



## Termodynamiczny model balistyki wewnętrznej pneumatycznego układu miotającego

ZBIGNIEW SURMA

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa,  
Instytut Techniki Uzbrojenia, 00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2,  
zbigniew.surma@wat.edu.pl

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono model fizyczny pneumatycznego układu miotającego oraz termodynamiczny model matematyczny zjawisk zachodzących w nim podczas strzału. Model matematyczny opisuje zjawiska od chwili rozpoczęcia przepływu czynnika roboczego (gazu) ze zbiornika do przestrzeni zapociskowej do momentu wylotu pocisku z lufy. W wyniku numerycznego rozwiązania zaproponowanych równań otrzymuje się m.in. ciśnienie gazu w przestrzeni zapociskowej lufy oraz charakterystyki ruchu pocisku dla przyjętego układu konstrukcyjnego. Na podstawie wykonanych obliczeń przeanalizowano wpływ wybranych parametrów układu na charakterystyki jego pracy.

**Słowa kluczowe:** mechanika, balistyka wewnętrzna, pneumatyczny układ miotający

### O z n a c z e n i a

- $c_p$  — ciepło właściwe izobaryczne gazu,
- $c_v$  — ciepło właściwe izochoryczne gazu,
- $d_m$  — średnica minimalna kanału, którym gaz przepływa ze zbiornika do przestrzeni zapociskowej przewodu lufy,
- $E$  — suma prac wykonanych przez gaz w lufie,
- $F_m$  — pole powierzchni przekroju minimalnego kanału przepływowego,
- $I_z$  — entalpia gazu przepływającego ze zbiornika do przewodu lufy (przestrzeni zapociskowej),
- $k$  — wykładnik adiabaty gazu,
- $K$  — stała we współczynniku prac drugorzędnych uwzględniająca m.in. pracę gazu związaną z pokonaniem sił tarcia pocisku o ścianki przewodu lufy [6],
- $l$  — przemieszczenie pocisku w przewodzie lufy,

- $m$  — masa pocisku,  
 $m_g$  — początkowa masa gazu w zbiorniku,  
 $p$  — ciśnienie gazu w przewodzie lufy,  
 $p_z$  — ciśnienie gazu w zbiorniku,  
 $p_{z0}$  — początkowe ciśnienie (przed strzałem) gazu w zbiorniku,  
 $R$  — stała gazowa gazu,  
 $s$  — pole powierzchni przekroju poprzecznego przewodu lufy,  
 $t$  — czas,  
 $T$  — temperatura gazu w przewodzie lufy,  
 $T_z$  — temperatura gazu w zbiorniku,  
 $T_{z0}$  — temperatura początkowa (przed strzałem) gazu w zbiorniku,  
 $U$  — energia wewnętrzna gazu w przewodzie lufy,  
 $U_z$  — energia wewnętrzna gazu w zbiorniku,  
 $V$  — prędkość ruchu postępowego pocisku,  
 $W_0$  — początkowa objętość przestrzeni zapociskowej przewodu lufy,  
 $W_z$  — objętość zbiornika z gazem,  
 $\xi$  — współczynnik wydatku,  
 $\eta$  — względna część gazu, która przepłynęła ze zbiornika do przewodu lufy,  
 $\varphi$  — współczynnik prac drugorzędnych gazu.

## 1. Wstęp

Podczas badań balistycznych nowych rodzajów pocisków, testów różnego typu osłon balistycznych lub podczas wyznaczania właściwości dynamicznych materiałów, do wystrzeliwania pocisków (próbek) stosowane są zwykle klasyczne lufowe układy miotające [6]. Źródłem energii w tego typu układach są tzw. gazy prochowe, powstające w wyniku spalania stałego materiału miotającego (prochu). Gazy prochowe powstające w układzie miotającym cechuje temperatura rzędu tysięcy kelwinów i ciśnienie sięgające z reguły setek MPa. Z tych powodów prochowe układy miotające wymagają zachowania szczególnej ostrożności podczas ich obsługi, a ponadto powstające podczas strzału gazy prochowe są szkodliwe dla zdrowia ludzkiego i środowiska. Alternatywą dla układów prochowych może być pneumatyczny układ miotający, w którym źródłem energii (czynnikiem roboczym) jest gaz, najczęściej powietrze, dwutlenek węgla, hel lub wodór. Przykład takiego układu, w którym jako czynnik napędowy stosowany jest hel, został opisany w pracy [1].

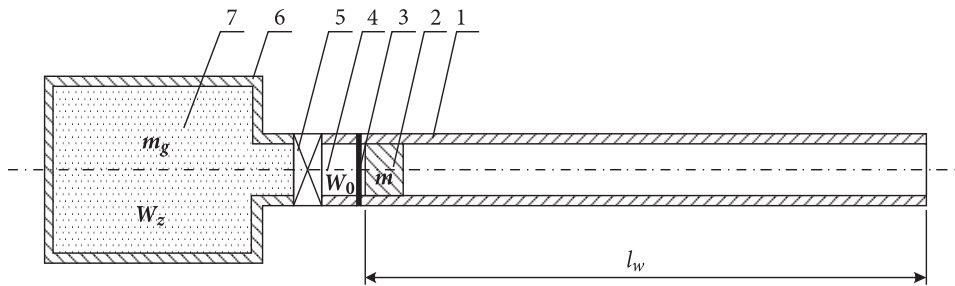
W związku z powyższym głównym celem pracy będzie zbudowanie modelu matematycznego opisującego zjawiska zachodzące podczas wystrzału z układu pneumatycznego, a następnie opracowanie programu komputerowego umożliwiającego symulację jego działania. Podczas formułowania równań modelu matematycznego zastosowano podejście termodynamiczne, prezentowane już w pracach [2, 4, 5] dotyczących modelowania pracy prochowych lufowych układów miotających.

Uproszczona analiza układu pneumatycznego w ujęciu termodynamicznym rozpatrzona jest natomiast w pracy [3].

W wyniku numerycznego rozwiązania opracowanego modelu matematycznego otrzymuje się m.in. ciśnienie gazu w przewodzie lufy (przestrzeni zapociskowej) oraz charakterystyki ruchu (prędkość i drogę) napędzanego pocisku. Z wykorzystaniem programu przeprowadzono analizę wpływu wybranych parametrów układu pneumatycznego na charakterystyki jego pracy. Opracowany model matematyczny oraz program komputerowy mogą być przydatne podczas projektowania lub modyfikacji rozpatrywanego w pracy typu układu pneumatycznego.

## 2. Model fizyczny pneumatycznego układu miotającego

Schemat ideowy układu pneumatycznego przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat pneumatycznego układu miotającego: 1 — lufa, 2 — pocisk, 3 — przepona, 4 — przestrzeń zapociskowa, 5 — zawór, 6 — zbiornik z gazem, 7 — gaz

W przedstawionym układzie przed strzałem zbiornik (6) o objętości  $W_z$  napełniony jest gazem (7) o masie  $m_g$  do ciśnienia  $p_{z0}$ . Po otwarciu zaworu rozpoczyna się przepływ gazu do objętości zapociskowej o początkowej wartości  $W_0$ . W wyniku przepływu gazu rośnie ciśnienie w objętości  $W_0$  i po osiągnięciu określonej wartości następuje rozerwanie (pęknięcie) przepony. Od chwili pęknięcia przepony w układzie pneumatycznym zachodzą jednocześnie dwa zjawiska: przepływ gazu ze zbiornika ciśnieniowego do przestrzeni zapociskowej przewodu lufy oraz napęd pocisku. Zjawisko strzału kończy się w chwili wylotu pocisku z przewodu lufy. Przepona zastosowana w rozpatrywanym układzie powoduje wzrost ciśnienia w przestrzeni zapociskowej w początkowej fazie zjawiska (przed rozpoczęciem ruchu pocisku w lufie), wywołując efekt podobny do wytworzenia ciśnienia forsowania w klasycznym układzie miotającym, wskutek oporów wcinania się części wiodącej pocisku w gwint lufy.

W rozpatrywanym układzie pneumatycznym zjawisko strzału można umownie podzielić na dwa charakterystyczne okresy:

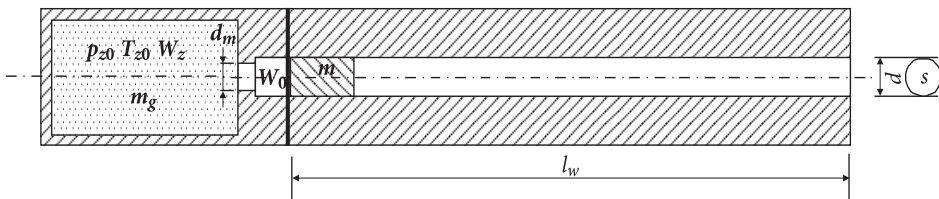
- okres I, trwający od chwili otwarcia zaworu (rozpoczęcia przepływu gazu ze zbiornika do przestrzeni zapociskowej) do chwili pęknięcia przepony;
- okres II, trwający od chwili pęknięcia przepony do chwili wylotu pocisku z przewodu lufy.

W szczególnym przypadku rozpatrywany układ może być bez przepony.

Wówczas bezpośrednio po otwarciu zaworu i rozpoczęciu przepływu gazu ze zbiornika do przestrzeni zapociskowej występuje oddziaływanie gazu na pocisk i rozpoczyna się jego ruch w przewodzie lufy.

### 3. Model matematyczny

W celu wyznaczenia parametrów ruchu pocisku, tj. przemieszczenia i prędkości w czasie napędzania, oraz parametrów gazu w zbiorniku i lufie, sformułowano model matematyczny zjawisk zachodzących w pneumatycznym układzie miotającym. Przy formułowaniu równań modelu posłużono się balistycznym (uproszczonym) schematem układu pneumatycznego, przedstawionym na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat balistyczny pneumatycznego układu miotającego

Model matematyczny działania rozpatrywanego układu został opracowany przy założeniu adiabatyczności rozpatrywanych procesów (przemian) termodynamicznych oraz quasi-ustaloności przepływu gazu ze zbiornika do przestrzeni zapociskowej. Ponadto przyjęto następujące założenia:

- pęknięcie przepony następuje w chwili osiągnięcia przez gaz w przestrzeni zapociskowej ciśnienia ścinania  $p = p_{sc}$ ;
- pęknięcie przepony jest natychmiastowe i pełne, tj. przekrój wlotowy lufy jest całkowicie otwarty;
- ruch pocisku rozpoczyna się w chwili  $t_{sc}$  pęknięcia przepony.

Równaniami modelu matematycznego rozpatrywanego układu są:

- bilans energii w przestrzeni zapociskowej (lufie)

$$dI_z = dU + dE, \quad (1)$$

który po uwzględnieniu:

$$dI_z = d(c_p T_z m_g \eta) = c_p T_z m_g d\eta,$$

$$dU = d(c_v T m_g \eta) = \frac{1}{k-1} d(RT m_g \eta),$$

$$dE = d\left(\varphi m \frac{V^2}{2}\right) = \varphi m V dV + \frac{1}{6} m_g V^2 d\eta,$$

gdzie: 
$$\varphi = K + \frac{1}{3} \frac{m_g \eta}{m} \quad [6]$$

przyjmuje postać

$$\frac{d(RT m_g \eta)}{dt} = kRT_z m_g \frac{d\eta}{dt} - (k-1) \left[ \varphi m V \frac{dV}{dt} + \frac{1}{6} m_g V^2 \frac{d\eta}{dt} \right], \quad (1a)$$

— równanie stanu gazu w przestrzeni zapociskowej

$$p(W_0 + sI) = RT m_g \eta; \quad (2)$$

— bilans energii w zbiorniku z gazem

$$dU_z = -dI_z, \quad (3)$$

który po uwzględnieniu:

$$dU_z = d(c_v m_g (1-\eta) T_z) = \frac{1}{k-1} d(p_z W_z) = \frac{W_z}{k-1} dp_z,$$

$$dI_z = d(c_p T_z m_g \eta) = c_p T_z m_g d\eta$$

przyjmuje postać

$$\frac{dp_z}{dt} = -\frac{kRT_z m_g}{W_z} \frac{d\eta}{dt}, \quad (3a)$$

— równanie temperatury gazu (równanie stanu gazu) w zbiorniku

$$T_z = \frac{p_z W_z}{R m_g (1-\eta)}; \quad (4)$$

- równania przepływu gazu ze zbiornika do przestrzeni zapociskowej [8]

przy  $p \leq p_z \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{\xi F_m}{m_g} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}} \frac{p_z}{\sqrt{RT_z}}; \quad (5a)$$

przy  $p > p_z \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{\xi F_m}{m_g} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[ \left( \frac{p}{p_z} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p}{p_z} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \frac{p_z}{\sqrt{RT_z}}; \quad (5b)$$

- równanie ruchu postępowego pocisku

$$\frac{dV}{dt} = \frac{ps}{\phi m}; \quad (6)$$

- definicja prędkości liniowej pocisku

$$\frac{dl}{dt} = V. \quad (7)$$

Do rozwiązania układu równań (1) do (7) niezbędne są warunki początkowe:

$$t = 0, \eta = 0, l = 0, V = 0, T_z = T_{z0}, p_z = p_{z0}, RTm_g\eta = 0.$$

#### 4. Symulacje pracy układu pneumatycznego

Przedstawione w punkcie 3 równania różniczkowe rozwiązano numerycznie metodą Rungego-Kutty. Niezbędne do obliczeń dane wejściowe w postaci charakterystyk konstrukcyjnych układu miotającego oraz właściwości termodynamicznych czynnika roboczego (helu) zamieszczono w tabeli 1.

TABELA 1

Dane wejściowe przyjęte do symulacji

Kaliber lufy gładkościennej	$d$ [mm]	12,1
Pole przekroju poprzecznego przewodu lufy	$s$ [mm <sup>2</sup> ]	115,0
Objętość zbiornika z gazem	$W_z$ [dm <sup>3</sup> ]	2,2
Początkowa objętość przestrzeni zapociskowej	$W_0$ [cm <sup>3</sup> ]	81
Całkowita droga pocisku w przewodzie lufy	$l_w$ [mm]	1192,6
Średnica minimalna kanału przepływowego w zaworze	$d_m$ [mm]	12
Masa pocisku	$m$ [g]	5
Stała we współczynniku prac drugorzędnych	$K$ [-]	1,01
Współczynnik wydatku	$\xi$ [-]	0,95
Ciśnienie ścinania przepony	$p_{\acute{s}c}$ [MPa]	10
Stała gazowa helu	$R$ [J/(kg · K)]	2079
Wykładnik adiabaty helu	$k$ [-]	1,66
Ciśnienie gazu w zbiorniku przed strzałem	$p_{z0}$ [MPa]	20
Temperatura gazu w zbiorniku przed strzałem	$T_{z0}$ [K]	293

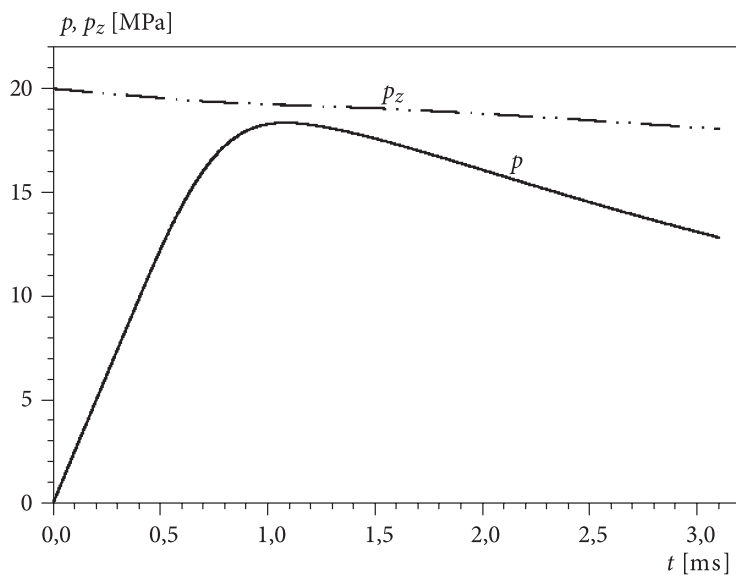
Obliczenia realizowano z krokiem  $\Delta t = 10 \mu s$ . W obliczeniach przyjęto wartość współczynnika wydatku  $\xi = 0,95$  typową dla przepływu gazów przez dyszę [7]. Współczynnik ten uwzględnia straty masowego natężenia przepływu gazów wynikające m.in. z niedoskonałości wykonania dyszy. W przypadku zastosowania w układzie miotającym zaworu, którego kanał przepływowy ma złożoną konstrukcję i poszczególne jego odcinki nie są współosiowe, współczynnik wydatku może przyjmować wartości mniejsze.

Wyniki przeprowadzonych obliczeń zobrazowano na rysunkach 3-5. Charakterystyczne dla rozpatrywanego układu wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 2.

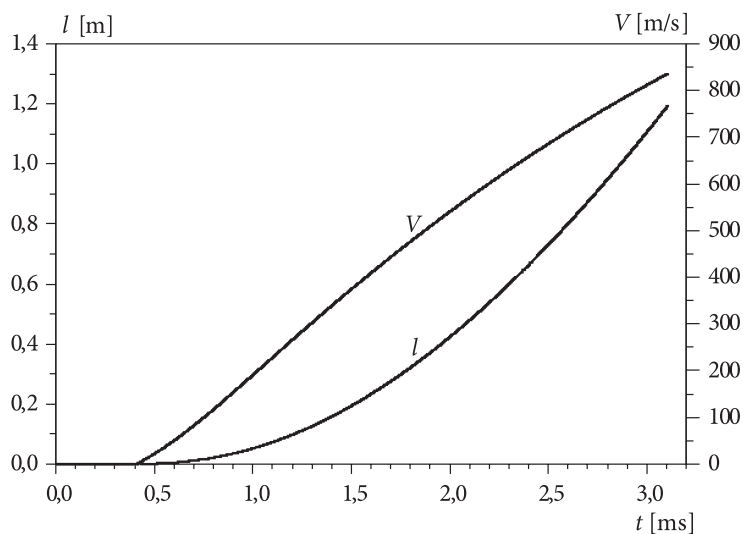
TABELA 2

Wybrane wyniki obliczeń

Ciśnienie maksymalne gazu w lufie	$p_m$ [MPa]	18,4
Ciśnienie gazu w lufie w chwili wylotu pocisku	$p_w$ [MPa]	12,8
Czas zjawiska	$t_w$ [ms]	3,11
Prędkość wylotowa pocisku	$V_w$ [m/s]	837,1
Ciśnienie gazu w zbiorniku w chwili wylotu pocisku	$p_{zw}$ [MPa]	18,0
Temperatura gazu w zbiorniku w chwili wylotu pocisku	$T_{zw}$ [K]	281,3
Względna część gazu, która przepłynęła ze zbiornika do przewodu lufy do chwili wylotu pocisku	$\eta_w$ [-]	0,06



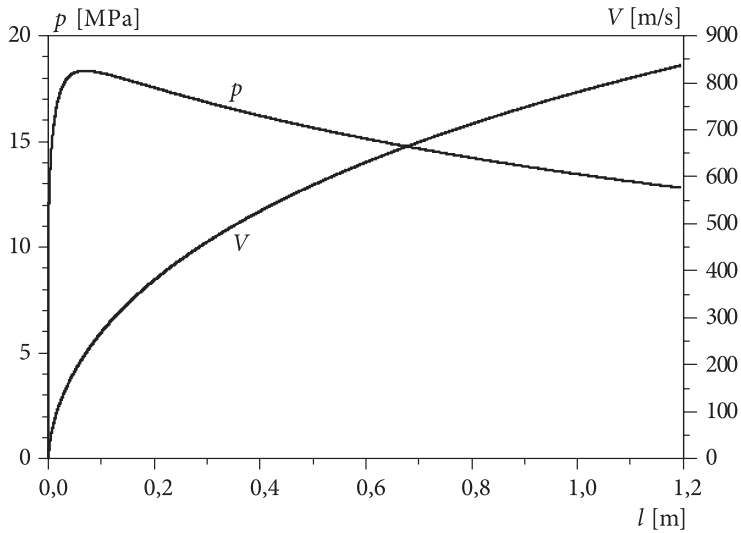
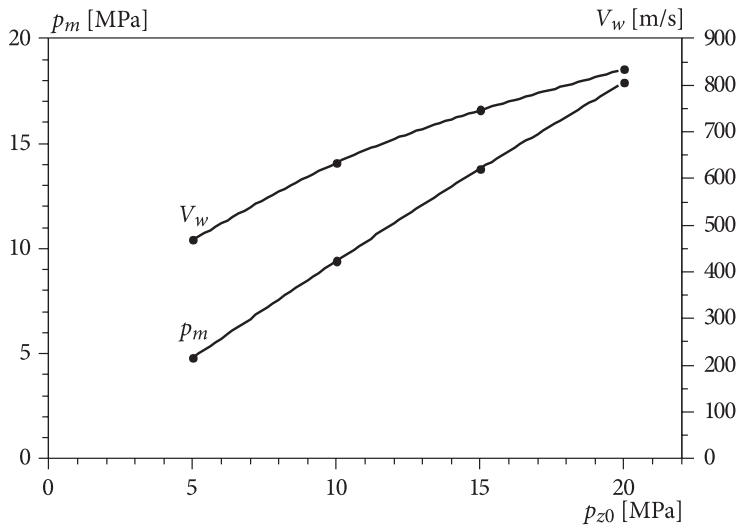
Rys. 3. Wykresy ciśnień gazu w lufie  $p$  oraz w zbiorniku  $p_z$  w funkcji czasu  $t$



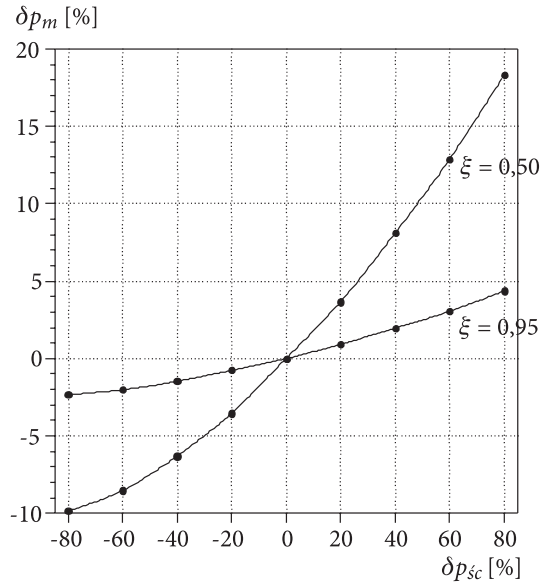
Rys. 4. Wykresy drogi  $l$  i prędkości  $V$  pocisku w funkcji czasu  $t$

Celem kolejnych symulacji było zbadanie wpływu początkowego ciśnienia  $p_{z0}$  gazu w zbiorniku na ciśnienie maksymalne  $p_m$  gazu w lufie oraz prędkość wylotową  $V_w$  pocisku. Symulacje przeprowadzono dla układu bez przepony ( $p_{sc} = 0$ ). Wyniki symulacji dla  $p_{z0}$ : 5, 10, 15 oraz 20 MPa zobrazowano na rysunku 6.

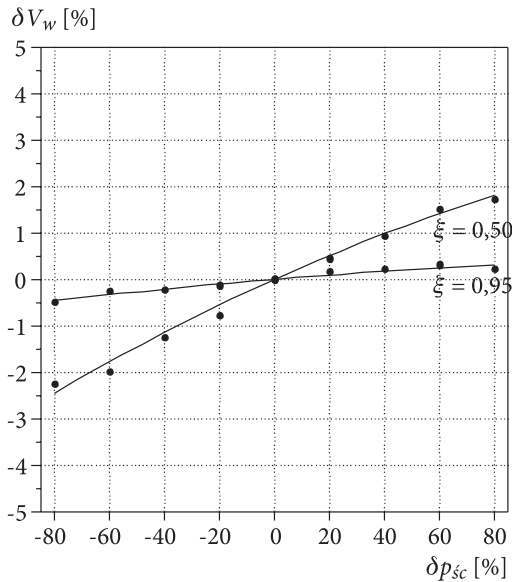



 Rys. 5. Wykresy ciśnienia  $p$  w lufie i prędkości  $V$  pocisku w funkcji drogi  $l$ 

 Rys. 6. Zależności ciśnienia maksymalnego  $p_m$  gazu w lufie oraz prędkości wylotowej  $V_w$  pocisku od początkowego ciśnienia  $p_{z0}$  gazu w zbiorniku

Wpływ stosowania przepony na główne charakterystyki strzału ( $p_m$  i  $V_w$ ) przedstawiono na rysunkach 7 i 8. Wyniki obliczeń dla dwóch wartości współczynnika wydatku  $\xi$ : 0,50 i 0,95 przedstawiono w postaci względnych zmian procentowych  $\delta p_m$  oraz  $\delta V_w$  w funkcji względnej zmiany  $\delta p_{sc}$ . Jako odniesieniowe (bazowe) przyjęto dane układu z tabeli 1.

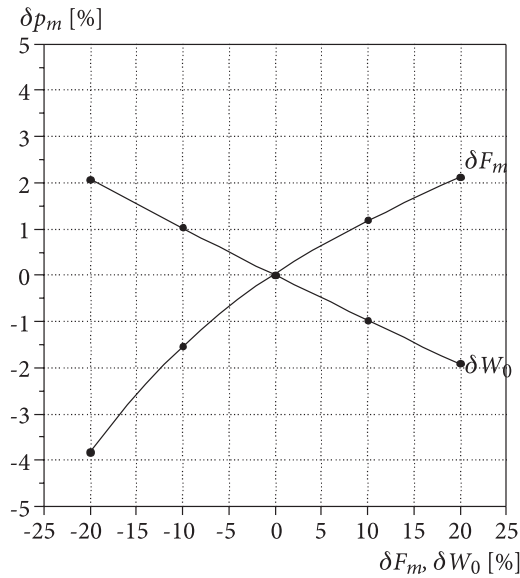


Rys. 7. Względne zmiany ciśnienia maksymalnego  $p_m$  gazu w lufie w funkcji względnej zmiany  $p_{sc}$

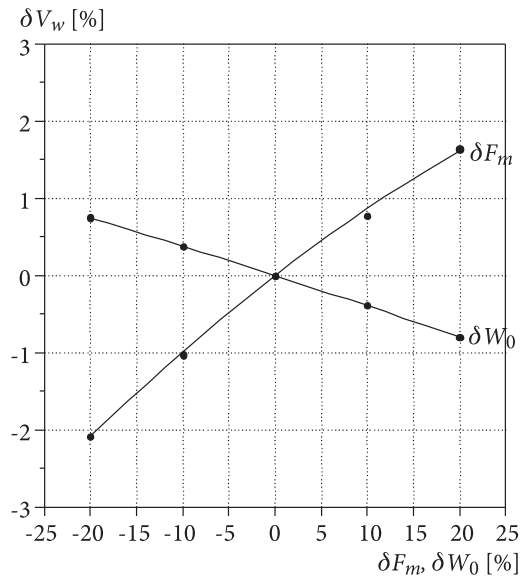


Rys. 8. Względne zmiany prędkości wylotowej  $V_w$  pocisku w funkcji względnej zmiany  $p_{sc}$

Wykorzystując opracowany program komputerowy, przebadano ponadto wpływ pola powierzchni  $F_m$  przekroju minimalnego kanału w zaworze oraz początkowej objętości  $W_0$  przestrzeni zapociskowej na  $p_m$  i  $V_w$ . Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 9 i 10.



Rys. 9. Względne zmiany ciśnienia maksymalnego  $p_m$  gazu w lufie w funkcji względnych zmian  $F_m$  i  $W_0$



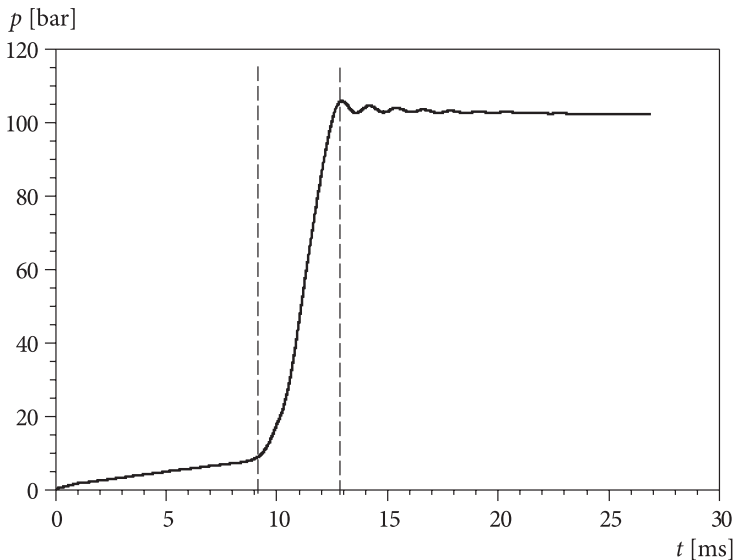
Rys. 10. Względne zmiany prędkości wylotowej  $V_w$  pocisku w funkcji względnych zmian  $F_m$  i  $W_0$

W celu sprawdzenia poprawności fizycznej oraz przydatności praktycznej opracowanego modelu przeprowadzono jego weryfikację doświadczalną na podstawie wyników badań z wykorzystaniem rzeczywistego (laboratoryjnego) układu

pneumatycznego [1]. Specyfika konstrukcji układu laboratoryjnego wymaga uwzględnienia w obliczeniach m.in.:

- strat przepływu gazu ze zbiornika do przestrzeni zapociskowej wynikających ze złożonej konstrukcji kanału w zaworze; kanał ten składa się z trzech niewspółosiowych odcinków;
- przestrzeni pomiędzy przeponą a dnem pocisku o objętości  $7 \text{ cm}^3$ .

W modelu straty przepływu uwzględnia współczynnik wydatku  $\xi$ . Wykorzystując doświadczalny wykres (rys. 11) ciśnienia  $p(t)$  gazu od chwili pełnego otwarcia zaworu do chwili zrównania ciśnienia w zbiorniku i przestrzeni zapociskowej (przedział czasu ograniczony liniami przerywanymi), wyznaczono metodą kolejnych przybliżeń wartość współczynnika wydatku  $\xi = 0,25$ .



Rys. 11. Wykres ciśnienia w przestrzeni zapociskowej (ciśnienie w zbiorniku ok. 114 bar, przepona nie pękła)

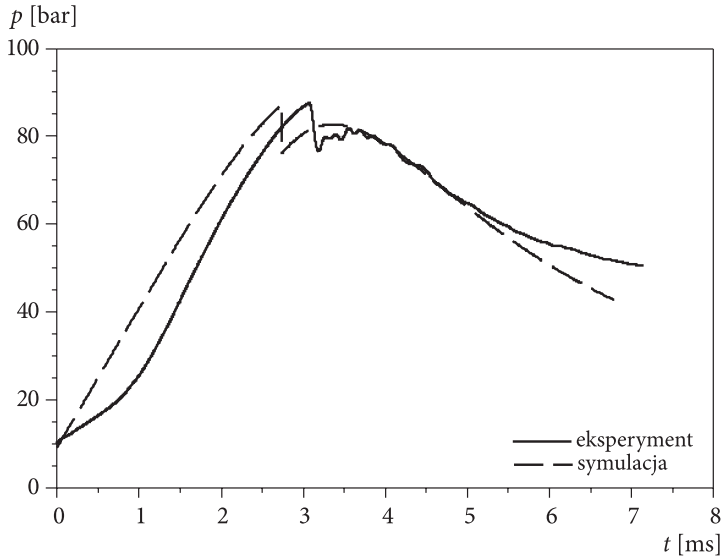
Symulacje strzału wykonano dla dwóch wariantów układu miotającego o parametrach jak w tabeli 3.

TABELA 3

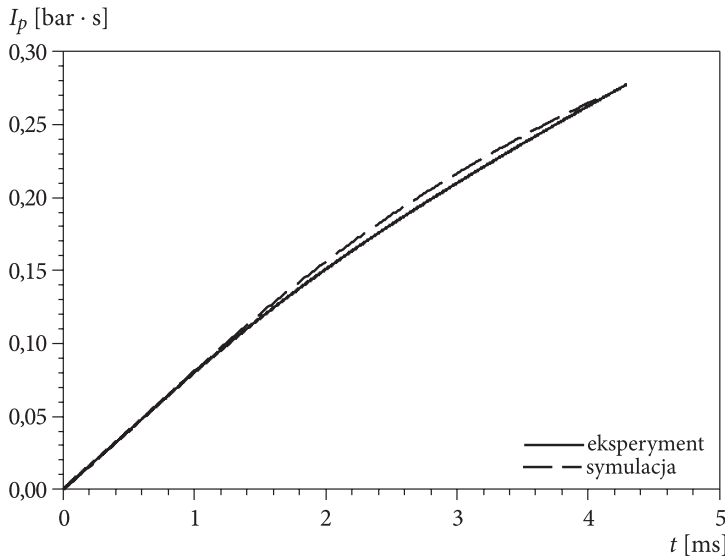
Warianty układów miotających

		wariant 1	wariant 2
Całkowita droga pocisku w przewodzie lufy	$l_w$ [mm]	1192,6	2394,6
Masa pocisku	$m$ [g]	5	24
Ciśnienie gazu w zbiorniku przed strzałem	$p_{z0}$ [MPa]	9,8	10,0
Ciśnienie ścinania przepony	$p_{\xi c}$ [MPa]	8,7	7,7

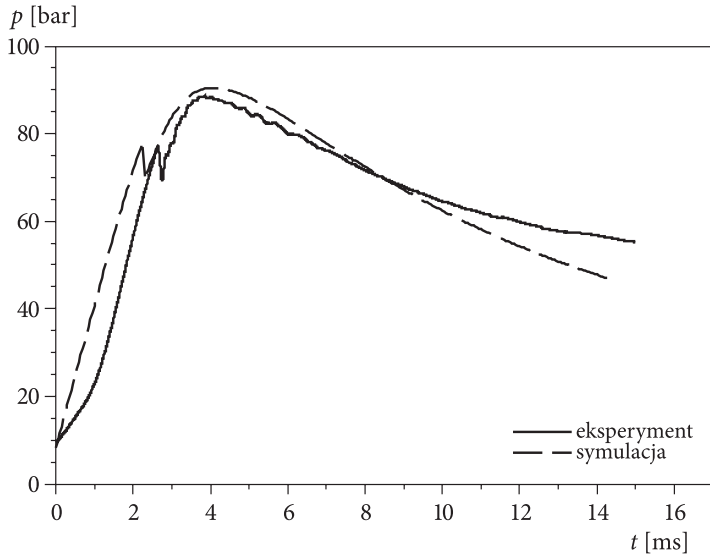
Wykresy obliczonych ciśnień  $p(t)$  porównano następnie z wykresami eksperymentalnymi (rysunki 12 i 14) otrzymanymi w wyniku pomiarów ciśnienia w przestrzeni zapociskowej podczas badań rozpatrywanych wariantów układów miotających.



Rys. 12. Porównanie ciśnień  $p(t)$  w układzie miotającym (wariant 1)

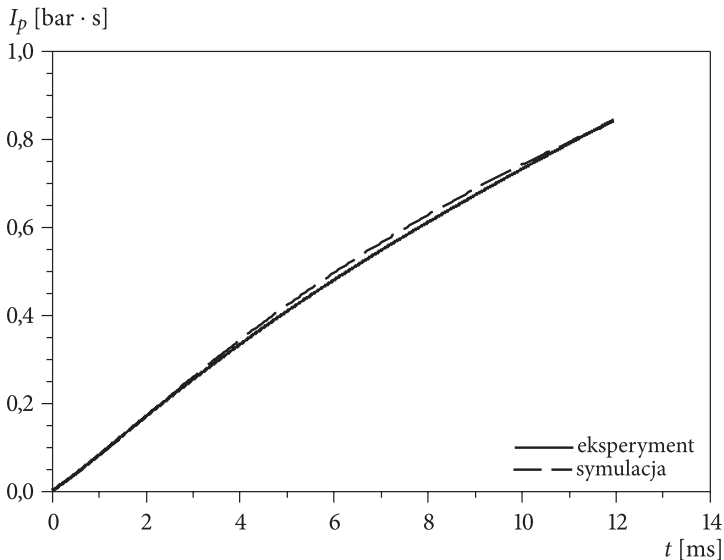


Rys. 13. Porównanie impulsów  $I_p(t)$  ciśnienia  $p(t)$  w układzie miotającym (wariant 1)



Rys. 14. Porównanie ciśnień  $p(t)$  w układzie miotającym (wariant 2)

Prezentowane (jako przykłady) na rysunkach 12 i 14 wykresy ciśnień  $p(t)$  pokazują zadowalającą zgodność eksperymentu z obliczeniami za pomocą opracowanego modelu balistyki wewnętrznej układu pneumatycznego. Zadowalająco zgodne z eksperymentem są również wykresy impulsów ciśnienia  $I_p(t) = \int_{t_{sc}}^t p(t) dt$



Rys. 15. Porównanie impulsów  $I_p(t)$  ciśnienia  $p(t)$  w układzie miotającym (wariant 2)

(proporcjonalnych do prędkości napędzanych pocisków) otrzymanych w wyniku całkowania numerycznego ciśnień  $p(t)$  metodą trapezów, pokazane na rysunkach 13 i 15.

## 5. Wnioski

Zaprezentowany model matematyczny pneumatycznego układu miotającego oraz opracowany na jego podstawie program komputerowy umożliwiając obliczenia parametrów ruchu pocisku oraz parametrów termodynamicznych gazu w zbiorniku i przestrzeni zapociskowej. Otrzymane wyniki pozwalają wyciągnąć m.in. następujące wnioski:

- a) rozpatrywany układ pneumatyczny pozwala napędzić pocisk do znacznych prędkości, porównywalnych do prędkości otrzymywanych w prochowych układach miotających, przy stosunkowo niskich ciśnieniach gazu (zarówno w zbiorniku jak i lufie);
- b) początkowe ciśnienie  $p_{z0}$  gazu w zbiorniku ma istotny wpływ na prędkość wylotową  $V_w$  pocisku. Zwiększanie ciśnienia  $p_{z0}$  od 5 do 20 MPa pozwoliło zwiększyć prędkość wylotową o ok. 78%;
- c) zmiana ciśnienia ścinania  $p_{sc}$  w zakresie  $\pm 80\%$  wartości bazowej (10 MPa) przy przepływie z małymi stratami ( $\xi = 0,95$ ) ma niewielki wpływ na ciśnienie maksymalne  $p_m$  w lufie i praktycznie pomijalny na prędkość wylotową  $V_w$  pocisku. W przypadku przepływu gazu z dużymi stratami ( $\xi = 0,5$ ), wynikającymi np. z konstrukcji zaworu, wpływ przepony na zjawisko strzału jest silniejszy (zmiany  $p_m$  ok. 20% i  $V_w$  mniejsze od 3%, prezentowane na rysunkach 7 i 8);
- d) pole powierzchni  $F_m$  przekroju minimalnego kanału przepływowego oraz początkowa objętość  $W_0$  przestrzeni zapociskowej przewodu lufy w niewielkim stopniu wpływają na ciśnienie maksymalne gazu w lufie i prędkość wylotową pocisku (zmiany  $p_m$  ok. 4% i  $V_w$  ok. 2%);
- e) symulacje strzału z wykorzystaniem opracowanego modelu układu pneumatycznego zapewniają dobrą zgodność obliczeń z eksperymentem.

### LITERATURA

- [1] J. JANISZEWSKI, Z. SURMA, M. GRĄZKA, *Helowy układ miotający*, Problemy Mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa, WAT, 3(5), Warszawa, 2011, 97-106.
- [2] G. LEŚNIK, Z. SURMA, S. TORECKI, R. WOŹNIAK, *Termodynamiczny model działania broni z odprowadzeniem gazów prochowych w okresie napędzania suwadła*, Biul. WAT, 3, Warszawa, 2009, 193-209.
- [3] L. POPELINSKY, J. SADILEK, M. NOVAK, *Nonlethal gas gun. Analysis of internal ballistics*, 7<sup>th</sup> Symposium on weapon systems, Brno, 2005, 104-111.
- [4] Z. SURMA, *Uogólniony model balistyki wewnętrznej lufowych układów miotających*, Biul. WAT, 12, Warszawa, 2003, 111-123.

- [5] Z. SURMA, S. TORECKI, R. WOŹNIAK, *Model balistyczny układu miotającego z odprowadzeniem gazów prochowych*, Biul. WAT, 11, Warszawa, 2005, 43-56.
- [6] S. TORECKI, *Balistyka wewnętrzna*, WAT, Warszawa, 1980.
- [7] S. TORECKI, *Podstawy termodynamiczne balistyki wewnętrznej i silników raketowych*, WAT, Warszawa, 1986.
- [8] S. WIŚNIEWSKI, *Termodynamika techniczna*, WNT, Warszawa, 1980.

Z. SURMA

### **Interior ballistics thermodynamic model of a light gas gun**

**Abstract.** The paper presents physical model of a light gas gun and mathematical model of phenomena inside a barrel, from start gases outflow from gases' chamber to the moment of muzzle of the projectile. Numerical solution of the proposed equations for considered gun structural system gives pressures inside the barrel as well as motion parameters of the projectile. On the basis of calculation results, the influence of system parameters on main characteristics of considered gun propulsion system has been analysed.

**Keywords:** mechanics, interior ballistics, light gas gun