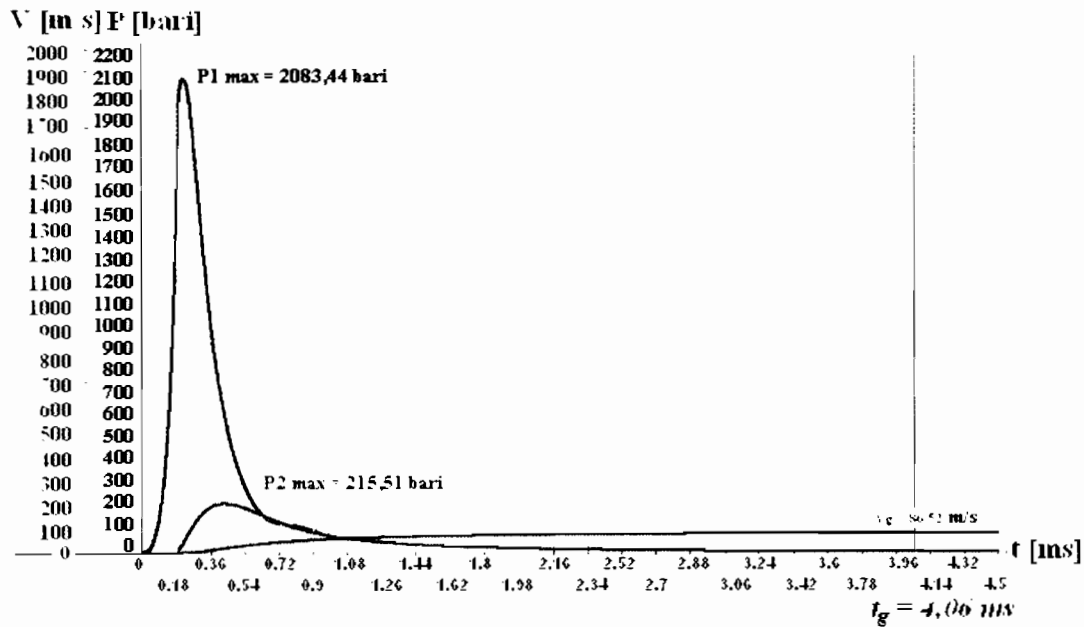
Fig. 18 - Discretizarea modelului



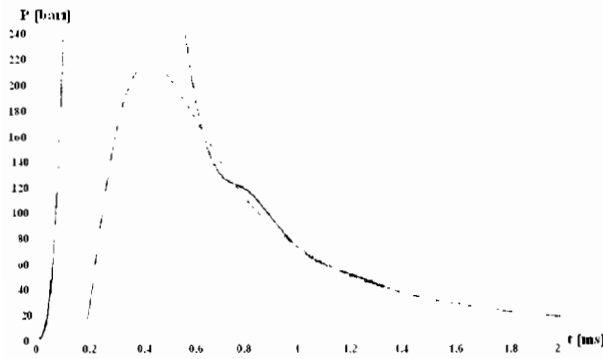
*Fig. 19 - Discretizarea modelului pentru Metoda de simulare numerică bazată pe metoda volumelor finite pentru rezolvarea problemei directe a balisticii interioare*



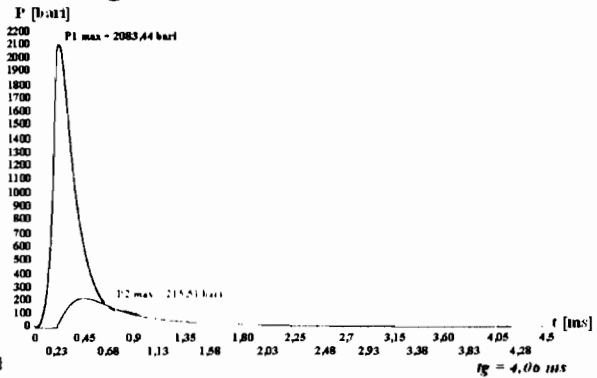
**Fig. 20 – Variația cu timpul a presiunilor gazelor,  $P_1$  și  $P_2$ , mediate și a vitezei grenadei  $V$ , mediate**



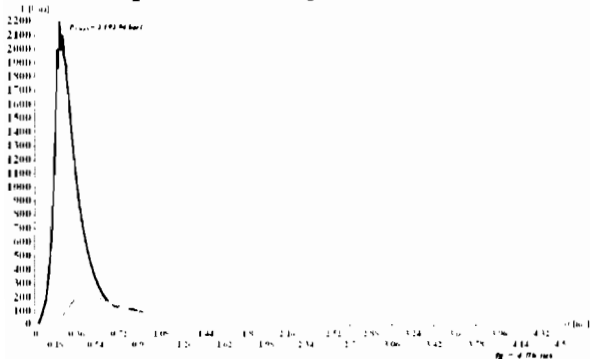
**Fig.21 – Variația cu timpul a presiunii gazelor,  $P_1$  și  $P_2$ , mediate – Detaliu**



**Fig.22 – Variația cu timpul a presiunii gazelor,  $P_1$  și  $P_2$ , mediate**



**Fig. 23 – Variația cu timpul a presiunii gazelor  $P_1$  și  $P_2$ , citite cu traductori piezoelectrici fictivi**



**Fig. 24 – Variația cu timpul a presiunii gazelor,  $P_1$  și  $P_2$ , citite cu traductori piezoelectrici fictivi – Detaliu**

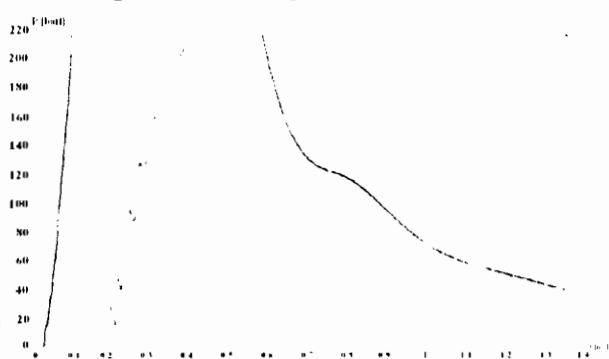


Fig.25 – Variația cu timpul a vitezei  
grenadei în țevă,  $V$

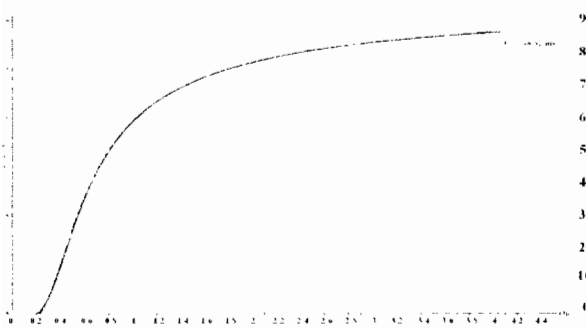


Fig. 26 – Variația cu spațiul a vitezei  
grenadei în țevă,  $V$

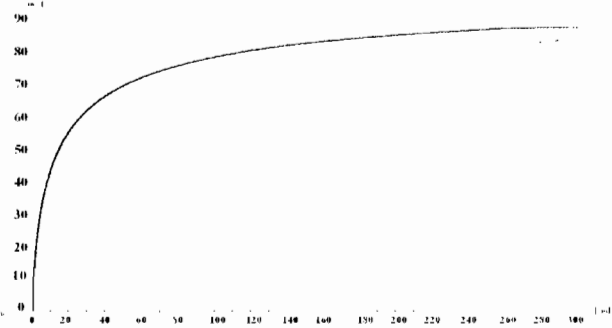
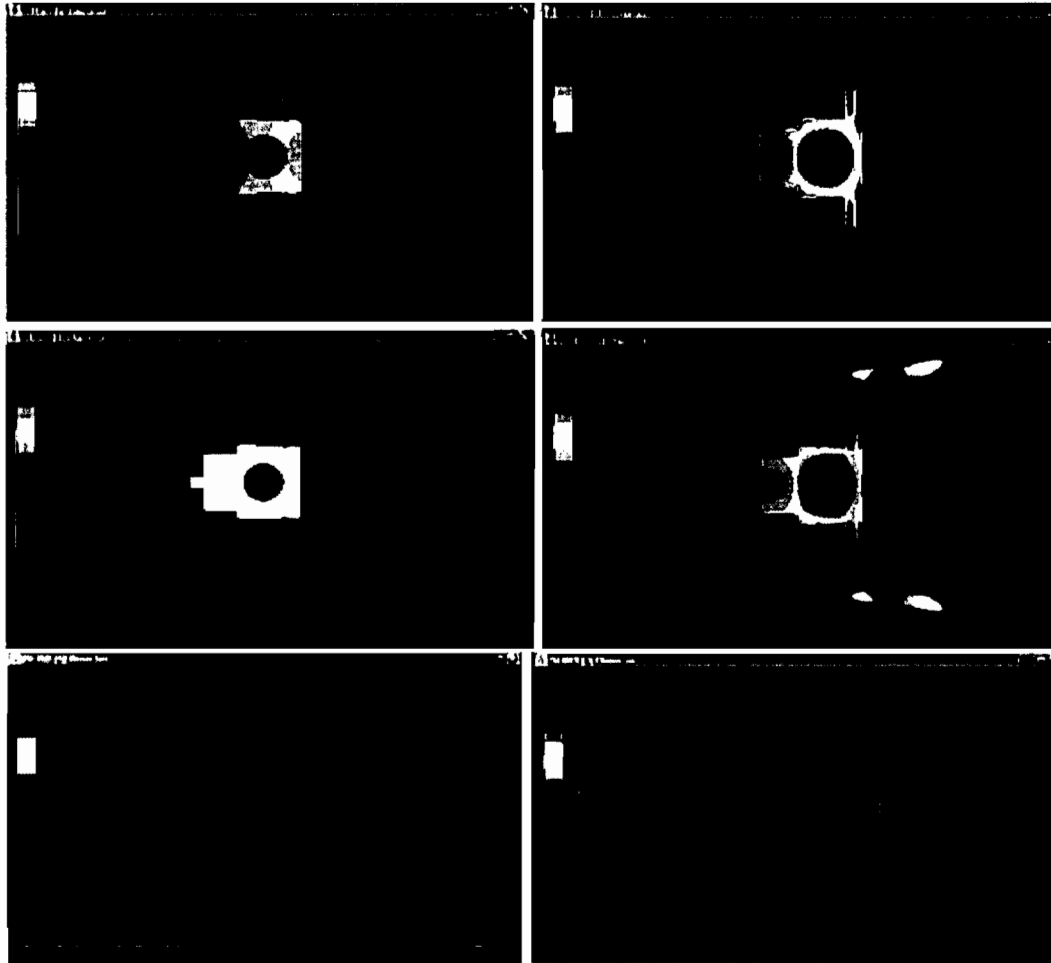
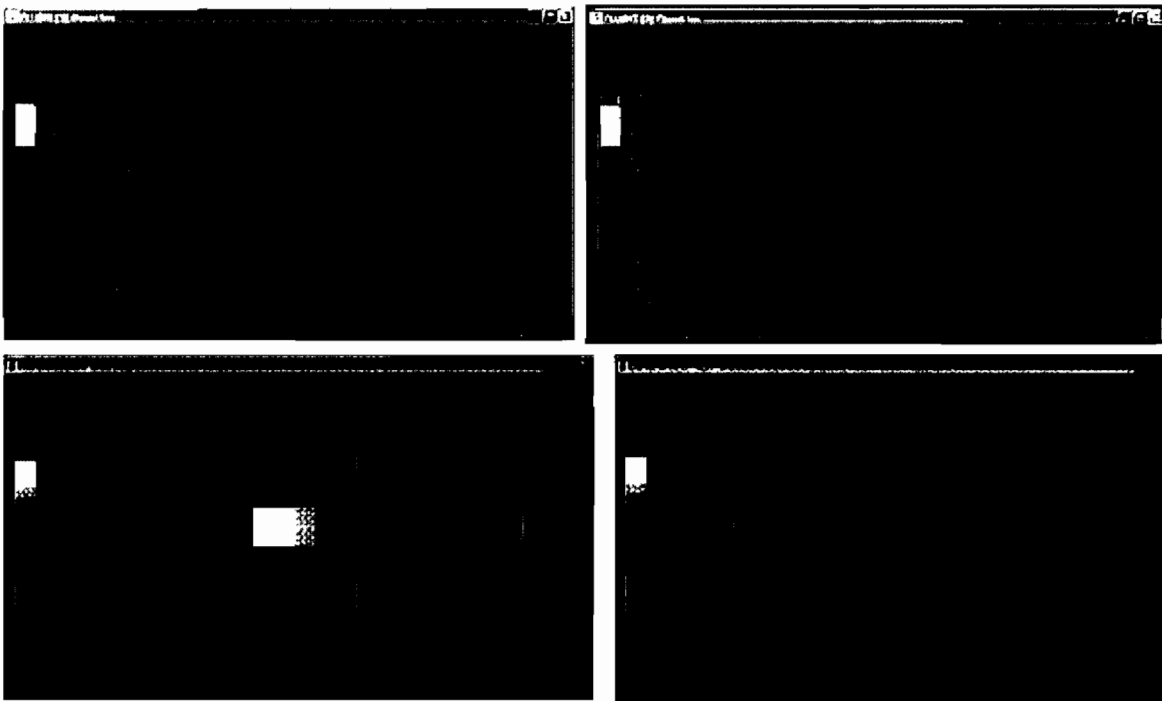


Fig. 27 - Capturi de imagini

Variația presiunii și temperaturii în simulările numerice – DISPOZITIVUL DINAMIC



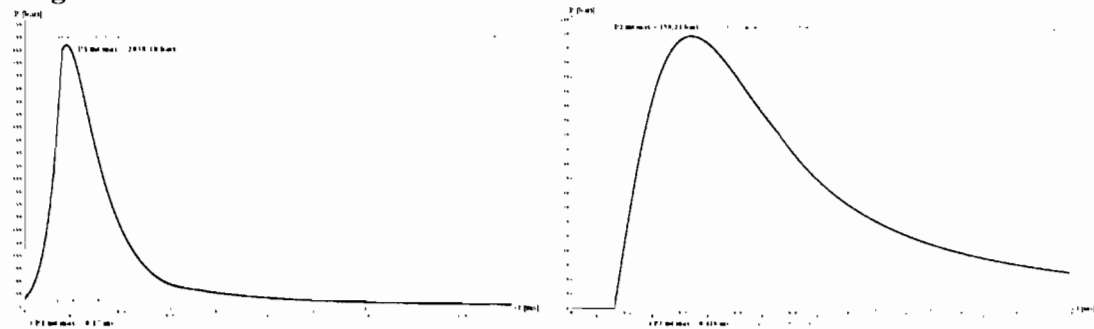


**Fig. 28 – Variația presiunii gazelor în CÎP și CJP, Tragerea 1 și Integrare numerică**  
— Trageri experimentale în dispozitivul static de presiune  
— Integrare numerică

*Variația presiunii în CÎP*

*Variația presiunii în CJP*

**Tragerea 1**



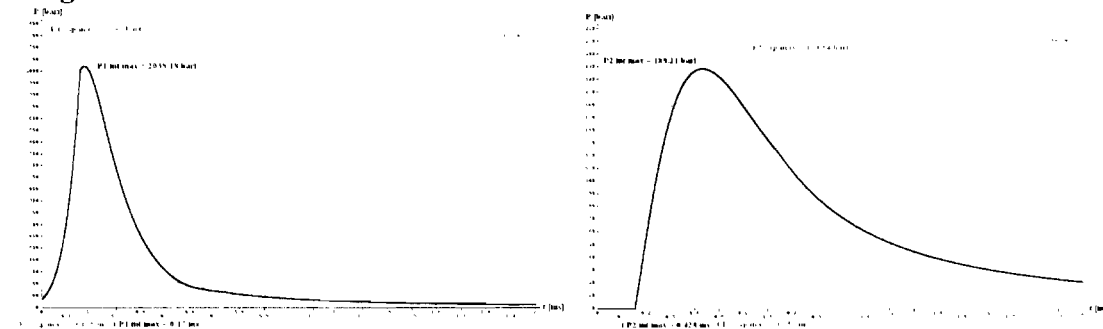


**Fig.29 – Variația presiunii gazelor în CÎP și CJP, Tragerea 2 și Integrare numerică**  
— Trageri experimentale în dispozitivul static de presiune  
— Integrare numerică

Variația presiunii în CÎP

Variația presiunii în CJP

**Tragerea 2**

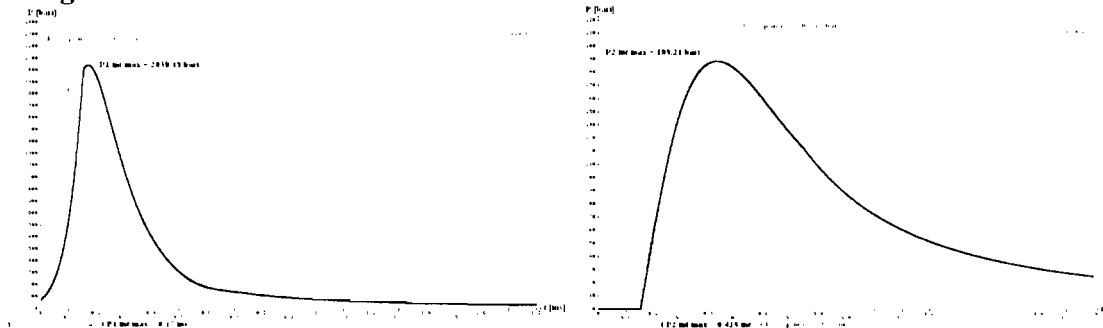


**Fig. 30 – Variația presiunii gazelor în CÎP și CJP, Tragerea 3 și Integrare numerică**  
— Trageri experimentale în dispozitivul static de presiune  
— Integrare numerică

Variația presiunii în CÎP

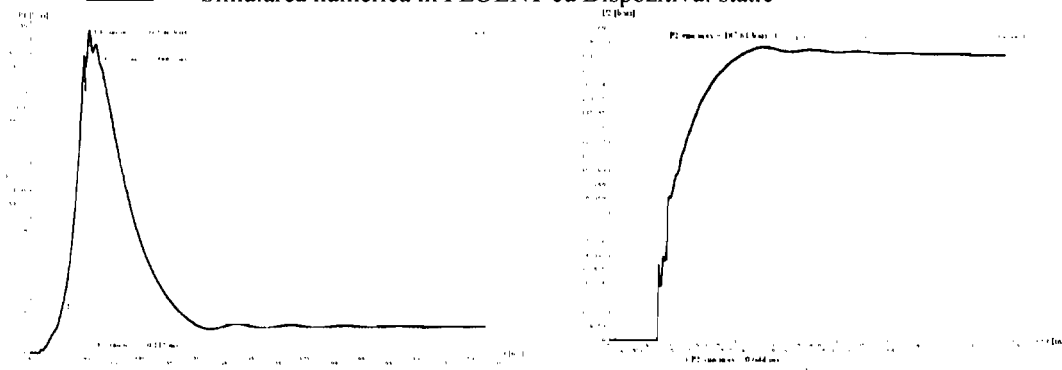
Variația presiunii în CJP

**Tragerea 3**



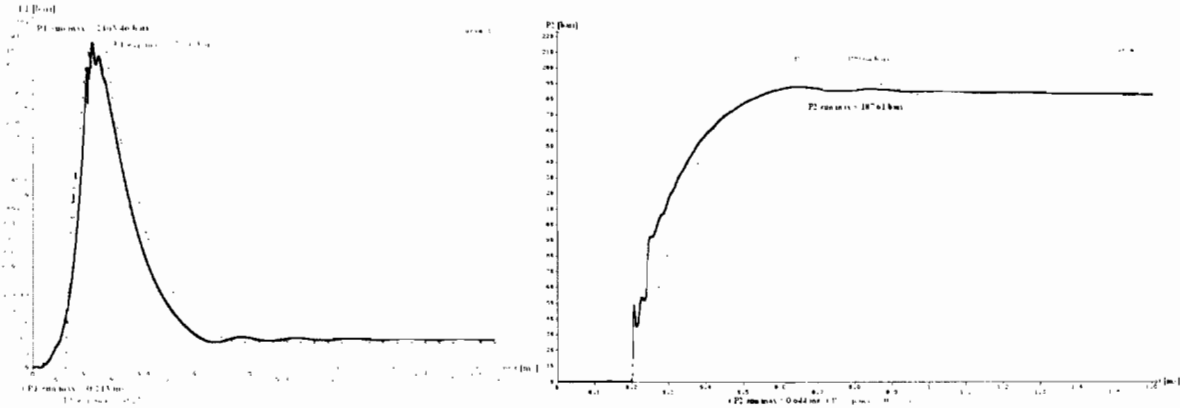
**Fig. 31 – Variația presiunii în CÎP și CJP, Tragerea 1 și Dispozitivul static**

— Trageri experimentale în dispozitivul static de presiune, Tragerea 1  
— Simularea numerică în FLUENT cu Dispozitivul static



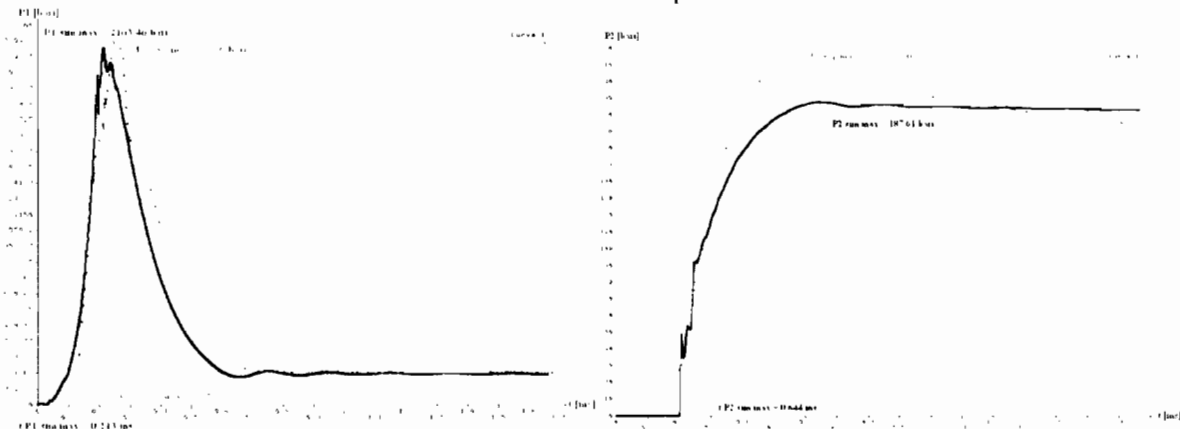
**Fig. 32 – Variația presiunii în CÎP și CJP, Tragerea 2 și Dispozitivul static**

— Trageri experimentale în dispozitivul static de presiune, Tragerea 2  
 — Simularea numerică în FLUENT cu Dispozitivul static

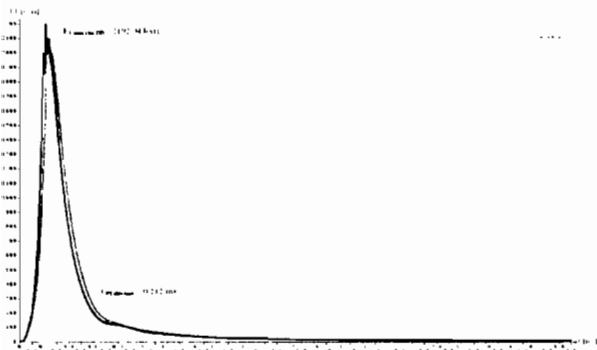


**Fig. 33 – Variația presiunii în CÎP și CJP, Tragerea 3 și Dispozitivul static**

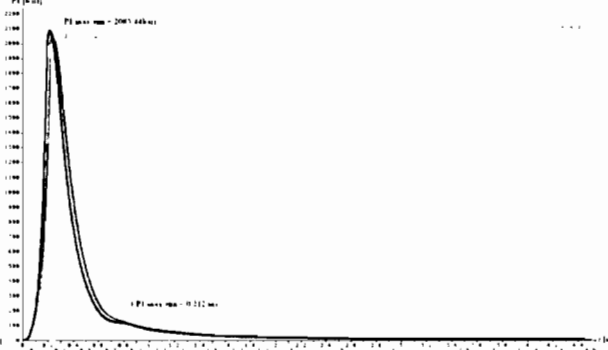
— Trageri experimentale în dispozitivul static de presiune, Tragerea 3  
 — Simularea numerică în FLUENT cu Dispozitivul static



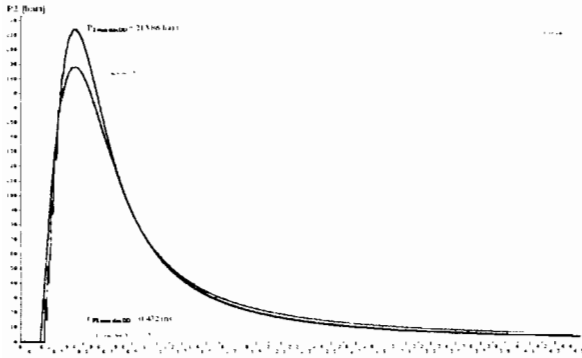
**Fig. 34 a – Variația presiunii în CÎP Integrare și Simulare numerică (presiunea măsurată de traductor)**



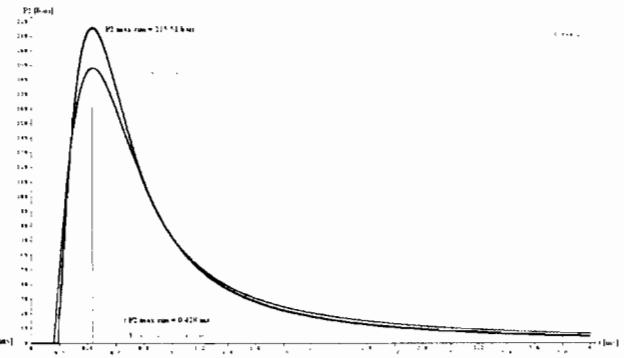
**Fig. 34 b – Variația presiunii în CÎP Integrare și Simulare numerică (presiunea medie)**



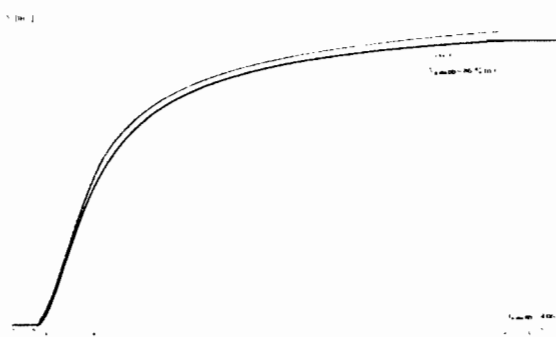
**Fig. 35 a – Variația presiunii în CJP  
Integrare și Simulare numerică (presiunea  
măsurată de traductor)**



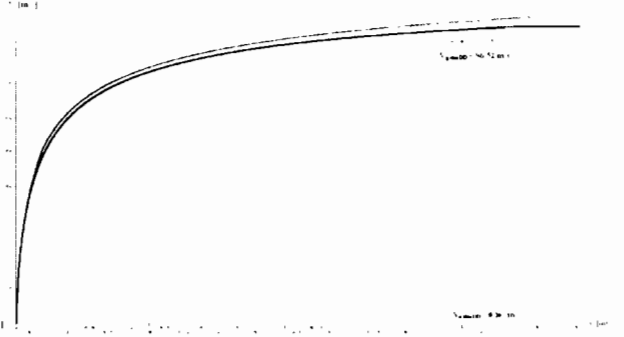
**Fig. 35 b – Variația presiunii în CJP  
Integrare și Simulare numerică  
(presiunea medie)**



**Fig. 36 a – Variația vitezei în funcție de timp  
Integrare și Simulare numerică**



**Fig. 36 b – Variația vitezei în funcție de spațiu  
Integrare și Simulare numerică**



**Fig. 37 – Ajutajul ideal și ajutajul dintre CÎP și CJP**

