



## Szczegółowy model matematyczny odrzutu swobodnego broni działającej na zasadzie odprowadzenia gazów prochowych\*

Łukasz SZMIT, Stanisław TORECKI

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

**Streszczenie.** W pracy przedstawiono model fizyczny i matematyczny odrzutu swobodnego automatycznej broni strzeleckiej działającej na zasadzie odprowadzenia gazów prochowych przez boczny otwór w lufie, z krótkim ruchem tłoka gazowego, w czasie jednego cyklu strzału. Model matematyczny analizowanego układu (uwzględniający charakterystyczne okresy odrzutu) umożliwia symulację zjawiska odrzutu i analizę wpływu parametrów konstrukcyjnych układu na podstawowe charakterystyki odrzutu.

**Słowa kluczowe:** mechanika, balistyka, konstrukcja broni, broń strzelecka, karabinek

### 1. WSTĘP

Odrzut broni zaczyna się w chwili rozpoczęcia ruchu pocisku w lufie. Gazy prochowe napędzające pocisk, działają jednocześnie na dno łuski, zwiększając prędkość i energię całej broni lub jej części. Część energii odrzutu wykorzystywana jest do napędu mechanizmów broni, a reszta musi zostać rozproszona przez układ podtrzymujący broń. Zwykle wyróżnia się dwa modele odrzutu broni: odrzut hamowany i odrzut swobodny.

\* Artykuł był prezentowany na VIII Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa”, Pułtusk, 6-8 października 2010 r.

Z odrzutem hamowanym (model rzeczywisty) mamy do czynienia wówczas, gdy na odrzucaną broń działa zewnętrzna siła hamująca. Ze względu na trudności w określeniu parametrów odrzutu hamowanego oraz małą uniwersalność wyników badań, zazwyczaj rozpatruje się odrzut swobodny broni, wyprowadzając stąd wnioski odnośnie do odrzutu hamowanego.

Odrzut swobodny ma miejsce wówczas, gdy na broń nie działają żadne siły zewnętrzne. Na podstawie charakterystyk odrzutu swobodnego broni, a zwłaszcza jego prędkości i odpowiadającej jej energii odrzutu, można porównywać właściwości użytkowe broni, a w szczególności jej oddziaływanie na strzelającego lub podstawę oraz stateczność w czasie strzału.



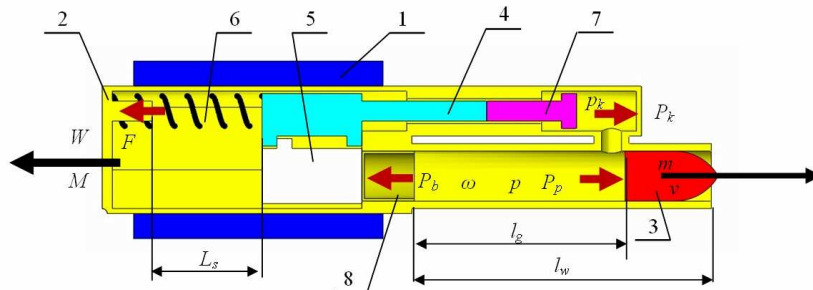
Rys. 1. Odrzut swobodny:  $W$  – prędkość odrzutu,  $L$  – droga odrzutu

Fig. 1. Recoil:  $W$  – recoil velocity,  $L$  – recoil distance

Formułowanie szczegółowego modelu matematycznego odrzutu pokazane zostało na przykładzie karabinka automatycznego, działającego na zasadzie odprowadzenia gazów prochowych, z krótkim ruchem tłoka gazowego.

## 2. MODEL FIZYCZNY

Model fizyczny rozpatrywanego karabinka przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Model fizyczny układu po minięciu przez pocisk otworu gazowego:  
1 – prowadnice, 2 – zespół lufa–komora zamkowa, 3 – pocisk, 4 – suwadło, 5 – zamek,  
6 – sprężyna powrotna, 7 – tłok gazowy, 8 – łuska

Fig. 2. Physical model of the recoil:

1 – guides, 2 – barrel with receiver, 3 – bullet, 4 – bolt carrier, 5 – bolt,  
6 – spring, 7 – gas piston

Przedmiotem analizy będzie jednowymiarowy ruch zespołu lufa–komora zamkowa wraz z połączonymi sztywno z tym zespołem elementami o masie  $M$  pod wpływem sił ciśnienia gazów prochowych w lufie  $P_b$  i komorze gazowej  $P_k$  oraz siły  $F$  sprężyny powrotnej względem poziomych prowadnic w czasie  $t$ , z wyodrębnieniem następujących okresów charakterystycznych odrzutu, uwzględniających specyfikę przyjętego modelu fizycznego:

- okres I – od chwili  $t_0 = 0$  rozpoczęcia ruchu pocisku do chwili  $t_g$  osiągnięcia przez pocisk otworu gazowego,
- okres II – od chwili  $t_g$  do chwili  $t_w$  wylotu pocisku z lufy,
- okres III – od chwili  $t_w$  do chwili  $t_k$  zatrzymania tłoka gazowego,
- okres IV – od chwili  $t_k$  do chwili  $t_z$  przyłączenia zamka do suwadła,
- okres V – od chwili  $t_z$  do chwili  $t_t$  dotarcia zespołu suwadła w skrajne, tylne położenie,
- okres VI – od chwili  $t_t$  do chwili  $t_n$  uderzenia zamka w nabój,
- okres VII – od chwili  $t_n$  do chwili  $t_r$  rozłączenia zamka z suwadłem,
- okres VIII – od chwili  $t_r$  do chwili  $t_p$  dojścia suwadła w skrajne przednie położenie.

W odniesieniu do innych wzorów broni (modeli fizycznych) okresy charakterystyczne mogą się oczywiście nieco różnić od powyżej wyszczególnionych, ale zasada budowy modelu matematycznego będzie podobna do przedstawionej poniżej.

W analizie układu pominięte zostanie tarcie między zespołem odrzucanym a prowadnicami oraz między łuską a szczękami magazynka. Podstawą analiz odrzutu są wykresy zmian ciśnienia w lufie i w komorze gazowej oraz drogi zespołu suwadła w czasie  $t$ , uzyskane w pracy [1] wraz z wykresem cyklicznym pracy automatyki broni.

### 3. MODEL MATEMATYCZNY

W równaniach modelu matematycznego zastosowano następujące symbole:

- $d$  – kaliber broni,
- $F$  – siła ściskanej sprężyny powrotnej,
- $k$  – sztywność sprężyny powrotnej,
- $L_I-L_{VIII}$  – droga zespołu odrzucanego w poszczególnych okresach,
- $l$  – droga pocisku w lufie,
- $l_g$  – droga pocisku w lufie, od początku ruchu, do otworu gazowego,
- $L_g$  – droga zespołu odrzucanego w chwili minięcia przez pocisk otworu gazowego,
- $L_k$  – droga zespołu odrzucanego w chwili zatrzymania tłoka gazowego,
- $L_n$  – droga zespołu odrzucanego w chwili uderzenia zamka w dno naboju,

---

$L_p$	– droga zespołu odrzucanego w chwili powrotu suwadła w przednie położenie,
$L_r$	– droga zespołu odrzucanego w chwili rozłączenia zamka z suwadłem,
$L_s$	– droga suwadła,
$L_t$	– droga zespołu odrzucanego w chwili osiągnięcia przez suwadło skrajnie tylnego położenia,
$L_w$	– droga zespołu odrzucanego w chwili wylotu pocisku z lufy,
$L_z$	– droga zespołu odrzucanego w chwili przyłączenia zamka do suwadła,
$m$	– masa pocisku,
$M_I-M_{VIII}$	– masa zespołu odrzucanego w poszczególnych okresach,
$M_b$	– masa broni,
$m_l$	– masa łuski,
$m_n$	– masa naboju,
$M_s$	– masa suwadła i 1/3 masy sprężyny powrotnej,
$M_t$	– masa tłoka gazowego,
$M_z$	– masa zamka,
$N_x$	– siła oporu bruzd,
$p$	– ciśnienie w lufie,
$P_b$	– siła działająca na dno lufy,
$p_k$	– ciśnienie w komorze gazowej,
$P_k$	– siła działająca na komorę gazową,
$Q$	– siła powodująca odrzut zespołu odrzucanego,
$Q_I-Q_{VIII}$	– siła powodująca odrzut zespołu odrzucanego w poszczególnych okresach,
$s$	– pole powierzchni przekroju poprzecznego przewodu lufy,
$S_k$	– pole powierzchni przedniej ściany komory gazowej,
$S_t$	– pole powierzchni czoła tłoka gazowego,
$t$	– czas,
$t_0$	– początek ruchu pocisku w lufie,
$t_g$	– czas od początku ruchu pocisku w lufie, do chwili minięcia przez pocisk otworu gazowego,
$t_k$	– czas od początku ruchu pocisku w lufie, do chwili zatrzymania tłoka gazowego,
$t_n$	– czas od początku ruchu pocisku w lufie, do chwili uderzenia zamka w dno naboju,
$t_p$	– czas od początku ruchu pocisku w lufie, do chwili powrotu suwadła w przednie położenie,
$t_r$	– czas od początku ruchu pocisku w lufie, do chwili rozłączenia zamka z suwadłem,
$t_t$	– czas od początku ruchu pocisku w lufie, do chwili osiągnięcia przez suwadło skrajnie tylnego położenia,

$t_w$	– czas od początku ruchu pocisku w lufie, do chwili wylotu pocisku z lufy,
$t_z$	– czas od początku ruchu pocisku w lufie, do chwili przyłączenia zamka do suwadła,
$v_g$	– prędkość pocisku w chwili mijania otworu gazowego,
$V_k$	– prędkość suwadła w chwili zatrzymania tłoka gazowego,
$V_p$	– prędkość suwadła w chwili powrotu suwadła w przednie położenie,
$V_r$	– prędkość suwadła w chwili rozłączenia zamka z suwadłem,
$V_t$	– prędkość suwadła w chwili osiągnięcia przez suwadło skrajnie tylnego położenia,
$W$	– prędkość zespołu odrzucanego,
$W_I$ - $W_{VIII}$	– prędkość zespołu odrzucanego w poszczególnych okresach,
$W_g$	– prędkość zespołu odrzucanego w chwili minięcia przez pocisk otworu gazowego,
$W_k$	– prędkość zespołu odrzucanego w chwili zatrzymania tłoka gazowego,
$W_k'$	– prędkość zespołu odrzucanego po zatrzymaniu tłoka gazowego,
$W_n$	– prędkość zespołu odrzucanego w chwili uderzenia zamka w dno naboju,
$W_p$	– prędkość zespołu odrzucanego w chwili powrotu suwadła w przednie położenie,
$W_p'$	– prędkość zespołu odrzucanego w chwili zakończenia cyklu pracy automatyki broni,
$W_r$	– prędkość zespołu odrzucanego w chwili rozłączenia zamka z suwadłem,
$W_r'$	– prędkość zespołu odrzucanego po uderzeniu zamka w tylny płask lufy,
$W_t$	– prędkość zespołu odrzucanego w chwili osiągnięcia przez suwadło skrajnie tylnego położenia,
$W_t'$	– prędkość zespołu odrzucanego po odbiciu suwadła,
$W_w$	– prędkość zespołu odrzucanego w chwili wylotu pocisku z lufy,
$W_z$	– prędkość zespołu odrzucanego w chwili przyłączenia zamka do suwadła,
$x_0$	– wstępne ugięcie sprężyny powrotnej,
$\alpha$	– kąt pochylenia bruzd,
$\varepsilon$	– współczynnik restytucji,
$\lambda$	– współczynnik zależny od rodzaju pocisku (dla pocisków strzeleckich $\lambda = 0,48$ ).

W okresie I na zespół odrzucany działa siła ciśnienia gazów prochowych  $P_b$ , działających na dno lufy oraz przeciwnie do niej skierowana, siła oporu bruzd  $N_x$ .

Siłą powodującą odrzut zespołu odrzucanego w okresie I będzie zatem:

$$Q_I = sp - N_x \quad (1)$$

gdzie:

$$N_x = \lambda(\mu tg \alpha + tg^2 \alpha) s p \quad (2)$$

jest siłą oporu bruzd związaną z ruchem obrotowym pocisku. Równanie ruchu zespołu odrzucanego, w okresie I przyjmie postać:

$$M_I \frac{dW}{dt} = [1 - \lambda(\mu tg \alpha + tg^2 \alpha)] sp \quad (3)$$

gdzie masa zespołu odrzucanego:

$$M_I = M_b + m_t \quad (4)$$

Z zależności (3) otrzymujemy prędkość  $W_I$  i drogę  $L_I$  odrzutu w okresie I:

$$W_I = \frac{s}{M_I} [1 - \lambda(\mu tg \alpha + tg^2 \alpha)] \int_{t_0}^t p dt \quad (5)$$

$$L_I = \int_{t_0}^t W dt = \frac{s}{M_I} [1 - \lambda(\mu tg \alpha + tg^2 \alpha)] \int_{t_0}^t \left( \int_{t_0}^t p dt \right) dt \quad (6)$$

W końcu okresu I (chwila mijania przez pocisk otworu gazowego) będzie:

$$W_g = \frac{s}{M_I} [1 - \lambda(\mu tg \alpha + tg^2 \alpha)] \int_{t_0}^{t_g} p dt = \frac{m}{M_I} [1 - \lambda(\mu tg \alpha + tg^2 \alpha)] v_g \quad (7)$$

$$L_g = \int_{t_0}^{t_g} W dt = \frac{s}{M_I} [1 - \lambda(\mu tg \alpha + tg^2 \alpha)] \int_{t_0}^{t_g} \left( \int_{t_0}^t p dt \right) dt = \frac{m}{M_I} [1 - \lambda(\mu tg \alpha + tg^2 \alpha)] l_g \quad (8)$$

W okresie II zespół odrzucany przyspieszany jest siłą  $P_b$  ciśnienia gazów prochowych działających na dno lufy i siłą  $F$  ściskanej sprężyny powrotnej oraz hamowany przeciwnie do nich skierowanymi: siłą  $N_x$  i siłą  $P_k$  ciśnienia działającą na przednią ściankę komory gazowej. Siłą powodującą odrzut broni w okresie II będzie zatem:

$$Q_{II} = sp + F - \lambda(\mu tg \alpha + tg^2 \alpha) sp - S_k p_k \quad (9)$$

Do wyznaczenia siły  $F$  wykorzystana zostanie droga  $L_s$  suwadła otrzymana w pracy [1]:

$$F = k(L_s + x_0) \quad (10)$$

Prędkość odrzutu  $W_{II}$  i droga zespołu odrzucanego  $L_{II}$  w okresie II wyniosą:

$$W_{II} = W_g + \frac{s}{M_{II}} \left[ 1 - \lambda(\mu t g \alpha + t g^2 \alpha) \right] \int_{t_g}^t p dt + \frac{k}{M_{II}} \int_{t_g}^t (L_s + x_0) dt - \frac{S_k}{M_{II}} \int_{t_g}^t p_k dt \quad (11)$$

$$L_{II} = \int_{t_0}^t W dt = L_I + W_g (t - t_g) + \frac{s}{M_{II}} \left[ 1 - \lambda(\mu t g \alpha + t g^2 \alpha) \right] \int_{t_g}^t \left( \int_{t_g}^t p dt \right) dt + \frac{k}{M_{II}} \int_{t_g}^t \left( \int_{t_g}^t (L_s + x_0) dt \right) dt - \frac{S_k}{M_{II}} \int_{t_g}^t \left( \int_{t_g}^t p_k dt \right) dt \quad (12)$$

gdzie masa zespołu odrzucanego:

$$M_{II} = M_b + m_t - M_s - M_t \quad (13)$$

W szczególności dla końca okresu II odrzutu (chwila wylotu pocisku z lufy) otrzymamy prędkość  $W_w$  odrzutu i drogę  $L_w$  odrzutu:

$$W_w = W_g + \frac{s}{M_{II}} \left[ 1 - \lambda(\mu t_w g \alpha + t_w^2 g^2 \alpha) \right] \int_{t_g}^{t_w} p dt + \frac{k}{M_{II}} \int_{t_g}^{t_w} (L_s + x_0) dt - \frac{S_k}{M_{II}} \int_{t_g}^{t_w} p_k dt \quad (14)$$

$$L_w = \int_{t_0}^{t_w} W dt = L_g + W_g (t_w - t_g) + \frac{s}{M_{II}} \left[ 1 - \lambda(\mu t_w g \alpha + t_w^2 g^2 \alpha) \right] \int_{t_g}^{t_w} \left( \int_{t_g}^{t_w} p dt \right) dt + \frac{k}{M_{II}} \int_{t_g}^{t_w} \left( \int_{t_g}^{t_w} (L_s + x_0) dt \right) dt - \frac{S_k}{M_{II}} \int_{t_g}^{t_w} \left( \int_{t_g}^{t_w} p_k dt \right) dt \quad (15)$$

W okresie III zespół odrzucany przyspieszany jest siłą  $P_b$  ciśnienia gazów prochowych działających na dno lufy i siłą  $F$  ściskanej sprężyny powrotnej oraz hamowany przeciwnie do nich skierowaną siłą  $P_k$  ciśnienia działającą na przednią ścianę komory gazowej. Prędkość  $W_{III}$  odrzutu i droga  $L_{III}$  zespołu odrzucanego w okresie III wyniosą:

$$W_{III} = W_w + \frac{s}{M_{III}} \int_{t_w}^t p dt + \frac{k}{M_{III}} \int_{t_w}^t (L_s + x_0) dt - \frac{S_k}{M_{III}} \int_{t_w}^t p_k dt \quad (16)$$

$$\begin{aligned}
L_{III} = \int_{t_0}^t W dt = L_w + W_w(t - t_w) + \frac{S}{M_{III}} \int_{t_w}^t \left( \int_{t_w}^t p dt \right) dt + \\
+ \frac{k}{M_{III}} \int_{t_w}^t \left( \int_{t_w}^t (L_s + x_0) dt \right) dt - \frac{S_k}{M_{III}} \int_{t_w}^t \left( \int_{t_w}^t p_k dt \right) dt
\end{aligned} \quad (17)$$

gdzie masa zespołu odrzucanego:

$$M_{III} = M_b + m_t - M_s - M_t \quad (18)$$

W szczególności dla końca okresu III odrzutu (chwila zatrzymania tłoka gazowego) otrzymamy prędkość  $W_k$  odrzutu i drogę  $L_k$  odrzutu:

$$W_k = W_w + \frac{S}{M_{III}} \int_{t_w}^{t_k} p dt + \frac{k}{M_{III}} \int_{t_w}^{t_k} (L_s + x_0) dt - \frac{S_k}{M_{III}} \int_{t_w}^{t_k} p_k dt \quad (19)$$

$$\begin{aligned}
L_k = \int_{t_0}^{t_k} W dt = L_w + W_w(t_k - t_w) + \frac{S}{M_{III}} \int_{t_w}^{t_k} \left( \int_{t_w}^{t_k} p dt \right) dt + \\
+ \frac{k}{M_{III}} \int_{t_w}^{t_k} \left( \int_{t_w}^{t_k} (L_s + x_0) dt \right) dt - \frac{S_k}{M_{III}} \int_{t_w}^{t_k} \left( \int_{t_w}^{t_k} p_k dt \right) dt
\end{aligned} \quad (20)$$

W końcu okresu III tłok gazowy zatrzymuje się, zmniejsza się zatem masa zespołu suwadła, a zwiększa masa zespołu odrzucanego  $M$  (o masę tłoka  $M_t$ ). Tłok zatrzymując się, przekazuje również swoją energię zespołowi odrzucanemu, w związku z czym zwiększy się prędkość odrzutu. Prędkość odrzutu po zatrzymaniu tłoka wyznaczamy z równania zachowania pędu.

$$W_k' = \frac{(M_b + m_t - M_s - M_t)W_k + M_t V_k}{M_b + m_t - M_s} \quad (21)$$

W okresie IV zespół odrzucany przyspieszany jest siłą  $P_b$  ciśnienia gazów prochowych działającą na dno lufy oraz siłą  $F$  ściskanej sprężyny powrotnej. Z chwila zatrzymania tłoka gazowego, siła ciśnienia  $P_k$  gazów prochowych, działająca na przednią ściankę komory gazowej, jest równoważona przez przeciwnie skierowaną, a równą co do wartości siłą  $P_t$  działającą na tłok.



Prędkość  $W_{IV}$  odrzutu i droga  $L_{IV}$  zespołu odrzucanego w okresie IV będą zatem równe:

$$W_{IV} = W_k' + \frac{s}{M_{IV}} \int_{t_k}^t p dt + \frac{k}{M_{IVa}} \int_{t_k}^t (L_s + x_0) dt \quad (22)$$

$$L_{IV} = \int_{t_0}^t W_{IV} dt = L_k + W_k'(t - t_k) + \frac{s}{M_{IV}} \int_{t_k}^t \left( \int_{t_k}^t p dt \right) dt + \frac{k}{M_{IVa}} \int_{t_k}^t \left( \int_{t_k}^t (L_s + x_0) dt \right) dt \quad (23)$$

gdzie masa zespołu odrzucanego:

$$M_{IV} = M_b - M_s + m_t \quad (24)$$

W szczególności dla końca okresu IV odrzutu (chwila przyłączenia zamka do suwadła) otrzymamy prędkość odrzutu  $W_z$  i drogę odrzutu  $L_z$  równą:

$$W_z = W_k' + \frac{s}{M_{IV}} \int_{t_k}^{t_z} p dt + \frac{k}{M_{IV}} \int_{t_k}^{t_z} (L_s + x_0) dt \quad (25)$$

$$L_z = \int_{t_0}^{t_z} W dt = L_k + W_k'(t_z - t_k) + \frac{s}{M_{IV}} \int_{t_k}^{t_z} \left( \int_{t_k}^{t_z} p dt \right) dt + \frac{k}{M_{IV}} \int_{t_k}^{t_z} \left( \int_{t_k}^{t_z} (L_s + x_0) dt \right) dt \quad (26)$$

W końcu okresu IV odrzutu następuje przyłączenie zamka do suwadła, w związku z czym zwiększa się masa zespołu suwadła i zmniejsza masa zespołu odrzucanego (o masę zamka z łuską).

W okresie V zespół odrzucany przyspieszany jest jedynie siłą  $F$  ściskanej sprężyny powrotnej. Prędkość  $W_V$  odrzutu i droga  $L_V$  zespołu odrzucanego w okresie V wyniosą:

$$W_V = W_z + \frac{k}{M_V} \int_{t_z}^t (L_s + x_0) dt \quad (27)$$

$$L_V = \int_{t_0}^t W dt = L_z + W_z(t - t_z) + \frac{k}{M_V} \int_{t_z}^t \left( \int_{t_z}^t (L_s + x_0) dt \right) dt \quad (28)$$

gdzie masa zespołu odrzucanego:

$$M_V = M_b - M_s - M_z \quad (29)$$

W szczególności dla końca okresu V odrzutu (chwila dotarcia zespołu suwadła w tylne położenie) otrzymamy prędkość  $W_t$  odrzutu i drogę  $L_t$  odrzutu:

$$W_t = W_z + \frac{k}{M_V} \int_{t_z}^{t_t} (L_s + x_0) dt \quad (30)$$

$$L_t = \int_{t_0}^{t_t} W dt = L_z + W_z(t_t - t_z) + \frac{k}{M_V} \int_{t_z}^{t_t} \left( \int_{t_z}^{t_t} (L_s + x_0) dt \right) dt \quad (31)$$

W końcu okresu V odrzutu następuje uderzenie suwadła z zamkiem o komorę zamkową, a co za tym idzie zmiana zwrotu i wartości prędkości ich ruchu. Prędkość  $W_t'$  zespołu odrzucanego (lufa – komora zamkowa) po zderzeniu wyznaczamy z równania zachowania pędu.

$$W_t' = W_t + \frac{(V_t - W_t)(1 + \varepsilon)}{1 + \frac{M_b - M_z - M_s}{M_s + M_z}} \quad (32)$$

Okres VI odrzutu obejmuje początkowy (pierwszy) etap ruchu suwadła do przodu pod wpływem sprężyny powrotnej. Prędkość  $W_{VI}$  odrzutu i droga  $L_{VI}$  zespołu odrzucanego w okresie VI będą zatem równe:

$$W_{VI} = W_t' + \frac{k}{M_{VI}} \int_{t_t}^t (L_s + x_0) dt \quad (33)$$

$$L_{VI} = \int_{t_t}^t W dt = L_t + W_t'(t - t_t) + \frac{k}{M_{VI}} \int_{t_t}^t \left( \int_{t_t}^t (L_s + x_0) dt \right) dt \quad (34)$$

gdzie masa zespołu odrzucanego:

$$M_{VI} = M_b - M_s - M_z \quad (35)$$

W szczególności dla końca okresu VI odrzutu (chwila uderzenia zamka o nabój) otrzymamy prędkość odrzutu  $W_n$  i drogę odrzutu  $L_n$ :

$$W_n = W_t' + \frac{k}{M_{VI}} \int_{t_t}^{t_n} (L_s + x_0) dt \quad (36)$$

$$L_n = \int_{t_0}^{t_n} W dt = L_t + W_t'(t_n - t_t) + \frac{k}{M_{VI}} \int_{t_t}^{t_n} \left( \int_{t_t}^{t_n} (L_s + x_0) dt \right) dt \quad (37)$$

W końcu okresu VI odrzutu następuje przyłączenie naboju do suwadła z zamkiem i zwiększenie masy zespołu suwadła oraz zmniejszenie masy zespołu odrzucanego (o masę  $m_n$  naboju).

W okresie VII zespół odrzucany przyspieszany jest jedynie siłą  $F$  ściskanej sprężyny powrotnej. Prędkość odrzutu  $W_{VII}$  i droga zespołu odrzucanego  $L_{VII}$  w okresie VII wyniosą:

$$W_{VII} = W_n + \frac{k}{M_{VII}} \int_{t_n}^t (L_s + x_0) dt \quad (38)$$

$$L_{VII} = \int_{t_n}^t W dt = L_n + W_n(t - t_n) + \frac{k}{M_{VII}} \int_{t_n}^t \left( \int_{t_n}^t (L_s + x_0) dt \right) dt \quad (39)$$

gdzie masa zespołu odrzucanego:

$$M_{Vb} = M_b - M_s - M_z - m_n \quad (40)$$

W szczególności dla końca okresu VII (uderzenia zamka w tylny płask lufy) otrzymamy prędkość odrzutu  $W_r$  i drogę odrzutu  $L_r$  równą:

$$W_r = W_n + \frac{k}{M_{VII}} \int_{t_n}^{t_r} (L_s + x_0) dt \quad (41)$$

$$L_r = \int_{t_0}^{t_r} W dt = L_n + W_n(t_r - t_n) + \frac{k}{M_{VII}} \int_{t_n}^{t_r} \left( \int_{t_n}^t (L_s + x_0) dt \right) dt \quad (42)$$

W końcu okresu VII odrzutu następuje uderzenie zamka o tylny płask lufy oraz jego rozłączenie z suwadłem, a co za tym idzie zmiana prędkości, z jaką porusza się zespół odrzucany oraz zmiana jego masy (o masę zamka z nabojem). W celu wyznaczenia prędkości odrzutu po zderzeniu, posłużymy się równaniem zachowania pędu, pamiętając o tym, że suwadło z zamkiem porusza się w kierunku przeciwnym niż odrzucana broń. Prędkość  $W_r'$  odrzutu po zderzeniu wyniesie:

$$W_r' = \frac{(M_b - M_s - M_z - m_n)W_r - (M_z + m_n)W_r}{M_b - M_s} \quad (43)$$

W okresie VIII zespół odrzucany przyspieszany jest jedynie siłą ściskanej sprężyny powrotnej  $F$ . Prędkość odrzutu  $W_{VIII}$  w okresie VIII będzie równa:

$$W_{VIII} = W_r' + \frac{k}{M_{VIII}} \int_{t_r}^t (L_s + x_0) dt \quad (44)$$

gdzie masa zespołu odrzucanego  $M_{VIII}$  równa się:

$$M_{VIII} = M_b - M_s \quad (45)$$

Droga zespołu odrzucanego  $L_{VIII}$  w okresie VIII wyniesie:

$$L_{VIII} = \int_{t_0}^t W dt = L_r + W_r'(t - t_r) + \frac{k}{M_{VIII}} \int_{t_r}^t \left( \int_{t_r}^t (L_s + x_0) dt \right) dt \quad (46)$$

W szczególności dla końca okresu VIII odrzutu (chwila dojścia suwadła w skrajne przednie położenie) otrzymamy prędkość odrzutu  $W_p$  i drogę odrzutu  $L_p$  równą:

$$W_p = W_r' + \frac{k}{M_{VIII}} \int_{t_r}^{t_p} (L_s + x_0) dt \quad (47)$$

$$L_p = \int_{t_r}^{t_p} W dt = L_r + W_r'(t_p - t_r) + \frac{k}{M_{VIII}} \int_{t_r}^{t_p} \left( \int_{t_r}^t (L_s + x_0) dt \right) dt \quad (48)$$

W końcu okresu VIII odrzutu następuje zderzenie suwadła z komorą zamkową, a co za tym idzie zmiana prędkości, z jaką porusza się zespół odrzucany. Do wyznaczenia prędkości  $W_p'$  odrzutu po zderzeniu, posłużymy się równaniem zachowania pędu, stąd otrzymujemy:

$$W_p' = \frac{(M_b - M_s)W_p - M_s V_p}{M_b} \quad (49)$$

Prędkość  $W_p'$  jest prędkością zespołu odrzucanego w chwili zakończenia cyklu automatyki po wystrzeleniu jednego pocisku i wprowadzeniu kolejnego naboju do komory naboju. Z taką prędkością będzie (teoretycznie) kontynuowany odrzut swobodny rozpatrywanego zespołu odrzucanego aż do zainicjowania kolejnego wystrzału.

#### 4. WNIOSKI

1. W przypadku broni działającej na zasadzie odprowadzenia gazów prochowych występuje siła hamująca odrzut, powodowana działaniem ciśnienia gazów prochowych na przednią ścianę komory gazowej.
2. Siła hamująca powoduje zmniejszenie maksymalnej prędkości odrzutu broni, w porównaniu z analogiczną bronią nieautomatyczną lub działającą na innej zasadzie (np. odrzutu lufy lub zamka). Siła hamująca będzie tym większa, im większa będzie powierzchnia czołowa komory gazowej i ciśnienie wewnątrz tej komory.

3. Istotny wpływ na prędkość odrzutu broni mają zderzenia części ruchomych (suwadła, zamka, tłoka gazowego), zamieniające chwilowe masy i prędkości. Przy czym największe znaczenie dla parametrów odrzutu będą miały zderzenia suwadła z zamkiem z komorą zamkową.

*Artykuł zawiera wyniki pracy finansowanej przez MNiSW ze środków na naukę w latach 2007-2010 jako projekt rozwojowy.*

## LITERATURA

- [1] Leśnik G., Surma Z., Torecki S., Woźniak R., Termodynamiczny model działania broni z odprowadzeniem gazów prochowych w okresie napędzania suwadła, *Biuletyn WAT*, vol. LVIII, nr 3 (699), s. 193-210, 2009.
- [2] Kochański S., *Wybrane zagadnienia z podstaw projektowania broni strzeleckiej*, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 1986.
- [3] Surma Z., Torecki S., Woźniak R., Specyfika odrzutu swobodnego broni z odprowadzeniem gazów prochowych, *Materiały V Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia”*, s. 991-999, Waplewo, 6-8 października 2004.
- [4] Torecki S., *Balistyka wewnętrzna*, Wydawnictwo WAT, Warszawa 1980.

## Detailed Mathematical Model of the Gas Operated Weapon Recoil

Łukasz SZMIT, Stanisław TORECKI

**Abstract.** The paper presents analysis of the free recoil phenomenon of gas operated automatic small arms with short-stroke piston system. Physical and mathematical models of analysed system action have been presented too. Recoil phenomenon has been divided for several specific periods. Force generated by the pressure in the gas chamber decreases recoil velocity of the gas operated weapon. Collisions of the moving parts inside the weapon also affects the recoil velocity.

**Keywords:** mechanics, ballistics, weapon design, small arms, rifle

