



## Napęd suwadła broni automatycznej w powylotowym okresie strzału

STANISŁAW TORECKI, ZBIGNIEW SURMA,  
RYSZARD WOŹNIAK

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki,  
Instytut Elektromechaniki,  
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

**Streszczenie.** Przedmiotem pracy jest analiza działania układu miotającego z odprowadzeniem gazów prochowych w okresie powylotowym. Przedstawiono model fizyczny rozpatrywanego układu oraz sformułowano równania opisujące zjawiska związane z przepływem gazów prochowych między lufą i komorą gazową, wypływem gazów z lufy za pociskiem oraz napędem zespołu suwadła (z tłokiem gazowym i tłoczyskiem). Wynikami rozwiązania zaprezentowanego modelu matematycznego są m.in. ciśnienia gazów prochowych w lufie i w komorze gazowej oraz prędkość i droga napędzanego zespołu suwadła. Na podstawie wykonanych obliczeń przeanalizowano wpływ parametrów konstrukcyjnych węzła gazowego, tj.: masy zespołu suwadła, powierzchni tłoka gazowego, początkowej objętości komory gazowej oraz powierzchni otworu gazowego na charakterystyki ruchu zespołu suwadła oraz ciśnienie w komorze gazowej na początku okresu powylotowego (do chwili odsłonięcia otworów przedmuchowych przez tłok gazowy).

**Słowa kluczowe:** balistyka wewnętrzna, broń automatyczna

**Symbole UKD:** 623.52

### Oznaczenia

$c_v$  — izochoryczne ciepło właściwe gazów prochowych;

$c_p$  — izobaryczne ciepło właściwe gazów prochowych;

$E$  — energia kinetyczna napędzanego zespołu suwadła;

$E_s$  — praca ściskania sprężyny powrotnej;

$F$  — siła sprężyny powrotnej;

$F_0$  — siła początkowego ugięcia sprężyny powrotnej;

$F_w$  — siła ugięcia sprężyny powrotnej w chwili wylotu pocisku z lufy;

- $I$  — entalpia gazów wypływających z lufy;  
 $I_k$  — entalpia gazów przepływających z lufy do komory gazowej;  
 $k$  — wykładnik adiabaty gazów prochowych;  
 $L$  — droga suwadła;  
 $L_w$  — droga suwadła w chwili wylotu pocisku;  
 $m$  — chwilowa masa gazów prochowych w lufie;  
 $m_k$  — chwilowa masa gazów prochowych w komorze gazowej;  
 $m_{kw}$  — masa gazów prochowych w komorze gazowej w chwili wylotu pocisku;  
 $m_l$  — masa gazów prochowych, która wypłynęła z lufy do otoczenia;  
 $M$  — masa zespołu suwadła;  
 $\dot{m}_k$  — masowe natężenie przepływu gazów z lufy do komory gazowej;  
 $\dot{m}_l$  — masowe natężenie wypływu gazów z lufy do otoczenia;  
 $p$  — ciśnienie gazów prochowych w lufie;  
 $p_k$  — ciśnienie gazów prochowych w komorze gazowej;  
 $p_{kw}$  — ciśnienie gazów prochowych w komorze gazowej w chwili wylotu pocisku;  
 $p_w$  — ciśnienie gazów prochowych w przewodzie lufy w chwili wylotu pocisku;  
 $R$  — stała gazowa gazów prochowych;  
 $S$  — pole przekroju wylotowego lufy;  
 $S_0$  — pole przekroju poprzecznego otworu gazowego, łączącego przewód lufy z komorą gazową;  
 $S_k$  — pole powierzchni czołowej tłoka gazowego;  
 $T$  — temperatura gazów prochowych w lufie;  
 $T_k$  — temperatura gazów w komorze gazowej;  
 $U$  — chwilowa energia wewnętrzna gazów prochowych w lufie;  
 $U_k$  — chwilowa energia wewnętrzna gazów prochowych w komorze gazowej;  
 $V$  — prędkość suwadła;  
 $v_w$  — prędkość wylotowa pocisku;  
 $V_w$  — prędkość suwadła w chwili wylotu pocisku;  
 $W_k$  — chwilowa objętość komory gazowej;  
 $W_{k0}$  — początkowa objętość komory gazowej;  
 $W_w$  — objętość przewodu lufy;  
 $\theta = k - 1$ ; — funkcja wykładnika adiabaty;  
 $\rho$  — gęstość gazów prochowych w lufie;  
 $\rho_k$  — gęstość gazów prochowych w komorze gazowej;  
 $\rho_w$  — gęstość gazów prochowych w przewodzie lufy w chwili wylotu pocisku;  
 $\eta$  — sztywność sprężyny powrotnej;  
 $\xi$  — współczynnik strat;  
 $\omega$  — masa ładunku miotającego.

## 1. Wstęp

W automatycznej broni palnej, działającej na zasadzie odprowadzenia gazów prochowych, ruch suwadła (w kierunku przeciwnym do ruchu pocisku) rozpoczyna się w chwili mijania przez pocisk otworu gazowego. Od tej chwili do wylotu pocisku suwadło uzyskuje zaledwie kilka procent energii niezbędnej do realizacji cyklu przeładowania broni. Pozostałe ponad 90% energii gazy prochowe przekazują suwadłu po wylocie pocisku z lufy.

Metody obliczeń napędu suwadła w okresie poprzedzającym wylot pocisku przedstawiono w [1, 2]. Natomiast celem i przedmiotem niniejszej pracy jest prezentacja skutecznej metody praktycznych obliczeń wzajemnie sprzężonych ciśnień w lufie i komorze gazowej oraz parametrów ruchu swobodnego zespołu napędzanego suwadła w powylotowym okresie strzału. Metoda opracowana została przy założeniu adiabatyczności rozpatrywanych procesów (przemian) termodynamicznych, quasi-ustaloności wypływu z lufy i przepływu do komory gazowej gazów prochowych oraz sztywności elementów mechanicznych układu i szczelności suwliwego połączenia tłoka gazowego z komorą gazową. Dla przyjętego modelu fizycznego układu sformułowano równania problemu oraz opracowano algorytm i program symulacji numerycznej. Za pomocą opracowanego programu wykonano obliczenia ciśnień w lufie i komorze gazowej oraz prędkości i drogi napędzanego suwadła w rozpatrywanym okresie powylotowym. Przeanalizowano też wpływ różnych czynników konstrukcyjnych na efektywność napędu. Przedmiotem analiz był 5,56-milimetrowy karabinek automatyczny.

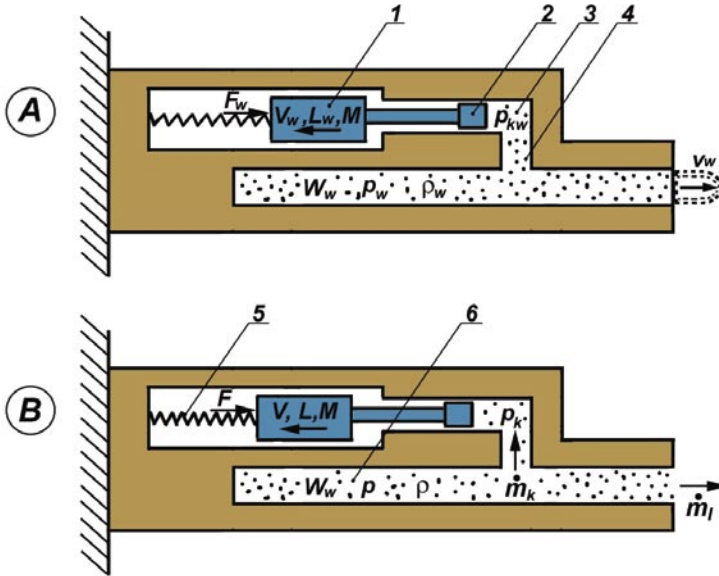
## 2. Model fizyczny układu

Model fizyczny badanego układu przedstawiono na rysunku 1. W stanie początkowym A (wylot pocisku,  $t = 0$ ) parametry układu oznaczono indeksem  $w$ . Parametry te stanowią dane początkowe do obliczeń odpowiednich funkcji w dowolnej chwili  $t > 0$  po wylocie pocisku z lufy (stan B). W rozpatrywanym okresie powylotowym prędkość  $V$  i droga  $L$  zespołu suwadła zwiększają się wskutek działania siły ciśnienia  $p_k$  na czołową powierzchnię tłoka gazowego. Jednocześnie maleje ciśnienie  $p$  w przewodzie lufy wskutek wypływu gazów prochowych (o natężeniu  $\dot{m}_l$ ) oraz przepływu (o natężeniu  $\dot{m}_k$ ) części gazów z lufy do komory gazowej. Natomiast ciśnienie  $p_k$  w komorze gazowej powinno początkowo zwiększać się, a następnie maleć, stosownie do zmian ciśnienia  $p$  w lufie.

## 3. Model matematyczny

W odniesieniu do rozpatrywanego układu (rys. 1) niewiadomymi funkcjami czasu  $t$  są ciśnienia gazów prochowych w przewodzie lufy  $p = p(t)$  i w komorze

gazowej  $p_k = p_k(t)$  oraz prędkość  $V = V(t)$  i droga (przemieszczenie)  $L = L(t)$  napędzanego zespołu suwadła.



Rys. 1. Model fizyczny badanego układu: *A* — stan początkowy (wylot pocisku z lufy); *B* — stan chwilowy po wylocie pocisku, 1 — suwadło, 2 — tłok gazowy, 3 — komora gazowa, 4 — otwór gazowy, 5 — sprężyna powrotna, 6 — lufa

W celu wyznaczenia wymienionych wielkości z uwzględnieniem ich wzajemnych powiązań (oddziaływań) sformułowano przedstawiony poniżej układ równań, stanowiący opis matematyczny problemu.

### 3.1. Równanie bilansu energii gazów prochowych w przewodzie lufy

Ogólnie bilans energii gazów prochowych w lufie z uwzględnieniem wpływu ich części do otoczenia (przez przekrój wylotowy) oraz przepływu do komory gazowej (przez otwór gazowy) możemy napisać następująco:

$$dU = -dI - dI_k. \quad (1)$$

Podstawiając 
$$dU = c_v d(mT) = \frac{1}{\theta} d(mRT) = \frac{W_w}{\theta} dp \quad (a_1)$$

oraz 
$$dI = c_p T d m_l = \frac{k}{\theta} RT \dot{m}_l dt = \frac{k}{\theta} \left( \frac{p}{\rho} \right) \dot{m}_l dt \quad (b_1)$$

$$dI_k = c_p T d m_k = \frac{k}{\theta} RT \dot{m}_k dt = \frac{k}{\theta} \left( \frac{p}{\rho} \right) \dot{m}_k dt \quad (c_1)$$

do (1), otrzymamy

$$W_w \frac{dp}{dt} = -k \left( \frac{p}{\rho} \right) \left( \dot{m}_l + \dot{m}_k \right). \quad (1a)$$

Powyżej wykorzystano zależności:

$$c_v = \frac{R}{\theta}, \quad c_p = \frac{kR}{\theta}, \quad RT = \frac{p}{\rho}, \quad mRT = pW_w, \quad \dot{m}_l = \frac{dm_l}{dt}, \quad \dot{m}_k = \frac{dm_k}{dt}.$$

W rozpatrywanym okresie (powylotowym) może wystąpić również przepływ gazów z komory gazowej do lufy. Wówczas po uwzględnieniu

$$dI_k = c_p T_k d m_k = \frac{k}{\theta} RT_k \dot{m}_k dt = \frac{k}{\theta} \left( \frac{p_k}{\rho_k} \right) \dot{m}_k dt \quad (d_1)$$

otrzymamy bilans energii gazów prochowych w lufie w postaci

$$W_w \frac{dp}{dt} = -k \left( \frac{p}{\rho} \right) \dot{m}_l - k \left( \frac{p_k}{\rho_k} \right) \dot{m}_k. \quad (1b)$$

### 3.2. Równanie bilansu energii układu napędowego suwadła

Dopływające do komory gazowej gazy prochowe (z entalpią  $I_k$ ) powiększają energię kinetyczną zespołu suwadła oraz wykonują pracę ściskania sprężyny powrotnej. Biorąc to pod uwagę, bilans energetyczny układu napędowego suwadła możemy ogólnie napisać następująco:

$$dU_k = dI_k - dE - dE_s. \quad (2)$$

Podstawiając

$$dU_k = c_v d(m_k T_k) = \frac{1}{\theta} d(m_k RT_k) = \frac{1}{\theta} d(p_k W_k) = \frac{1}{\theta} (W_k dp_k + p_k dW_k) \quad (a_2)$$

$$dE = d \left( M \frac{V^2}{2} \right) = M V dV = (S_k p_k - F) dL \quad (b_2)$$

$$dE_s = F dL = (F_0 + \eta L) dL \quad (c_2)$$

gdzie:  $W_k = W_{k0} + S_k L$ ,

otrzymamy

$$(W_{k0} + S_k L) \frac{dp_k}{dt} = k \left( \frac{p}{\rho} \right) \dot{m}_k - k S_k p_k V. \quad (2a)$$

Przy przepływie zwrotnym (z komory gazowej do lufy), uwzględniając w równaniu (2) entalpię ( $d_1$ ), otrzymamy bilans energii w komorze gazowej w postaci

$$(W_{k0} + S_k L) \frac{dp_k}{dt} = k \left( \frac{p_k}{\rho_k} \right) \dot{m}_k - k S_k p_k V. \quad (2b)$$

### 3.3. Zależności dodatkowe

W równaniach bilansu energii (1a, 1b) oraz (2a, 2b) występuje 8 funkcji czasu  $t$ :  $p$ ,  $\rho$ ,  $p_k$ ,  $\rho_k$ ,  $V$ ,  $L$ ,  $\dot{m}_l$  i  $\dot{m}_k$ . Do rozwiązania problemu niezbędne jest zatem uzupełnienie równań (1) i (2) sześcioma zależnościami dodatkowymi.

Masowe natężenie  $\dot{m}_l$  wypływu gazów z przewodu lufy oraz masowe natężenie  $\dot{m}_k$  przepływu z lufy do komory gazowej określają znane zależności termodynamiczne [4]:

$$\dot{m}_l = S K_0 \sqrt{p\rho} \quad (3)$$

$\dot{m}_k$  przy przepływie z lufy do komory gazowej

$$\dot{m}_k = \begin{cases} \xi S_0 K_0 \sqrt{p\rho} & \text{dla } \frac{p_k}{p} \leq \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \xi S_0 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[ \left( \frac{p_k}{p} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_k}{p} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} p\rho & \text{dla } \frac{p_k}{p} > \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases} \quad (4)$$

$\dot{m}_k$  przy przepływie z komory gazowej do lufy

$$\dot{m}_k = \begin{cases} -\xi S_0 K_0 \sqrt{p_k \rho_k} & \text{dla } \frac{p}{p_k} \leq \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \\ -\xi S_0 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[ \left( \frac{p}{p_k} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p}{p_k} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} p_k \rho_k & \text{dla } \frac{p}{p_k} > \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases} \quad (4a)$$

$$\text{gdzie: } K_0 = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}}.$$

Gęstości gazów w lufie  $\rho$  i w komorze gazowej  $\rho_k$  można wyznaczyć z równań

$$\rho = \frac{\omega - m_l - m_k}{W_w} \quad (5)$$

$$\rho_k = \frac{m_k}{W_k} = \frac{m_k}{W_{k0} + S_k L}, \quad (6)$$

$$\text{gdzie: } m_l = \int_0^t \dot{m}_l dt, \quad m_k = \int_0^t \dot{m}_k dt + m_{kw}.$$

Po uwzględnieniu (3), (4), (5) i (6) układ równań wystarczy uzupełnić równaniami mechaniki napędzanego zespołu suwadła

$$S_k p_k - F = M \frac{dV}{dt} \quad (7)$$

$$V = \frac{dL}{dt}. \quad (8)$$

Do rozwiązania zamkniętego układu równań (1) do (8) niezbędne są warunki początkowe (dla  $t = 0$ ), określane według [2], a mianowicie:  $p = p_w$ ,  $p_k = p_{kw}$ ,  $V = V_w$ ,  $L = L_w$ ,  $m_k = m_{kw}$  oraz odpowiednie dane konstrukcyjne rozpatrywanego układu (modelu fizycznego):  $W_w$ ,  $S$ ,  $\omega$ ,  $k$ ,  $S_0$ ,  $S_k$ ,  $W_{k0}$ ,  $M$ ,  $\xi$ ,  $\eta$ ,  $F_0$ .

#### 4. Wyniki symulacji

Przedstawione w punkcie 3 równania różniczkowe 1-4 oraz 7 i 8 rozwiązano numerycznie metodą Rungego-Kutty. Niezbędne do obliczeń dane wejściowe [2] przedstawiono w tabeli 1.

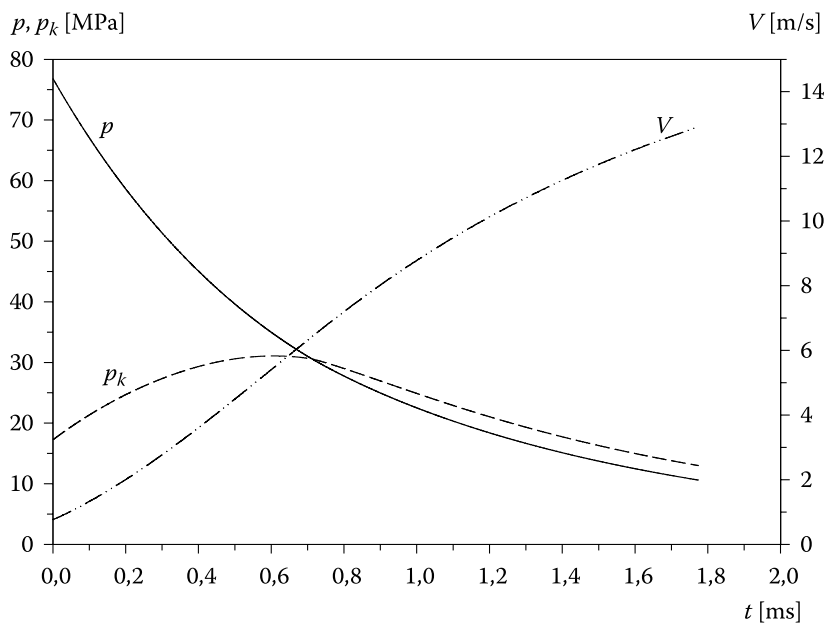
Obliczenia realizowane z krokiem  $5 \mu\text{s}$ , przerywano w chwili odślonięcia przez tłok zespołu suwadła otworów przedmuchowych.

Wynikami obliczeń są m.in. ciśnienie  $p$  gazów w lufie, ciśnienie  $p_k$  gazów w komorze gazowej oraz prędkość  $V$  zespołu suwadła, przedstawione na rysunkach 2 i 3. Ponadto na rysunkach 4-9 przedstawiono wpływ wybranych parametrów zespołu suwadła ( $M$ ,  $S_k$ ) i węzła gazowego ( $W_{k0}$ ,  $S_0$ ) na prędkość  $V$  suwadła i ciśnienie  $p_k$  w komorze gazowej. Ze względu na pomijalnie małą zależność ciśnienia w komorze gazowej od zmian masy suwadła  $M$  i powierzchni czołowej  $S_k$  tłoka gazowego, nie przedstawiono ich na wykresach.

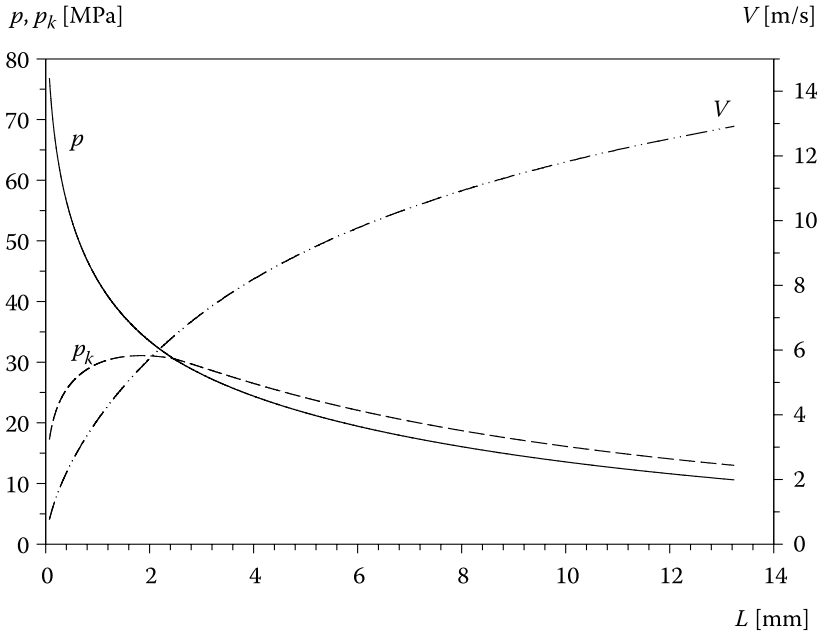
TABELA 1

Dane do symulacji ruchu suwadła w powylotowym okresie strzału

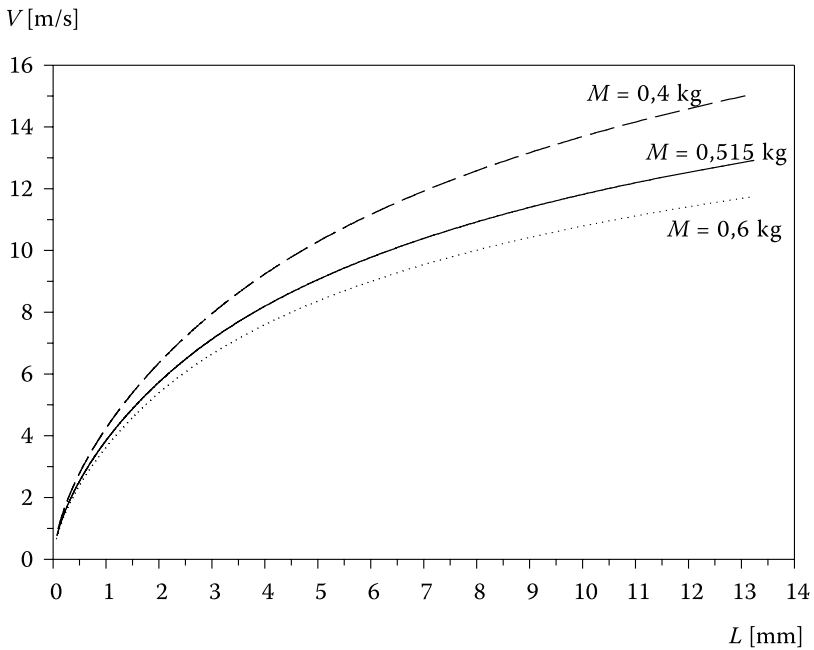
Masa ładunku miotającego	$\omega$ [g]	1,52
Pole przekroju poprzecznego przewodu lufy	$S$ [mm <sup>2</sup> ]	24,75
Objętość komory nabojeowej lufy	$W_0$ [cm <sup>3</sup> ]	1,96
Całkowita droga pocisku w przewodzie lufy	$l_w$ [m]	0,4765
Pole przekroju poprzecznego otworu gazowego, łączącego przewód lufy z komorą gazową	$S_0$ [mm <sup>2</sup> ]	2,27
Objętość początkowa komory gazowej	$W_{k0}$ [cm <sup>3</sup> ]	2,648
Pole powierzchni czołowej tłoka gazowego	$S_k$ [mm <sup>2</sup> ]	153,9
Masa zespołu suwadła	$M$ [kg]	0,516
Sztywność sprężyny powrotnej	$\eta$ [N/m]	464
Siła początkowego ugięcia sprężyny powrotnej	$F_0$ [N]	55,9
Droga zespołu suwadła do otworów przedmuchowych	$x_p$ [mm]	13,2
Współczynnik strat przepływu gazów	$\xi$	1
Wykładnik adiabaty gazów prochowych	$k$	1,25

Rys. 2. Wykresy ciśnień  $p$  w lufie i  $p_k$  w komorze gazowej oraz prędkości  $V$  zespołu suwadła w funkcji czasu  $t$

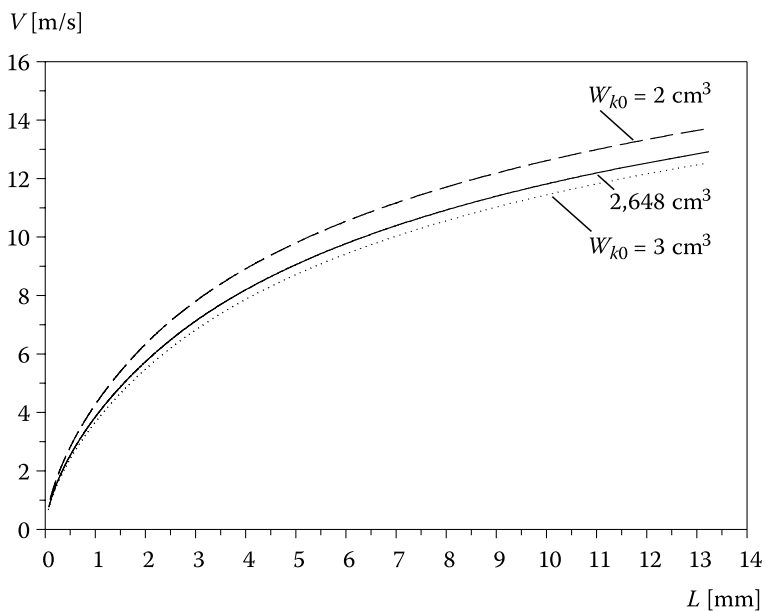




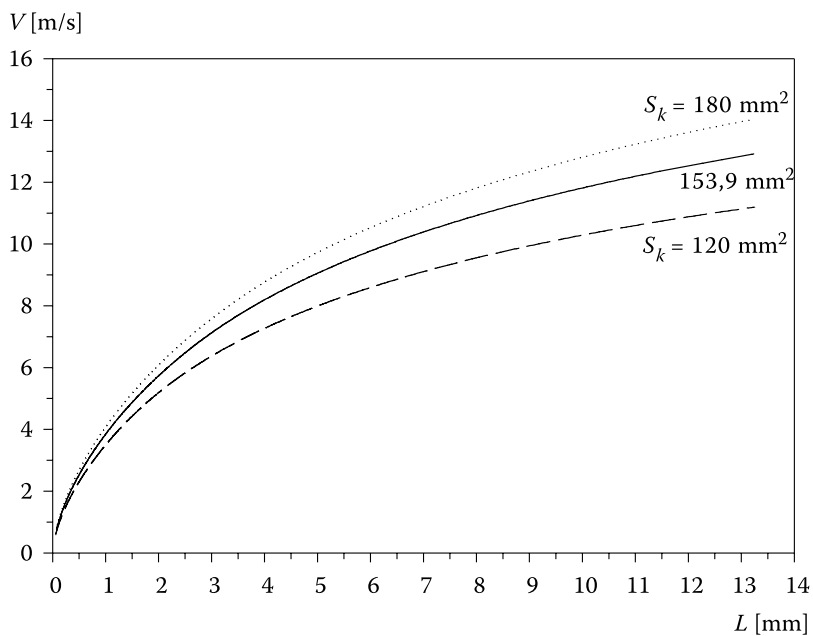
Rys. 3. Wykresy ciśnień  $p$  w lufie i  $p_k$  w komorze gazowej oraz prędkości  $V$  zespołu suwadła w funkcji drogi  $L$  suwadła



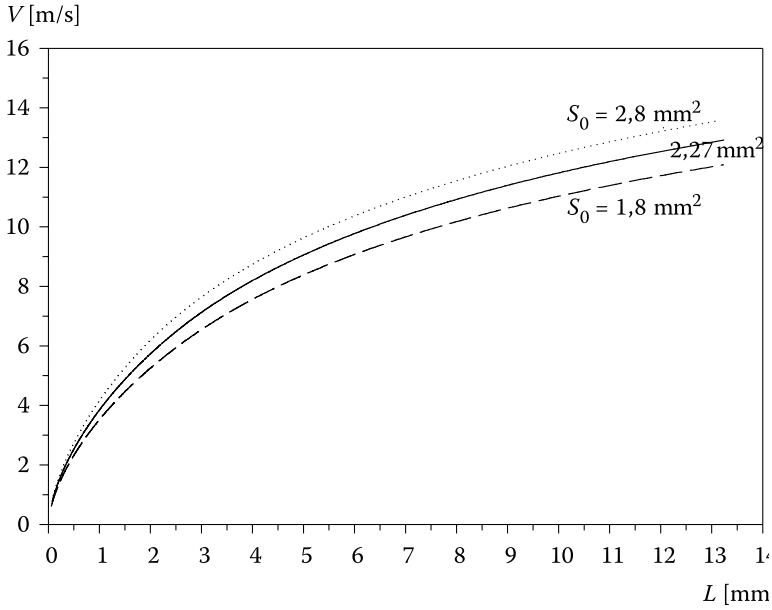
Rys. 4. Wykresy zależności prędkości  $V$  zespołu suwadła od jego masy  $M$



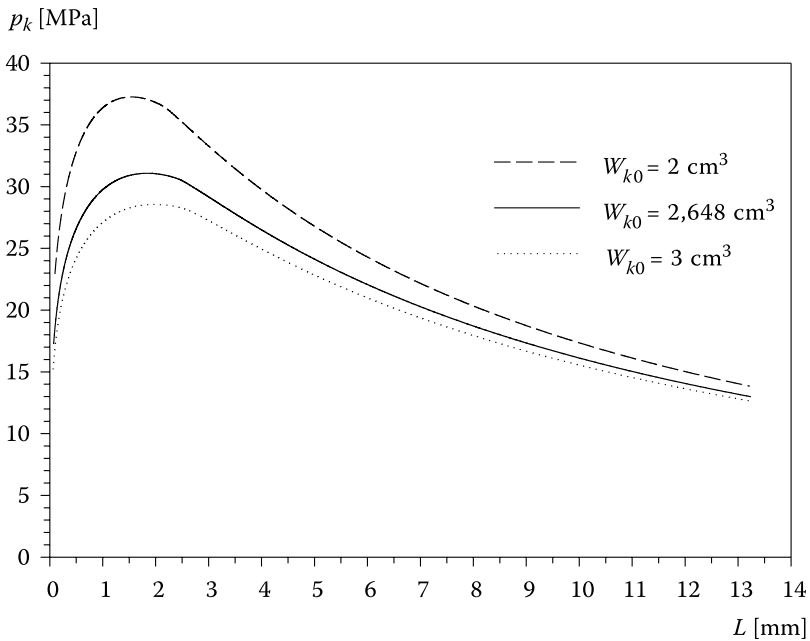
Rys. 5. Wykresy zależności prędkości  $V$  zespołu suwadła od początkowej objętości  $W_{k0}$  komory gazowej



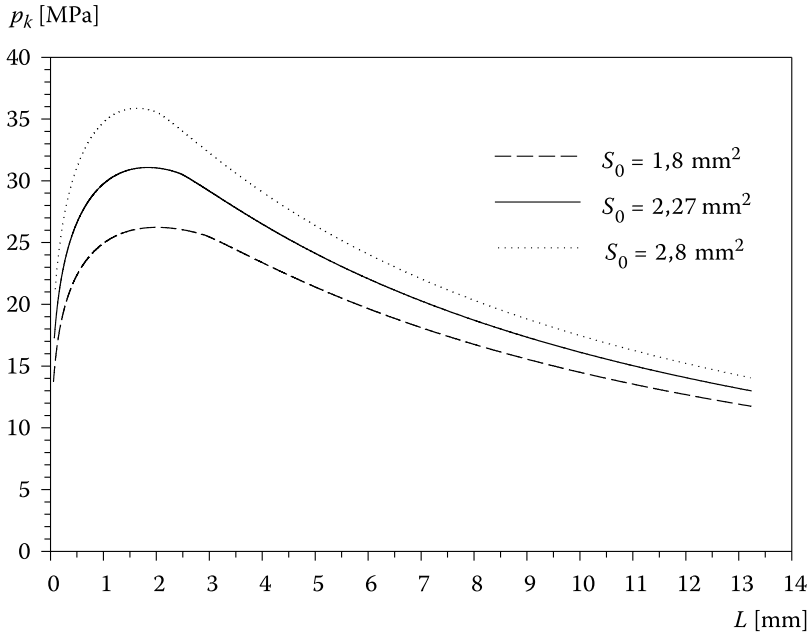
Rys. 6. Wykresy zależności prędkości  $V$  zespołu suwadła od powierzchni czołowej  $S_k$  tłoka gazowego



Rys. 7. Wykresy zależności prędkości  $V$  zespołu suwadła od pola  $S_0$  przekroju poprzecznego otworu gazowego



Rys. 8. Wykresy zależności ciśnienia  $p_k$  w komorze gazowej od początkowej objętości  $W_{k0}$  komory gazowej



Rys. 9. Wykresy zależności ciśnienia  $p_k$  w komorze gazowej od pola  $S_0$  przekroju poprzecznego otworu gazowego

## 5. Wnioski i uwagi końcowe

Zaprezentowany model matematyczny napędu zespołu suwadła w powylotowym okresie strzału oraz opracowany na jego podstawie program komputerowy umożliwiają obliczenia parametrów ruchu suwadła oraz ciśnień w lufie i w komorze gazowej. Przeprowadzone symulacje i otrzymane wyniki pozwalają wyciągnąć m.in. następujące wnioski:

- na początku okresu powylotowego następuje stosunkowo szybko wyrównanie ciśnień w lufie  $p$  i w komorze gazowej  $p_k$ . Chwila zrównania obu ciśnień następuje tym szybciej, im mniejsza jest początkowa objętość  $W_{k0}$  komory gazowej i im większe jest pole  $S_0$  przekroju poprzecznego otworu gazowego, łączącego przewód lufy z komorą gazową;
- wskutek intensywnego wypływu gazów prochowych z lufy do otoczenia, ciśnienie  $p$  w lufie może po pewnym czasie obniżyć się do wartości mniejszych od ciśnienia  $p_k$  w komorze gazowej; rozpoczyna się wówczas przepływ gazów z komory gazowej do lufy. Nie ma to jednak praktycznego wpływu na działanie automatyki broni;
- z rozpatrywanych parametrów konstrukcyjnych broni największy wpływ na prędkość  $V$ , a tym samym na energię kinetyczną suwadła, mają: masa

$M$  suwadła oraz powierzchnia czołowa  $S_k$  tłoka gazowego. Zmiany parametrów konstrukcyjnych mają wpływ na ruch suwadła jeszcze w okresie ruchu pocisku w lufie, czego konsekwencją są różne prędkości  $V_w$  suwadła w chwili wylotu pocisku, stanowiące warunki początkowe do obliczeń okresu powylotowego;

- d) energia kinetyczna suwadła w chwili wylotu pocisku z lufy stanowi mniej niż 1% jego energii w chwili odsłonięcia otworów przedmuchiowych.

Artykuł wpłynął do redakcji 21.02.2006 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w kwietniu 2006 r.

#### LITERATURA

- [1] Z. SURMA, S. TORECKI, R. WOŹNIAK, *Badania symulacyjne jednoczesnego napędu pocisku i suwadła w broni z odprowadzeniem gazów*, Biul. WAT, nr 9, Warszawa, 2004.
- [2] Z. SURMA, S. TORECKI, R. WOŹNIAK, *Model balistyczny układu miotającego z odprowadzeniem gazów prochowych*, Biul. WAT, nr 11, Warszawa, 2005.
- [3] S. TORECKI, *Balistyka wewnętrzna*, WAT, Warszawa, 1980.
- [4] S. WIŚNIEWSKI, *Termodynamika techniczna*, WNT, Warszawa, 1980.

S. TORECKI, Z. SURMA, R. WOŹNIAK

#### **Propulsion of automatic weapon slide in muzzle period of shooting**

**Abstract.** The analysis of operation of a gun propulsion system with outflow of propellant gases in muzzle period of shooting is presented in this paper. Physical model of the considered system is given and the equations describing phenomena connected with powder gases flow between the barrel and the gas chamber, gases outflow from the barrel behind the bullet and slide unit (with piston and rod) motion were formulated. Gases pressures inside the barrel and the gas chamber as well as velocity and travel of slide unit are the main results of solution of the presented mathematical model. On the basis of the accomplished calculations, influence of changes in some structural parameters (like slide unit mass, cross-sectional area of the gas piston, gas chamber initial volume and cross-sectional area of gasport) on motion parameters of slide and gases pressure inside the gas chamber at the beginning of muzzle period has been analysed.

**Keywords:** interior ballistics, automatic weapon

**Universal Decimal Classification:** 623.52

