



## Termodynamiczny model działania broni z odprowadzeniem gazów prochowych w okresie napędzania suwadła

GRZEGORZ LEŚNIK, ZBIGNIEW SURMA, STANISŁAW TORECKI,  
RYSZARD WOŹNIAK

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

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono model fizyczny broni automatycznej działającej na zasadzie odprowadzenia części gazów prochowych z przestrzeni zapociskowej przewodu lufy oraz termodynamiczny model matematyczny zjawisk zachodzących w lufie i komorze gazowej od chwili odsłonięcia otworu gazowego do chwili zakończenia działania ciśnienia gazów prochowych na zespół suwadła. W wyniku numerycznego rozwiązania zaproponowanych równań otrzymuje się m.in. ciśnienie w komorze gazowej oraz charakterystyki ruchu napędzanego zespołu suwadła (z tłokiem i tłoczyskiem) dla przyjętego układu konstrukcyjnego broni. Przedstawiony model matematyczny oraz opracowany na jego podstawie program komputerowy mogą stanowić podstawę projektowania broni automatycznej z odprowadzeniem gazów.

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

**Symbole UKD:** 623.52

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

- $c_p$  — izobaryczne ciepło właściwe gazów prochowych;
- $c_v$  — izochoryczne ciepło właściwe gazów prochowych;
- $E$  — prace wykonane przez gazy prochowe w lufie;
- $E_s$  — energia potencjalna sprężyny powrotnej;
- $E_{zo}$  — energia kinetyczna zespołu odrzucanego broni;
- $F_p$  — pole powierzchni przekroju poprzecznego otworu, którym gazy prochowe przepływają z lufy do komory gazowej;
- $F_r$  — pole powierzchni przekroju poprzecznego otworu, którym gazy prochowe wypływają z komory gazowej do otoczenia;

- $I$  — entalpia gazów prochowych przepływających z lufy do komory gazowej lub komory gazowej do lufy;  
 $I_r$  — entalpia gazów prochowych wypływających z komory gazowej do otoczenia;  
 $I_w$  — entalpia gazów prochowych przepływających z lufy do otoczenia;  
 $k$  — wykładnik adiabaty gazów prochowych;  
 $k_s$  — sztywność sprężyny powrotnej;  
 $l$  — przemieszczenie (droga) pocisku w przewodzie lufy;  
 $l_{ot}$  — droga pocisku w lufie do otworu gazowego;  
 $l_w$  — całkowita droga pocisku w przewodzie lufy;  
 $L$  — droga zespołu suwadła;  
 $L_p$  — droga zespołu suwadła do otworów przedmuchowych;  
 $m$  — masa pocisku;  
 $M$  — masa zespołu suwadła;  
 $p$  — ciśnienie gazów prochowych w lufie;  
 $p_{ot}$  — ciśnienie gazów prochowych w lufie w chwili odsłonięcia otworu gazowego przez pocisk;  
 $p_k$  — ciśnienie gazów prochowych w komorze gazowej;  
 $p_{kw}$  — ciśnienie gazów w komorze gazowej w chwili wylotu pocisku z lufy;  
 $Q$  — ciepło dostarczane do przestrzeni zapociskowej przewodu lufy w wyniku spalania ładunku miotającego;  
 $q_s$  — ciepło spalania prochu, z którego wykonany jest ładunek miotający;  
 $R$  — stała gazowa gazów prochowych;  
 $s$  — pole przekroju poprzecznego przewodu lufy;  
 $s_k$  — pole przekroju poprzecznego komory gazowej;  
 $s_t$  — pole przekroju poprzecznego tłoka gazowego;  
 $S_1$  — początkowe pole powierzchni ziaren prochowych ładunku miotającego;  
 $t$  — czas;  
 $T$  — temperatura gazów prochowych w lufie;  
 $T_k$  — temperatura gazów prochowych w komorze gazowej;  
 $T_0$  — temperatura początkowa;  
 $T_1$  — temperatura spalania prochu;  
 $u_1$  — współczynnik liniowego prawa szybkości spalania prochu;  
 $U$  — energia wewnętrzna gazów prochowych w lufie;  
 $U_k$  — energia wewnętrzna gazów prochowych w komorze gazowej;  
 $V$  — prędkość pocisku;  
 $V_{ot}$  — prędkość pocisku w chwili odsłonięcia otworu gazowego;  
 $W$  — prędkość zespołu odrzucanego broni;  
 $W_0$  — objętość komory naboju lufy;  
 $W_{k0}$  — objętość początkowa komory gazowej;  
 $x_0$  — wstępne ugięcie sprężyny powrotnej;  
 $\alpha$  — kowolumen gazów prochowych;

- $\beta$  — względna masa gazów, które wypłynęły z komory gazowej do otoczenia;  
 $\gamma$  — względna masa gazów, które wypłynęły z lufy do otoczenia;  
 $\delta$  — gęstość prochu;  
 $\zeta$  — współczynnik strat przepływu gazów z lufy do komory gazowej;  
 $\zeta_r$  — współczynnik strat wypływu gazów z komory gazowej do otoczenia;  
 $\zeta_w$  — współczynnik strat wypływu gazów z lufy do otoczenia;  
 $\eta$  — względna masa gazów, które przepłynęły z lufy do komory gazowej;  
 $\theta$  — funkcja wykładnika adiabaty  $k$  gazów prochowych ( $\theta = k - 1$ );  
 $\chi_1, \lambda_1$  — współczynniki kształtu ziaren prochowych;  
 $\Lambda_1$  — początkowa objętość ziaren prochowych;  
 $\varphi$  — współczynnik prac drugorzędnych gazów prochowych;  
 $\psi$  — względna część spalonego ładunku miotającego;  
 $\psi_{ot}$  — względna część spalonego ładunku miotającego w chwili odsłonięcia otworu gazowego przez pocisk;  
 $\omega$  — masa ładunku miotającego.

## 1. Wstęp

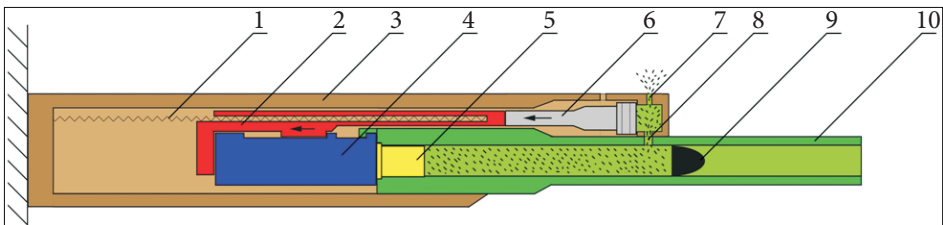
Jednym z najbardziej rozpowszechnionych sposobów napędzania części mechanizmów przeładowania małokalibrowej automatycznej broni palnej jest wykorzystanie energii części gazów prochowych, odprowadzanych z przestrzeni zapociskowej przewodu lufy do komory gazowej. Od charakterystyk geometryczno-masowych węzła gazowego zależy charakter przepływu gazów z lufy do komory gazowej, a w konsekwencji dynamika ruchu napędzanych elementów broni. Napęd zespołu suwadła można umownie podzielić na dwa okresy: pierwszy — trwający od chwili odsłonięcia otworu gazowego do wylotu pocisku z lufy i drugi — od wylotu pocisku do zakończenia działania gazów prochowych na napędzany zespół suwadła. Jak wynika z wcześniejszych badań [1], energia kinetyczna zespołu suwadła w końcu pierwszego okresu (w chwili wylotu pocisku z lufy) stanowi zaledwie kilka procent energii niezbędnej do prawidłowego działania automatyki broni. Pozostała część energii przekazywana jest zespołowi suwadła w drugim (powygotowym) okresie.

W związku z powyższym, celem niniejszej pracy będzie model fizyczny i matematyczny specyfiki działania broni z odprowadzeniem gazów prochowych. Dla rozpatrywanego układu sformułowano model matematyczny zjawisk zachodzących w lufie i komorze gazowej od chwili odsłonięcia otworu gazowego do chwili zakończenia działania gazów prochowych na zespół suwadła. W wyniku numerycznego rozwiązania (za pomocą opracowanego programu) przedstawionych równań otrzymuje się m.in. wykresy ciśnienia w komorze gazowej oraz charakterystyk ruchu (prędkości i drogi) napędzanych zespołu suwadła dla przyjętego układu konstrukcyjnego broni.

## 2. Model fizyczny układu lufa–węzeł gazowy

### 2.1. Okres I — od chwili odsłonięcia otworu gazowego do chwili wylotu pocisku

W czasie ruchu pocisku od otworu gazowego do wylotu lufy ( $l_{ot} < l \leq l_w$ ) występuje przepływ części gazów prochowych z przestrzeni zapociskowej przewodu lufy do komory gazowej. Wskutek tego siła ciśnienia  $p_k$  gazów w komorze gazowej napędza zespół suwadła o masie  $M$ , nadając mu prędkość  $W$  i energię kinetyczną  $E_{zo}$ . W tym okresie może też występować przepływ gazów z komory gazowej do lufy (przestrzeni zapociskowej). Ponadto przez zastosowany w komorze gazowej zawór regulacyjny część gazów wypływa z komory gazowej do otoczenia. Schemat układu w rozpatrywanym okresie przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Model fizyczny układu w I okresie: 1 — sprężyna powrotna; 2 — zespół suwadła; 3 — komora zamkowa; 4 — zamek; 5 — huska; 6 — tłok gazowy; 7 — otwór (zawór) regulacyjny; 8 — boczny otwór w lufie; 9 — pocisk; 10 — lufa

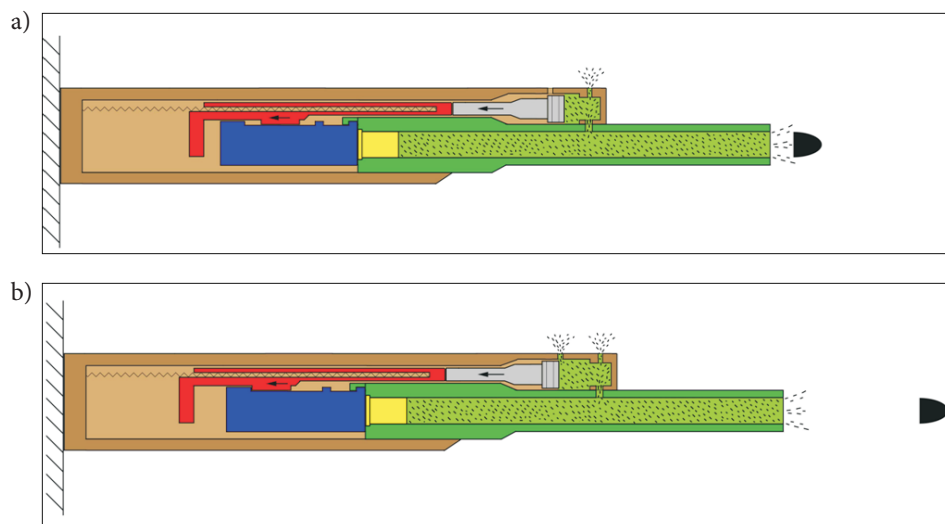
Charakterystyki w końcu tego okresu, a w szczególności ciśnienie  $p_w$  gazów prochowych w lufie, ciśnienie  $p_{kw}$  gazów prochowych w komorze gazowej oraz droga  $L_w$  i prędkość  $W_w$  odrzucanego zespołu, będą warunkami początkowymi do analizy okresu II (powyłotowego).

### 2.2. Okres II — od chwili wylotu pocisku z lufy (powyłotowy)

Model fizyczny badanego układu w okresie II przedstawiono na rysunku 2.

W rozpatrywanym okresie (powyłotowym) prędkość  $W$  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 do otoczenia przez przekrój  $s$  oraz przepływu części gazów z lufy do komory gazowej przez otwór gazowy. W okresie tym nie można również wykluczyć przepływu zwrotnego gazów prochowych (z komory gazowej do lufy). Natomiast ciśnienie  $p_k$  w komorze gazowej powinno się początkowo

zwiększać, a następnie maleć (lub tylko maleć), stosownie do zmian ciśnienia  $p$  w lufie.



Rys. 2. Model fizyczny układu w II okresie: a) w początkowym etapie okresu II; b) po odsłonięciu otworów przedmuchiowych przez tłok gazowy (koniec okresu II)

### 3. Model matematyczny

Przedmiotem opisu matematycznego będą zjawiska zachodzące w lufie oraz w komorze gazowej, związane m.in.:

- ze spalaniem ładunku miotającego,
- napędzaniem pocisku i zespołu suwadła,
- przepływem części gazów między przestrzenią zapociskową przewodu lufy i komorą gazową,
- wypływem części gazów z komory gazowej przez otwór regulacyjny do otoczenia,
- wypływem (po wylocie pocisku) części gazów z lufy do otoczenia.

Model matematyczny działania rozpatrywanego układu został opracowany przy założeniu adiabatyczności rozpatrywanych procesów (przemian) termodynamicznych, quasiustaloności wypływu (z lufy, z komory gazowej) i przepływu (między lufą i komorą gazową) gazów prochowych oraz sztywności elementów mechanicznych układu i szczelności suwliwego połączenia tłoka gazowego z komorą gazową.

Ze względu na specyfikę rozpatrywanego układu, jego działanie podzielone zostało na dwa okresy charakterystyczne.

### 3.1. Równania problemu w okresie I

W okresie I występuje przepływ części gazów z lufy do komory gazowej oraz wypływ części gazów z komory gazowej przez otwór (zawór) regulacyjny do otoczenia. Ponadto w okresie tym odbywa się równoczesny napęd pocisku oraz zespołu suwadła. W zależności od konstrukcji komory gazowej i parametrów ją charakteryzujących, możliwy jest również w tym okresie przepływ gazów z komory gazowej do lufy. Równania tego okresu to:

— równanie bilansu energii w przewodzie lufy

a) przy przepływie gazów prochowych z lufy do komory gazowej

$$dU = dQ - dE - dI \quad (1)$$

po podstawieniu:

$$dU = d[c_v \omega (\psi - \eta) T] = c_v \omega [T(d\psi - d\eta) + (\psi - \eta)dT]$$

$$dQ = d[c_v (T_1 - T_0) \omega \psi] = q_s \omega d\psi$$

$$dE = d\left(\varphi \frac{mV^2}{2}\right) = \varphi m V dV$$

$$dI = c_p \omega T d\eta$$

równanie (1) przyjmuje postać

$$\frac{dRT}{dt} = \frac{(\theta q_s - RT) \omega \frac{d\psi}{dt} - \theta RT \omega \frac{d\eta}{dt} - \theta \varphi m V \frac{dV}{dt}}{\omega (\psi - \eta)} \quad (1a)$$

b) przy przepływie gazów prochowych z komory gazowej do lufy

$$dU = dQ - dE + dI \quad (2)$$

po podstawieniu:

$$dU = d[c_v \omega (\psi - \eta) T] = c_v \omega [T(d\psi - d\eta) + (\psi - \eta)dT]$$

$$dQ = d[c_v (T_1 - T_0) \omega \psi] = q_s \omega d\psi$$

$$dE = d\left(\varphi \frac{mV^2}{2}\right) = \varphi mVdV$$

$$dI = -c_p \omega T_k d\eta$$

otrzymamy

$$\frac{dRT}{dt} = \frac{(\theta q_s - RT)\omega \frac{d\psi}{dt} + (RT - kRT_k)\omega \frac{d\eta}{dt} - \theta\varphi mV \frac{dV}{dt}}{\omega(\psi - \eta)} \quad (2a)$$

— równanie bilansu energii w komorze gazowej

a) przy przepływie gazów prochowych z lufy do komory gazowej

$$dU_k = dI - dE_{zo} - dE_s - dI_r \quad (3)$$

po uwzględnieniu:

$$dU_k = d(c_v \omega (\eta - \beta) T_k) = c_v \omega (T_k (d\eta - d\beta) + (\eta - \beta) dT_k)$$

$$dI = c_p \omega T d\eta$$

$$dE_{zo} = d\left(M \frac{W^2}{2}\right) = MWdW$$

$$dE_s = d\left[k_s \left(\frac{L^2}{2} + x_0 L\right)\right] = k_s (L + x_0) dL$$

$$dI_r = c_p \omega T_k d\beta$$

będziemy mieli

$$\frac{dRT_k}{dt} = \frac{(kRT - RT_k)\omega \frac{d\eta}{dt} - \theta \left( MW \frac{dW}{dt} + k_s (L + x_0) W + RT_k \omega \frac{d\beta}{dt} \right)}{\omega(\eta - \beta)} \quad (3a)$$

b) przy przepływie gazów prochowych z komory gazowej do lufy

$$dU_k = -dI - dE_{zo} - dE_s - dI_r \quad (4)$$

po uwzględnieniu:

$$dU_k = d(c_v \omega (\eta - \beta) T_k) = c_v \omega (T_k (d\eta - d\beta) + (\eta - \beta) dT_k)$$

$$dI = -c_p \omega T_k d\eta$$

$$dE_{zo} = d\left(M \frac{W^2}{2}\right) = MWdW$$

$$dE_s = d\left[k_s \left(\frac{L^2}{2} + x_0 L\right)\right] = k_s (L + x_0) dL$$

$$dI_r = c_p \omega T_k d\beta$$

będzie

$$\frac{dRT_k}{dt} = \frac{\theta \left( RT_k \omega \left( \frac{d\eta}{dt} - \frac{d\beta}{dt} \right) - MW \frac{dW}{dt} - k_s (L + x_0) W \right)}{\omega(\eta - \beta)} \quad (4a)$$

— równanie stanu gazów prochowych w lufie

$$p = \frac{\omega(\psi - \eta)RT}{W_0 + s_l - \frac{\omega}{\delta}(1 - \psi) - \alpha\omega(\psi - \eta)} \quad (5)$$

— równanie stanu gazów prochowych w komorze gazowej

$$p_k = \frac{\omega(\eta - \beta)RT_k}{W_{k0} + s_k L - \alpha\omega(\eta - \beta)} \quad (6)$$

— równania względnej masowej szybkości przepływu gazów z lufy do komory gazowej

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{\xi F_p}{\omega} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}} \frac{p}{\sqrt{RT}} \quad \text{przy} \quad p_k \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} p \quad (7)$$

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{\xi F_p}{\omega} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[ \left(\frac{p_k}{p}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_k}{p}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \frac{p}{\sqrt{RT}} \quad \text{przy} \quad p_k > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} p \quad (7a)$$

— równania względnej masowej szybkości przepływu gazów z komory gazowej do lufy



$$\frac{d\eta}{dt} = -\frac{\xi F_p}{\omega} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}} \frac{p_k}{\sqrt{RT_k}} \quad \text{przy } p \leq \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} p_k \quad (8)$$

$$\frac{d\eta}{dt} = -\frac{\xi F_p}{\omega} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[ \left(\frac{p}{p_k}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p}{p_k}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \frac{p_k}{\sqrt{RT_k}} \quad \text{przy } p > \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} p_k \quad (8a)$$

— równanie względnej masowej szybkości wypływu gazów z komory gazowej do otoczenia

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{\xi_r F_r}{\omega} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}} \frac{p_k}{\sqrt{RT_k}} \quad (9)$$

— równanie ruchu zespołu suwadła

$$\frac{dW}{dt} = \frac{p_k s_t - k_s (L + x_0)}{M} \quad (10)$$

— równanie prędkości zespołu suwadła

$$\frac{dL}{dt} = W \quad (11)$$

— równanie względnej masowej szybkości spalania ładunku miotającego (dopływu gazów)

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{S_1}{\Lambda_1} \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda_1}{\chi_1} \psi \cdot u_1 p} \quad (12)$$

— równanie ruchu postępowego pocisku

$$\frac{dV}{dt} = \frac{sp}{\varphi m}, \quad (13)$$

gdzie  $\varphi = 1 + \frac{1}{3} \frac{\omega(1-\eta)}{m}$ ;

— równanie prędkości pocisku

$$\frac{dl}{dt} = V \quad (14)$$

Warunkami początkowymi dla okresu I są: ciśnienie  $p_{ot}$  gazów prochowych w lufie, względna część  $\psi_{ot}$  spalonego ładunku oraz droga  $l_{ot}$  i prędkość  $V_{ot}$  pocisku w chwili odsłonięcia otworu gazowego.

### 3.2. Równania modelu w okresie II

Okres II trwa od chwili wylotu pocisku z lufy do chwili przebycia przez zespół suwadła drogi  $L_p$  do otworów przedmuchowych. W okresie tym przebiegają następujące procesy: spalanie ładunku miotającego, przepływ gazów pomiędzy lufą i komorą gazową, wypływ części gazów przez otwór (zawór) regulacyjny z komory gazowej do otoczenia, wypływ części gazów z lufy do otoczenia oraz dalszy napęd zespołu suwadła. Równaniami modelu matematycznego dla tego okresu będą:

— równanie bilansu energii w przewodzie lufy

a) przy przepływie gazów prochowych z lufy do komory gazowej

$$dU = dQ - dI - dI_w \quad (15)$$

po podstawieniu:

$$dU = d[c_v \omega (\psi - \eta - \gamma) T] = c_v \omega [T(d\psi - d\eta - d\gamma) + (\psi - \eta - \gamma)dT]$$

$$dQ = d[c_v (T_1 - T_0) \omega \psi] = q_s \omega d\psi$$

$$dI = c_p \omega T d\eta$$

$$dI_w = c_p \omega T d\gamma$$

otrzymamy

$$\frac{dRT}{dt} = \frac{\frac{d\psi}{dt} (\theta q_s - RT) - \theta RT \left( \frac{d\eta}{dt} + \frac{d\gamma}{dt} \right)}{\psi - \eta - \gamma} \quad (15a)$$

b) przy przepływie gazów prochowych z komory gazowej do lufy

$$dU = dQ + dI - dI_w \quad (16)$$

podstawienie:

$$dU = d[c_v \omega (\psi - \eta - \gamma) T] = c_v \omega [T(d\psi - d\eta - d\gamma) + (\psi - \eta - \gamma)dT]$$

$$dQ = d[c_v (T_1 - T_0) \omega \psi] = q_s \omega d\psi$$

$$dI = -c_p \omega T_k d\eta$$

$$dI_w = c_p \omega T d\gamma$$

daje

$$\frac{dRT}{dt} = \frac{RT \left( \frac{d\eta}{dt} - \theta \frac{d\gamma}{dt} - \frac{d\psi}{dt} \right) + \theta q_s \frac{d\psi}{dt} - kRT_k \frac{d\eta}{dt}}{\psi - \eta - \gamma} \quad (16a)$$

— równanie stanu gazów prochowych w lufie

$$p = \frac{\omega(\psi - \eta - \gamma)RT}{W_0 + sl_w - \frac{\omega}{\delta}(1 - \psi) - \alpha\omega(\psi - \eta - \gamma)} \quad (17)$$

— równanie względnej masowej szybkości wypływu gazów z lufy do otoczenia

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{\xi_w s}{\omega} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}} \frac{p}{\sqrt{RT}}. \quad (18)$$

Pozostałe równania tego okresu:

- równania bilansu energii w komorze gazowej (3), (3a) i (4), (4a),
- równanie stanu gazów prochowych w komorze gazowej (6),
- równania (7) i (7a) względnej masowej szybkości przepływu gazów z lufy do komory gazowej,
- równania (8) i (8a) względnej masowej szybkości przepływu gazów z komory gazowej do lufy,
- równanie (9) względnej masowej szybkości wypływu gazów z komory gazowej do otoczenia,
- równania (10) i (11) mechaniki ruchu zespołu suwadła,
- równanie (12) względnej masowej szybkości spalania ładunku miotającego (dopływu gazów), są identyczne jak w okresie I.

Wyniki z końca okresu I stanowią warunki początkowe dla okresu II.

#### 4. Symulacje pracy układu lufa-węzeł gazowy

Symulacje działania układu lufa-węzeł gazowy przeprowadzono dla karabinka kalibru 5,56 mm. Dane do obliczeń w postaci charakterystyk konstrukcyjnych układu oraz właściwości energetyczno-balistycznych prochu, przedstawiono w tabeli 1.

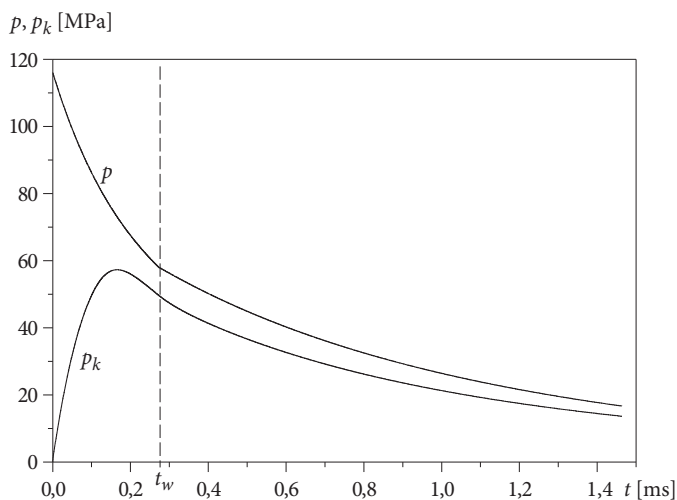
TABELA 1

## Dane do symulacji

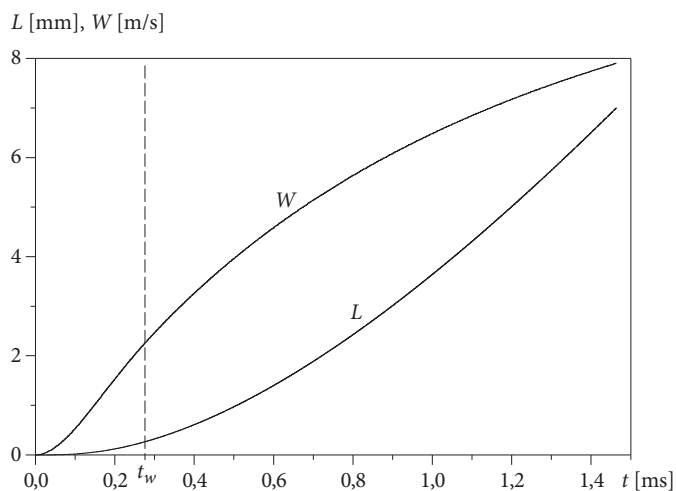
Masa ładunku miotającego	$\omega$ [g]	1,6
Masa pocisku	$m$ [g]	4,0
Pole przekroju poprzecznego przewodu lufy	$s$ [mm <sup>2</sup> ]	24,75
Objętość komory naboowej lufy	$W_0$ [cm <sup>3</sup> ]	1,622
Całkowita droga pocisku w przewodzie lufy	$l_w$ [m]	0,4771
Droga pocisku w lufie do chwili odsłonięcia otworu gazowego	$l_{ot}$ [m]	0,2434
Średnica otworu gazowego	$d_{ot}$ [mm]	2
Średnica otworu regulacyjnego w komorze gazowej	$d_r$ [mm]	2
Objętość początkowa komory gazowej	$W_{k0}$ [cm <sup>3</sup> ]	0,3092
Pole przekroju poprzecznego komory gazowej	$s_k$ [mm <sup>2</sup> ]	95,0
Pole przekroju poprzecznego tłoka gazowego	$s_t$ [mm <sup>2</sup> ]	95,0
Masa odrzucanego zespołu broni (suwadła z tłokiem gazowym i tłoczyskiem)	$M$ [kg]	0,5247
Sztywność sprężyny powrotnej	$k_s$ [N/m]	195
Wstępne ugięcie sprężyny powrotnej	$x_0$ [m]	0,1205
Droga zespołu suwadła do otw. przedmuchowych	$L_p$ [mm]	7
Współczynniki strat przepływu gazów	$\zeta, \zeta_r, \zeta_w$	1
Ciepło spalania prochu ładunku miotającego	$q_s$ [MJ/kg]	5,104
„Siła” prochu	$f$ [MJ/kg]	1,0208
Kowolumen gazów prochowych	$\alpha$ [dm <sup>3</sup> /kg]	1,371
Wykładnik adiabaty gazów prochowych	$k$	1,2
Gęstość prochu	$\delta$ [kg/m <sup>3</sup> ]	1550
Współczynnik prawa szybkości spalania	$u_1$ [m/(s·Pa)]	$0,6 \cdot 10^{-9}$
Początkowe pole powierzchni ziarna prochowego	$S_1$ [mm <sup>2</sup> ]	3,68
Początkowa objętość ziarna prochowego	$\Lambda_1$ [mm <sup>3</sup> ]	0,47
Współczynniki kształtu ziaren prochowych	$\chi$	1,368
	$\lambda$	-0,269
	$\mu$	0

Warunki początkowe otrzymano z rozwiązania problemu głównego balistyki wewnętrznej dla klasycznego układu miotającego w odniesieniu do chwili odsłonięcia otworu gazowego przez pocisk:  $p_{ot} = 116,5$  MPa,  $V_{ot} = 782,5$  m/s,  $\psi_{ot} = 0,5933$ . W wyniku rozwiązania powyższego problemu otrzymano wyniki przedstawione na rysunkach 3 i 4.

Charakterystyczne dla rozpatrywanego układu wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 2.



Rys. 3. Wykresy ciśnienia gazów prochowych w funkcji czasu  $t$ :  $p$  — w lufie;  $p_k$  — w komorze gazowej

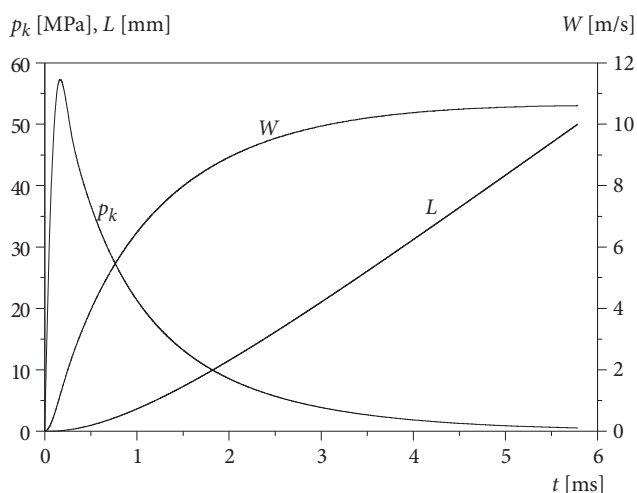


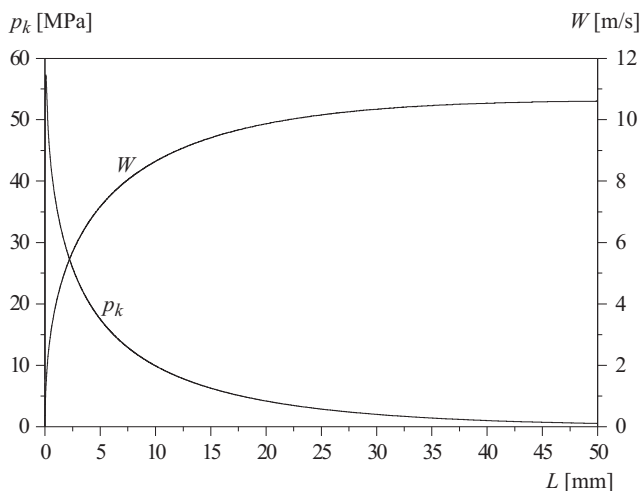
Rys. 4. Wykresy drogi  $L$  i prędkości  $W$  zespołu suwadła w funkcji czasu  $t$

TABELA 2

## Wybrane wyniki obliczeń

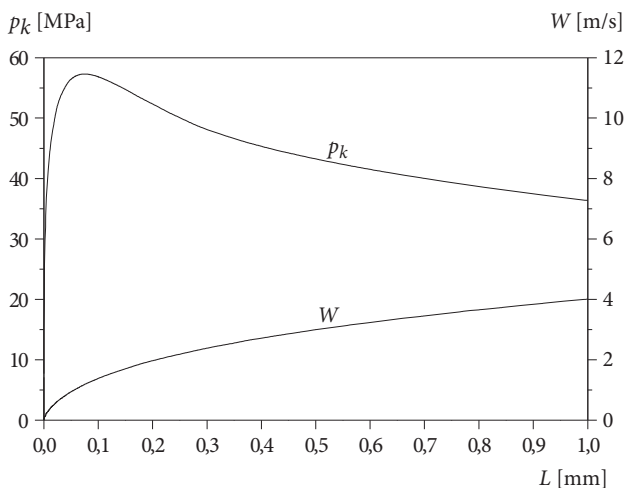
Czas okresu I $t_w$ [ms]	0,276
Całkowity czas napędzania suwadła do prędkości $W_m$ $t_m$ [ms]	1,466
Ciśnienie wylotowe w lufie $p_w$ [MPa]	57,9
Ciśnienie końcowe gazów w lufie $p$ [MPa]	16,7
Ciśnienie maksymalne gazów w komorze gazowej $p_{km}$ [MPa]	57,3
Ciśnienie końcowe gazów w komorze gazowej $p_k$ [MPa]	13,7
Prędkość zespołu suwadła w chwili wylotu pocisku z lufy $W_w$ [m/s]	2,24
Prędkość maksymalna zespołu suwadła $W_m$ [m/s]	7,9
Energia kinetyczna zespołu suwadła w chwili wylotu pocisku z lufy $E_w$ [J]	1,3
Maksymalna energia kinetyczna zespołu suwadła $E_m$ [J]	16,4
Droga zespołu suwadła w chwili wylotu pocisku z lufy $L_w$ [mm]	0,26
Całkowita (maksymalna) droga suwadła $L_p$ [mm]	7
Prędkość wylotowa pocisku $V_w$ [m/s]	904,8
Prędkość wylotowa pocisku w układzie bez węzła gazowego $V_w$ [m/s]	908,7

Rys. 5. Wykresy ciśnienia  $p_k$  gazów w komorze gazowej, prędkości  $W$  i drogi  $L$  zespołu suwadła w funkcji czasu  $t$



Rys. 6. Wykresy ciśnienia  $p_k$  gazów w komorze gazowej i prędkości  $W$  zespołu suwadła w funkcji jego drogi  $L$

Ponadto przeprowadzono obliczenia ciśnienia  $p_k$  w komorze gazowej oraz prędkości  $W$  i drogi  $L$  zespołu suwadła dla wydłużonego ruchu suwadła ( $t > 1,466$  ms), ( $L > 7$  mm), bez uwzględniania otworów przedmuchowych. Wyniki w postaci wykresów zobrazowano na rysunkach 5 i 6.



Rys. 7. Wykresy ciśnienia  $p_k$  gazów w komorze gazowej i prędkości  $W$  zespołu suwadła w początkowym okresie napędzania

## 5. Wnioski

Zaprezentowany model matematyczny jednocześnie zachodzących zjawisk w lufie i komorze gazowej oraz opracowany na jego podstawie program komputerowy umożliwiają symulacje niezbędne do prawidłowego zaprojektowania broni automatycznej, działającej w oparciu o odprowadzenie części gazów prochowych z przewodu lufy. Z przeprowadzonych symulacji wynika m.in., że:

- niecałe 8% energii kinetycznej zyskuje zespół suwadła w okresie I (do chwili wylotu pocisku z lufy); pozostała część energii przekazywana jest suwadłu w okresie II (powyłotowym);
- siła od sprężyny powrotnej na odcinku 7 mm ma pomijalnie mały wpływ na ruch suwadła, w końcowej fazie rozpatrywanego procesu stanowi ok. 2% siły od ciśnienia gazów prochowych;
- wydłużenie drogi suwadła z 7 mm do 50 mm spowodowało zwiększenie jego prędkości o 34% i energii kinetycznej o 80%;
- znaczący przyrost prędkości i energii suwadła odbywa się na odcinku do około 25 mm, dalsze wydłużanie ruchu suwadła powoduje zwiększenie energii kinetycznej zaledwie o kilka procent;
- przepływ części gazów prochowych z przestrzeni zapociskowej lufy do komory gazowej w rozpatrywanym układzie powoduje spadek prędkości wylotowej pocisku o około 0,4%.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2010 jako projekt rozwojowy Nr O R00 0010 04.

Artykuł wpłynął do redakcji 4.02.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lipcu 2009 r.

### LITERATURA

- [1] Z. SURMA, S. TORECKI, R. WOŹNIAK, *Model balistyczny układu miotającego z odprowadzeniem gazów prochowych*, Biul. WAT, 11, Warszawa, 2005.
- [2] S. TORECKI, *Balistyka wewnętrzna*, WAT, Warszawa, 1980.
- [3] S. TORECKI, Z. SURMA, R. WOŹNIAK, *Napęd suwadła broni automatycznej w powyłotowym okresie strzału*, Biul. WAT, 3, 2006.
- [4] S. WIŚNIEWSKI, *Termodynamika techniczna*, WNT, Warszawa, 1980.

G. LEŚNIK, Z. SURMA, S. TORECKI, R. WOŹNIAK

### Thermodynamic model of work of gas operated weapon

**Abstract.** The physical model of the automatic gas operated weapon as well as a mathematical model of phenomena inside the barrel and the gas chamber from the moment of passing gas port by bullet to the moment end propulsion of slide unit are presented in this paper. Numerical solution of the



proposed equations for considered weapon structural system gives pressures inside the gas chamber as well as motion parameters of the propelled slide unit (with piston and rod). Presented mathematical model and numerical program make grounds to projecting of automatic gas operated weapon.

**Keywords:** interior ballistics, automatic weapon, gas chamber

**Universal Decimal Classification:** 623.52

