

por. mgr inż. Grzegorz LEŚNIK
ppłk dr inż. Zbigniew SURMA
prof. dr hab. inż. Stanisław TORECKI
dr inż. Ryszard WOŹNIAK
Instytut Techniki Uzbrojenia
Wydział Mechatroniki
Wojskowa Akademia Techniczna

TERMODYNAMICZNY MODEL DZIAŁANIA BRONI Z ODPROWADZENIEM GAZÓW PROCHOWYCH

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.

THE THERMODYNAMIC MODEL OF THE 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 passing gas port by bullet to the moment end propulsion of slide unit are presented in this paper. Numerical solution of 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.

Oznaczenia

c_p, c_v – odpowiednio izobaryczne i 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_k – 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 wypływających 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;
 m – masa pocisku;
 M – masa zespołu suwadła;
 p – ciśnienie gazów prochowych w lufie;
 p_{ot} – ciśnienie gazów 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_f – pole przekroju poprzecznego tłoka gazowego;
 S_I – 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_I – 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;
 α – kowolumen gazów prochowych;
 β – względna masa gazów, które wypłynęły z komory gazowej do otoczenia;
 γ – względna masa gazów, które wypłynęły z lufy do otoczenia;
 δ – gęstość prochu;
 ζ – współczynnik strat przepływu gazów z lufy do komory gazowej;
 ζ_R – współczynnik strat wypływu gazów z komory gazowej do otoczenia;
 ζ_w – współczynnik strat wypływu gazów z lufy do otoczenia;
 η – względna masa gazów, które przepłynęły z lufy do komory gazowej;
 θ – funkcja wykładnika adiabaty k gazów prochowych ($\theta=k-1$);
 χ_l, λ_l – współczynniki kształtu ziaren prochowych;
 Λ_I – początkowa objętość ziaren prochowych;
 φ – współczynnik prac drugorzędnych gazów prochowych;
 ψ – względna część spalonego ładunku miotającego;

ψ_{ot} – względna część spalonego ładunku miotającego w chwili odsłonięcia otworu gazowego przez pocisk;
 ω – masa ładunku miotającego.

1. Wstęp

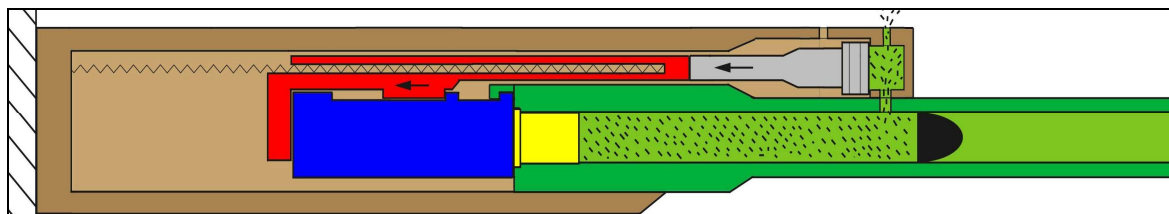
Jednym z najbardziej rozpowszechnionych sposobów napędzania części mechanizmów przeładowania małokalibrowej automatycznej broni palnej jest wykorzystanie energii części gazów prochowych, odprowadzanych z przestrzeni zapociskowej przewodu lufy do komory gazowej. Od charakterystyk geometryczno-masowych 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 (powylotowym) okresie strzału.

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) napędzanego zespołu suwadła dla przyjętego układu konstrukcyjnego broni.

2. Model fizyczny układu lufa - węzeł gazowy

Okres I – od chwili odsłonięcia otworu gazowego do chwili wylotu pocisku z lufy

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 rys. 1.



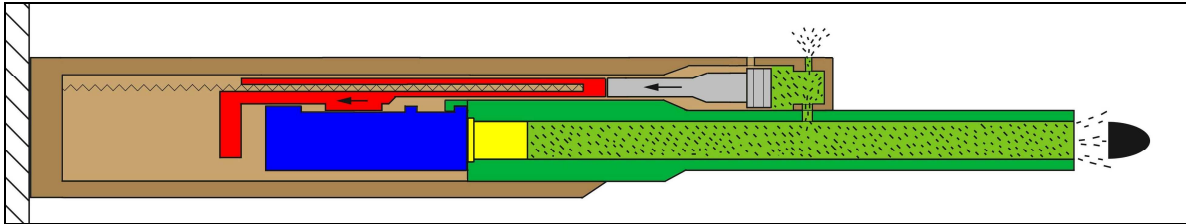
Rys. 1. Model fizyczny układu w I okresie

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

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* (powylotowego).

Okres *II* – od chwili wylotu pocisku z lufy – powylotowy

Model fizyczny badanego układu w okresie *II* przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Model fizyczny układu w *II* okresie

W rozpatrywanym okresie (powylotowym) 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 początkowo zwiększać się, a następnie maleć (lub tylko maleć), stosownie do zmian ciśnienia p w lufie.

3. Model matematyczny

Model matematyczny działania rozpatrywanego układu opracowany został 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.

Równania problemu w okresie *I*

– równanie bilansu energii w przewodzie lufy:

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

po podstawieniu:

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

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

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

$$dI_k = d(c_p \omega \eta T) = c_p \omega T d\eta \quad \text{przy przepływie gazów z lufy do komory gazowej}$$

$$dI_k = d(c_p \omega \eta T_k) = c_p \omega T_k d\eta \quad \text{przy przepływie gazów z komory gazowej do lufy}$$

równanie (1) przyjmuje postać:

a) przy przepływie gazów prochowych z lufy do komory gazowej

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

b) przy przepływie gazów prochowych z komory gazowej do lufy

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

– równanie bilansu energii w komorze gazowej:

$$dU_k = dI_k - dE_{zo} - dE_s - dI_R \quad (2)$$

po uwzględnieniu:

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

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

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

$$dI_R = d(c_p \omega \beta T_k) = c_p \omega T_k d\beta$$

$$dI_k = d(c_p \omega \eta T) = c_p \omega T d\eta \quad \text{przy przepływie gazów z lufy do komory gazowej}$$

$$dI_k = d(c_p \omega \eta T_k) = c_p \omega T_k d\eta \quad \text{przy przepływie gazów z komory gazowej do lufy}$$

otrzymamy:

a) przy przepływie gazów z lufy do komory gazowej

$$\frac{dRT_k}{dt} = \frac{(kRT - RT_k)\omega \frac{d\eta}{dt} - \theta \left(MW \frac{dW}{dt} + k_s (L + x_0) W + RT_k \omega \frac{d\beta}{dt} \right)}{\omega(\eta - \beta)} \quad (2a)$$

b) przy przepływie gazów prochowych z komory gazowej do lufy

$$\frac{dRT_k}{dt} = \frac{\theta \left(RT_k \omega \left(\frac{d\eta}{dt} - \frac{d\beta}{dt} \right) - MW \frac{dW}{dt} - k_s (L + x_0) W \right)}{\omega(\eta - \beta)} \quad (2b)$$

– równanie stanu gazów prochowych w lufie:

$$p = \frac{\omega(\psi - \eta)RT}{W_0 + s_l - \frac{\omega}{\delta}(1 - \psi) - \alpha\omega(\psi - \eta)} \quad (3)$$

– równanie stanu gazów prochowych w komorze gazowej:

$$p_k = \frac{\omega(\eta - \beta)RT_k}{W_{k0} + s_k L - \alpha\omega(\eta - \beta)} \quad (4)$$

– równania przepływu gazów z lufy do komory gazowej:

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{\xi F_p}{\omega} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}} \frac{p}{\sqrt{RT}} \quad \text{przy} \quad p_k \leq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} p \quad (5)$$

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{\xi F_p}{\omega} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_k}{p} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_k}{p} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \frac{p}{\sqrt{RT}} \quad \text{przy} \quad p_k > \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} p \quad (5a)$$

– równania przepływu gazów z komory gazowej do lufy:

$$\frac{d\eta}{dt} = -\frac{\xi F_p}{\omega} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}} \frac{p_k}{\sqrt{RT_k}} \quad \text{przy} \quad p \leq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} p_k \quad (6)$$

$$\frac{d\eta}{dt} = -\frac{\xi F_p}{\omega} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p}{p_k} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p}{p_k} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \frac{p_k}{\sqrt{RT_k}} \quad \text{przy} \quad p > \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} p_k \quad (6a)$$

– równanie wypływu gazów z komory gazowej do otoczenia:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{\xi_R F_R}{\omega} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}} \frac{p_k}{\sqrt{RT_k}} \quad (7)$$

– równanie ruchu zespołu suwadła:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{p_k s_t - k_s (L + x_0)}{M} \quad (8)$$

– równanie prędkości zespołu suwadła:

$$\frac{dL}{dt} = W \quad (9)$$

– równanie dopływu gazów prochowych:

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{S_1}{\Lambda_1} \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda_1}{\chi_1}} \psi \cdot u_1 p \quad (10)$$

– równanie ruchu postępowego pocisku:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{sp}{\varphi m} \quad (11)$$

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

– równanie prędkości pocisku:

$$\frac{dl}{dt} = V \quad (12)$$

Równania problemu w okresie II

– równanie bilansu energii w przewodzie lufy:

$$dU = dQ - dI_k - dI_w \quad (13)$$

po podstawieniu:

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

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

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

$$dI_k = d(c_p \omega \eta T) = c_p \omega T d\eta \quad \text{przy przepływie gazów z lufy do komory gazowej}$$

$dI_k = d(c_p \omega \eta T_k) = c_p \omega T_k d\eta$ przy przepływie gazów z komory gazowej do lufy otrzymamy:

a) przy przepływie gazów prochowych z lufy do komory gazowej

$$\frac{dRT}{dt} = \frac{\frac{d\psi}{dt}(\theta q_s - RT) - \theta RT \left(\frac{d\eta}{dt} + \frac{d\gamma}{dt} \right)}{\psi - \eta - \gamma} \quad (13a)$$

b) przy przepływie gazów prochowych z komory gazowej do lufy

$$\frac{dRT}{dt} = \frac{RT \left(\frac{d\eta}{dt} - \theta \frac{d\gamma}{dt} - \frac{d\psi}{dt} \right) + \theta q_s \frac{d\psi}{dt} - kRT_k \frac{d\eta}{dt}}{\psi - \eta - \gamma} \quad (13b)$$

– równanie stanu gazów prochowych w lufie:

$$p = \frac{\omega(\psi - \eta - \gamma)RT}{W_0 + sl_w - \frac{\omega}{\delta}(1 - \psi) - \alpha\omega(\psi - \eta - \gamma)} \quad (14)$$

– równanie wypływu gazów z lufy do otoczenia:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{\xi_w s}{\omega} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}} \frac{p}{\sqrt{RT}} \quad (15)$$

Pozostałe równania tego okresu, a mianowicie:

- równania bilansu energii w komorze gazowej (2a) i (2b);
 - równanie stanu gazów prochowych w komorze gazowej (4);
 - równania (5), (5a), (6), (6a) przepływu gazów pomiędzy lufą i komorą gazową;
 - równanie (7) wypływu gazów z komory gazowej do otoczenia;
 - równania (8) i (9) mechaniki ruchu zespołu suwadła;
 - równanie (10) dopływu gazów prochowych;
- są identyczne jak w okresie I.

4. Symulacje pracy układu lufa – węzeł gazowy

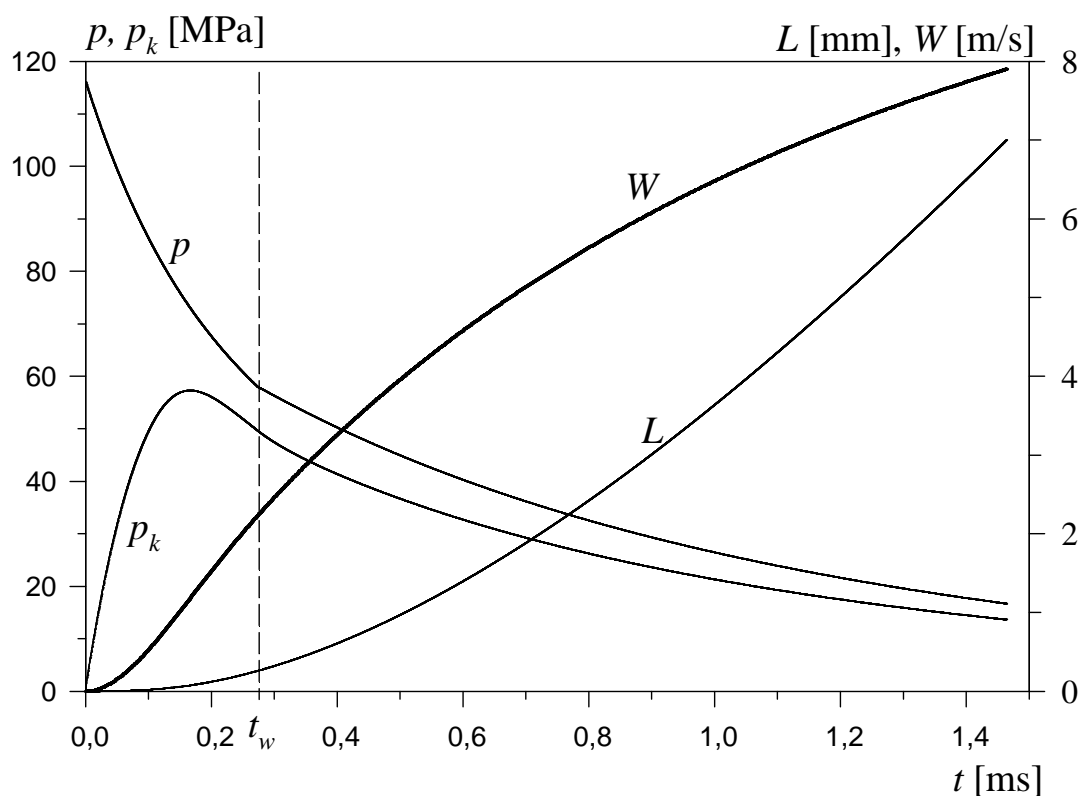
Tabela 1. Dane do symulacji

$m = 4,0$ [g]	$\omega = 1,6$ [g]
$s = 24,75$ [mm ²]	$q_s = 5,104$ [MJ/kg]
$W_0 = 1,622$ [cm ³]	$f = 1,0208$ [MJ/kg]
$l_w = 0,4771$ [m]	$\alpha = 1,371$ [dm ³ /kg]
$l_{ot} = 0,2434$ [m]	$k = 1,2$
$d_g = d_r = 2$ [mm]	$\delta = 1550$ [kg/m ³]
$W_{k0} = 0,3092$ [cm ³]	$u_1 = 0,6 \cdot 10^{-9}$ [m/(s·Pa)]
$s_k = s_r = 95,0$ [mm ²]	$S_l = 3,68$ [mm ²]
$M = 0,5247$ [kg]	$\Lambda_l = 0,47$ [mm ³]
$k_s = 195$ [N/m]	$\chi = 1,368$
$x_0 = 0,1205$ [m]	$\lambda = -0,269$
$x_p = 7$ [mm]	$\mu = 0$

Charakterystyczne wyniki obliczeń dla powyższych danych wejściowych i warunków początkowych: $p_{ot} = 116,5$ MPa, $V_{ot} = 782,5$ m/s, $\psi_{ot} = 0,5933$ (otrzymanych z rozwiązania PGBW dla klasycznego układu miotającego) przedstawiono na rysunku 3 oraz w tabeli 2.

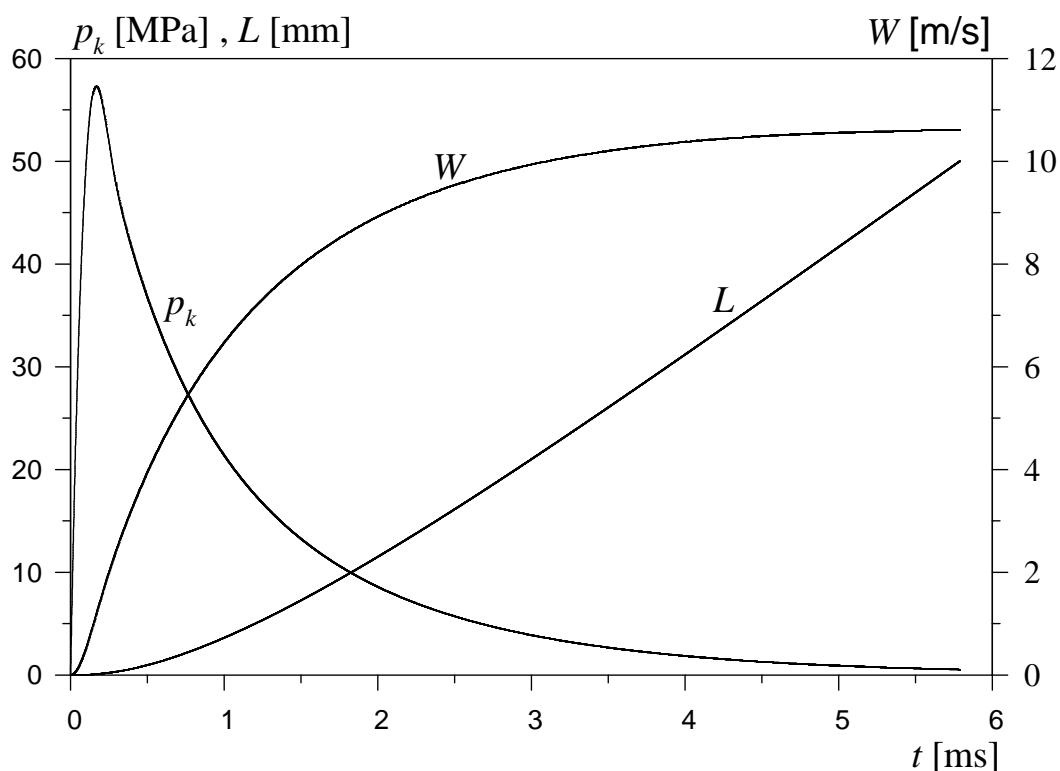
Tabela 2. Wybrane wyniki obliczeń

Ciśnienie maksymalne gazów w komorze gazowej	p_{km} [MPa]	57,3
Prędkość maksymalna zespołu suwadła	W_m [m/s]	7,9
Maksymalna energia kinetyczna zespołu suwadła	E_m [J]	16,4



Rys. 3. Wykresy ciśnienia gazów w lufie p , w komorze gazowej p_k , drogi L i prędkości W zespołu suwadła w funkcji czasu t

Ponadto przeprowadzono obliczenia dla wydłużonego ruchu suwadła ($t > 1,5$ ms), ($L > 7$ mm), bez otworów przedmuchowych. Wyniki zobrazowano na rysunku 4.



Rys. 4. Wykresy ciśnienia p_k gazów w komorze gazowej, prędkości W i drogi L zespołu suwadła w funkcji czasu t

5. Wnioski

Z przeprowadzonych symulacji rozpatrywanego przypadku wynika m.in., że:

- niecałe 8 % energii kinetycznej zespół suwadła uzyskuje w okresie *I* (do chwili wylotu pocisku z lufy). Pozostała część energii przekazywana jest suwadłu w okresie *II* (powygotowym);
- wydłużenie z 7 mm do 50 mm drogi napędzanego suwadła pozwoliło zwiększyć jego prędkość o 34 % i energię kinetyczną o 80 %;
- zasadniczy przyrost prędkości i energii suwadła odbywa się na odcinku 25 mm. Dalsze wydłużanie ruchu swobodnego suwadła powoduje wzrost jego energii kinetycznej rzędu kilku procent;
- wpływ części gazów prochowych z lufy (przestrzeni zapociskowej) do komory gazowej spowodował spadek prędkości wylotowej pocisku zaledwie o 0,4 %.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2010
jako projekt rozwojowy.*

Literatura

- [1] Z. Surma, S. Torecki, R. Woźniak, *Model balistyczny układu miotającego z odprowadzeniem gazów prochowych*, Biuletyn WAT nr 11, Warszawa 2005.
- [2] S. Torecki, *Balistyka wewnętrzna*, WAT, Warszawa 1980.
- [3] S. Torecki, Z. Surma, R. Woźniak, *Napęd suwadła broni automatycznej w powygotowym okresie strzału*, Biuletyn WAT nr 3, 2006.
- [4] S. Wiśniewski, *Termodynamika techniczna*, WNT, Warszawa 1980.

