



**Analiza procesów kształtujących pole zaburzeń
i ruch pocisku na etapie balistyki przejściowej.
Cz. I. Analiza parametrów fal uderzeniowych
wytwarzanych w lufie ruchem pocisku**

Andrzej PAPLIŃSKI

*Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki, Instytut Techniki Lotniczej
Zakład Inżynierii Bezpieczeństwa, ul. Gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa
e-mail: andrzej.paplinski@wat.edu.pl*

Streszczenie. W pracy przedstawiona została analiza parametrów pola nadciśnienia, jakie powstaje w wyniku sprężania przez pocisk gazów, które znajdowały się w lufie przed strzałem. Rozpatrywany jest etap, na którym przed czołem pocisku dochodzi do ukształtowania fali uderzeniowej. Przedstawione są zależności charakteryzujące wielkość ciśnienia i gęstości masowej sprężanego uderzeniowo gazu oraz szybkość fali uderzeniowej w funkcji prędkości pocisku.

Słowa kluczowe: mechanika, balistyka, prędkość pocisku, fale uderzeniowe

1. WSTĘP

Podstawową charakterystyką strzału jest prędkość wylotowa, z jaką pocisk opuszcza przewód lufy. Wartość prędkości wylotowej jest podstawą do podjęcia zadania balistyki zewnętrznej, w wyniku rozwiązania którego następuje wyznaczenie lub prognozowanie trajektorii lotu pocisku. Jednakże, przy próbie ścisłego sformułowania zagadnienia balistyki zewnętrznej łatwo możemy się przekonać, że warunki początkowe balistyki zewnętrznej nie mogą być odniesione do chwili, w której pocisk opuszcza wylot lufy i następuje

przekroczenie przez dno pocisku przekroju wylotowego lufy. Nie jest to bowiem chwila, poczynając od której lot pocisku może być określany tylko na podstawie parametrów fizycznych (ciśnienie, gęstość masowa, temperatura, szybkość i kierunek wiatru), jakie charakteryzują ośrodek (atmosferę), w którym porusza się pocisk.

Po opuszczeniu przewodu lufy pocisk w dalszym ciągu, w określonym przedziale czasu, podlega działaniu gazów prochowych, które napędzały pocisk w czasie jego przemieszczania się w lufie. W wyniku działania gazów prochowych wypływających z lufy wzdłuż pocisku powstaje gradient ciśnienia. Ciśnienie wywierane na dno pocisku jest większe od ciśnienia, jakie oddziałuje na czoło pocisku. W rezultacie, następuje podtrzymanie działania napędzającego gazów prochowych. Według wielu źródeł literaturowych, np. praca [1], obserwowany jest nawet niewielki wzrost prędkości pocisku w okresie przejściowym, po opuszczeniu lufy przez pocisk. Zagadnienia balistyki przejściowej, w szczególności dokładne określenie dystansu, na którym występuje działanie na pocisk gazów wypływających z lufy oraz rozpoznanie, czy to działanie ma i na ile wpływ na wzrost prędkości pocisku, są jednymi z mniej zbadanych zagadnień balistyki.

Działanie gazów prochowych wypływających z lufy nie jest jedynym czynnikiem, który określa charakter oddziaływań, jakich doznaje pocisk po opuszczeniu lufy. Poruszający się w lufie pocisk spręża i wypycha z lufy powietrze, które znajdowało się w lufie przed strzałem. W bilansie energetycznym strzału ilość energii, jaka jest zużywana na sprężanie i wypychanie gazów znajdujących się w lufie przed pociskiem stanowi znikomy udział. Gazy poprzedzające pocisk są natomiast znaczącym czynnikiem, który wywiera wpływ na charakter pola zaburzeń, jakie powstaje wokół pocisku opuszczającego lufę. Wypychane przez pocisk gazy tworzą obłok gazowy, który poprzedza pocisk. Ponieważ gazy wypychane z lufy przez pocisk mają prędkość bliską prędkości pocisku, pocisk po opuszczeniu lufy doznaje znacznie zredukowanego oporu, w stosunku do tego, jaki jest właściwy podczas ruchu pocisku w atmosferze. Redukcja oporu oraz resztkowe działanie napędzające gazów prochowych stanowią o specyfice ruchu pocisku w okresie przejściowym, bezpośrednio po opuszczeniu lufy. Autonomiczny lot pocisku, określony parametrami otaczającej atmosfery rozpoczyna się po opuszczeniu (wyprzedzeniu) przez pocisk pola zaburzeń tworzonego przez gazy wypychane przez pocisk oraz wypływające z lufy gazy prochowe. Poprawne określenie warunków początkowych zadania balistyki zewnętrznej wymaga określenia położenia (długość, wymiary pola zaburzeń) oraz prędkości, z jaką pocisk opuszcza okołowylotowe pole zaburzeń.

Wstępne pole zaburzeń wytworzone przez gazy wypychane z lufy ruchem pocisku, nakładanie się oddziaływań powodowanych przez gazy prochowe opuszczające lufę, tworzą złożone pole przepływu, w którym porusza się pocisk

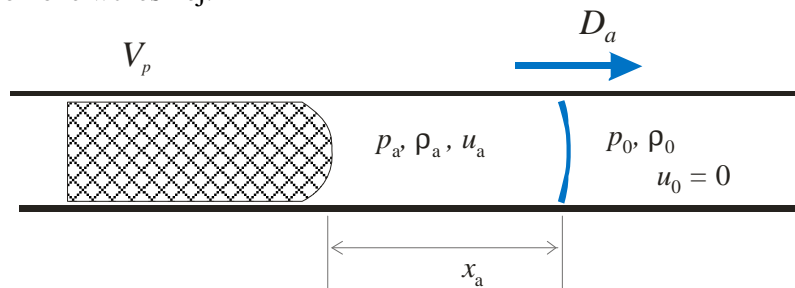
w okresie przejściowym. W pracy rozpatrywany jest jeden z czynników, który kształtuje charakterystyki ruchu pocisku na etapie balistyki przejściowej.

Przedmiotem pracy jest określenie parametrów fali uderzeniowej, jaka powstaje w lufie przed poruszającym się pociskiem. Przedstawiane są zależności charakteryzujące wielkości parametrów sprężanego gazu, ciśnienia i gęstości masowej oraz szybkość fali uderzeniowej w funkcji prędkości pocisku.

2. SFORMUŁOWANIE ZADANIA

Rozpatrujemy lufę, w której porusza się pocisk (rys. 1). Poruszający się pocisk wytwarza falę uderzeniową (D_a). Parametry gazów sprężanych ruchem pocisku oznaczmy symbolami p_a , ρ_a i u_a , które oznaczają odpowiednio ciśnienie, gęstość masową i prędkość cząstek sprężonego gazu.

Prędkość pocisku podczas strzału zmienia się w sposób niestacjonarny, przy czym najintensywniejsze zmiany następują w pierwszym okresie napędzania pocisku, gdy prędkość pocisku wzrasta od wartości zerowej. Przypadek gazu sprężanego ruchem pocisku w lufie jest ilustracją typowej sytuacji, w której następuje wytworzenie fali uderzeniowej. W pierwszym okresie ruchu przemieszczanie się pocisku powoduje wytwarzanie elementarnych fal nadciśnienia, które rozprzestrzeniają się z prędkością dźwięku i wyprzedzają znacznie pocisk. W miarę wzrostu prędkości źródła wymuszającego, rośnie szybkość rozprzestrzeniania się małych zaburzeń. Gdy prędkość pocisku osiąga wartość 300 m/s, szybkość powstających fal nadciśnienia wynosi około 600 m/s. Wraz ze wzrostem prędkości pocisk wytwarza elementarne fale nadciśnienia, które doganiają zaburzenia wytworzone wcześniej.



Rys. 1. Powstawanie fali uderzeniowej w gazach sprężanych ruchem pocisku w lufie:
 V_p – prędkość pocisku, D_a – szybkość rozprzestrzeniania się czoła fali,
 x_a – długość odcinka lufy wypełnionego sprężonym gazem

Fig. 1. Shock wave creation in gases compressed by travelling projectile along the barrel: V_p – projectile velocity, D_a – velocity of front wave propagation x_a – length of barrel with compressed gas

Następuje spiętrzenie zaburzeń i na czole obszaru zaburzonego powstaje strefa skokowej zamiany parametrów sprężanego gazu, front fali uderzeniowej. Podstawowe parametry charakteryzujące powstającą falę uderzeniową przedstawione zostały na rys. 1.

Podstawą do analizy stanu gazu w fali uderzeniowej powstającej przed poruszającym się w lufie pociskiem są zależności wiążące parametry sprężanego uderzeniowo gazu [2, 3].

$$u = u_0 + \sqrt{(p - p_0) \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho} \right)} \quad (1)$$

$$D = u_0 + \frac{1}{\rho_0} \sqrt{\frac{p - p_0}{\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho}}} \quad (2)$$

gdzie: D – szybkość rozprzestrzeniania się fali uderzeniowej; p , ρ i u odpowiednio ciśnienie, gęstość masowa i prędkość cząstek gazu sprężonego uderzeniowo gazu, natomiast p_0 , ρ_0 i u_0 – początkowe wartości parametrów obciążanego uderzeniowo gazu, odpowiednio ciśnienie, gęstość masowa i prędkość przemieszczania się cząstek gazu.

W przypadku gazu sprężanego ruchem pocisku

$$u_0 = 0 \quad (3)$$

Jeżeli broń znajduje się w ruchu, warunek określony zależnością (3) pozostaje słuszny, wielkość D określa w tym przypadku szybkość przemieszczania się fali uderzeniowej względem lufy.

3. OKREŚLENIE WIELKOŚCI CIŚNIENIA GAZU SPRĘŻANEGO RUCHEM POCISKU W FUNKCJI PRĘDKOŚCI POCISKU

Zależności (1) i (2) charakteryzują parametry fali uderzeniowej w funkcji zmiany ciśnienia i gęstości masowej sprężanego gazu. W przypadku fali uderzeniowej wymuszanej ruchem pocisku znana jest wielkość prędkości masowej cząstek gazu – jest ona równa prędkości przemieszczania się pocisku w lufie V_p

$$V_p = \sqrt{(p_a - p_0) \left(\frac{1}{\rho_0} - \frac{1}{\rho_a} \right)} \quad (4)$$

gdzie: p_a i ρ_a ciśnienie i gęstość masowa gazów sprężanych ruchem pocisku. W odniesieniu do fali uderzeniowej wymuszanej ruchem pocisku równanie (4) ma postać odwrotną.

Wielkości niewiadome, tj. ciśnienie i gęstość masowa sprężanego gazu, występują po prawej stronie równania, podczas gdy zmienna niezależna, tj. wartość prędkości pocisku – po lewej stronie. W celu zmniejszenia liczby niewiadomych, jakie występują po prawej stronie równania (4) wykorzystana może być zależność, która wiąże zmiany gęstości masowej w fali uderzeniowej ze wzrostem ciśnienia sprężanego uderzeniowo gazu. W przypadku gdy w odniesieniu do sprężanego gazu może być przyjęte założenie o stałości wykładnika politropy, zależność pomiędzy gęstością masową a ciśnieniem sprężanego uderzeniowo gazu może być określona ze wzoru [2, 3]

$$\frac{\rho_a}{\rho_0} = \frac{(k+1)p_a + (k-1)p_0}{(k+1)p_0 + (k-1)p_a} \quad (5)$$

gdzie: k – wykładnik politropy.

Po podstawieniu zależności (5) do wzoru (4) i przekształceniach, możemy otrzymać następujący wzór określający związek pomiędzy prędkością pocisku a ciśnieniem w fali uderzeniowej powstającej przed pociskiem

$$V_p = \sqrt{(p_a - p_0) \frac{1}{\rho_0} \frac{2(p_a - p_0)}{(k+1)p_a + (k-1)p_0}} \quad (6)$$

Zależność (6) pozostaje w dalszym ciągu niedogodna do praktycznego wykorzystania. Ciśnienie p_a pozostaje bowiem uwikłaną funkcją prędkości pocisku V_p . Równanie (6) może być sprowadzone do dwumianu kwadratowego względem ciśnienia p_a

$$p_a^2 - \left[2p_0 + V_p^2 \rho_0 \frac{k+1}{2} \right] p_a - V_p^2 \rho_0 \frac{k-1}{2} p_0 + p_0^2 = 0 \quad (7)$$

Po rozwiązaniu równania (8), wartość ciśnienia sprężanego gazu, w zależności od wartości prędkości pocisku, wyrażona będzie wzorem

$$p_a = p_0 + V_p^2 \rho_0 \frac{k+1}{4} + \sqrt{V_p^4 \rho_0^2 \left(\frac{k+1}{4} \right)^2 + V_p^2 k \rho_0 p_0} \quad (8)$$

Odnosząc prędkość pocisku do prędkości dźwięku w gazie przed pociskiem, zależność określająca wielkość ciśnienia sprężanego uderzeniowo gazu może być zapisana w postaci

$$\frac{p_a}{p_0} = 1 + U_p^2 k \frac{k+1}{4} + \sqrt{U_p^4 \left(k \frac{k+1}{4} \right)^2 + U_p^2 k^2} \quad (9)$$

gdzie: $U_p = V_p/c_0$, $c_0^2 = k \cdot p_0/\rho_0$.

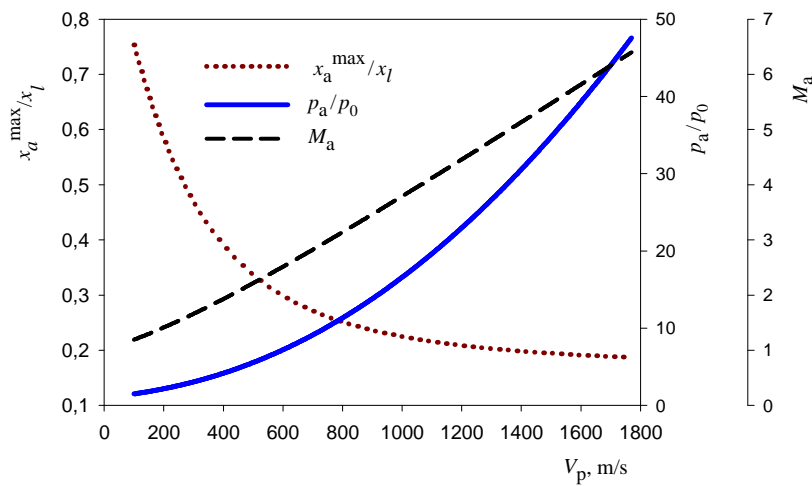
Odpowiednio, po podstawieniu zależności (9) i (5) do wzoru (2), szybkość rozprzestrzeniania się wymuszanej ruchem pocisku fali uderzeniowej może być wyrażona za pomocą wzoru

$$M_a = \sqrt{1 + U_p^2 \frac{(k+1)^2}{8} + U_p \frac{k+1}{2} \sqrt{U_p^2 \left(\frac{k+1}{4}\right)^2 + 1}} \quad (10)$$

gdzie: $M_a = D_a/c_0$.

4. ANALIZA WPŁYWU PRĘDKOŚCI POCISKU I DŁUGOŚCI LUFY NA PARAMETRY SPRĘŻANEGO UDERZENIOWO GAZU

Na rysunku 2 przedstawione zostały, w zależności od prędkości pocisku, wielkości ciśnienia powstającego w sprężanym uderzeniowo gazie (linia ciągła) oraz szybkość rozprzestrzeniania się powstającej fali uderzeniowej (linia przerywana).



Rys. 2. Związek pomiędzy prędkością pocisku a parametrami sprężonych uderzeniowo gazów, które wypełniały lufę przed strzałem; x_l – całkowita długość przewodu lufy, x_a^{max} – maksymalna długość odcinka lufy wypełnionego sprężonym uderzeniowo gazem

Fig. 2. Relationship between projectile velocity and parameters of compressed gases filled barrel before shot; x_l – total length of barrel, x_a^{max} – maximum length of barrel filled with compressed gas

Wyniki przedstawione na rys. 2 otrzymane zostały przy założeniu stałej wartości wykładnika politropy $k = 1,4$, co odpowiada powietrzu w warunkach normalnych.

Z przeprowadzonych oszacowań wynika, że założenie to jest poprawne do przedziału prędkości pocisku rzędu 1000 m/s. W przypadku, gdy prędkość pocisku osiąga wartość 1000 m/s, ściśle obliczone wartości parametrów fali uderzeniowej, uwzględniające zmiany wartości wykładnika politropy wraz ze wzrostem temperatury sprężanego powietrza (np. na podstawie metodyki [4]) wynoszą odpowiednio: $D_a = 1260$ m/s, $p_a/p_0 = 16,05$, $\rho_a/\rho_0 = 4,47$. Wykładnik politropy sprężonego powietrza jest wówczas równy $k = 1,378$. Dla wyższych prędkości pocisku, zwłaszcza w przypadku dział hiperdźwiękowych ($V_p = 1500 \div 1700$ m/s), przedstawiane rozwiązania wymagają uściśleń ze względu na zmianę wartości wykładnika politropy sprężanego uderzeniowo gazu.

Na rysunku 2 zaznaczony został również stosunek maksymalnej długości odcinka lufy wypełnionego sprężonym uderzeniowo gazem (x_a^{max}) do całkowitej długości przewodu lufy (x_l). Maksymalna długość odcinka x_a (rys. 1) osiągnięta jest w chwili, gdy czoło wytworzonej ruchem pocisku fali uderzeniowej osiąga wylot lufy. Ponieważ gaz, który przed strzałem miał gęstość masową wynoszącą ρ_0 zostaje sprężony do gęstości masowej ρ_a , zatem stosunek długości odcinka wypełnionego sprężonym gazem do całkowitej długości przewodu lufy równy jest stosunkowi gęstości masowych

$$\frac{x_a^{max}}{x_l} = \frac{\rho_0}{\rho_a} \quad (11)$$

Gdy pocisk zbliży się do wylotu lufy na odległość mniejszą niż x_a^{max} , rozpoczyna się wypływ z lufy gazów sprężanych ruchem pocisku. Należy zaznaczyć, że oszacowanie to jest poprawne przy założeniu stacjonarnego charakteru fali uderzeniowej powstającej przed pociskiem. Przy uwzględnieniu efektów niestacjonarnych, zwłaszcza miejsca i czasu formowania się fali uderzeniowej wymuszanej ruchem pocisku, parametry sprężanego uderzeniowo gazu oraz początek wypływu do atmosfery sprężanych gazów mogą się w określonym stopniu różnić od otrzymanych na podstawie przedstawianych oszacowań.

5. UWAGI KOŃCOWE

1. W pracy rozpatrzono charakterystyki fali uderzeniowej powstającej w lufie w wyniku sprężania przez przemieszczający się pocisk gazów znajdujących się w lufie przed strzałem.
2. Przedstawiono zależności charakteryzujące parametry sprężanego uderzeniowo gazu. Zmiany ciśnienia sprężanego gazu i szybkość powstającej fali uderzeniowej przedstawione zostały wykresnie, w funkcji prędkości przemieszczania się pocisku w lufie. Określona została

relacja maksymalnej wielkości odcinka lufy wypełnionego sprężonym gazem do całkowitej długości części roboczej przewodu lufy.

3. Uzyskane wyniki tworzą podstawę do analizy parametrów pola zaburzeń, jakie powstaje przed pociskiem opuszczającym wylot lufy.

Praca została zrealizowana jako część projektu badawczego nr O N501 053337 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2009-2012.

LITERATURA

- [1] Sieriebriakow M., *Balistyka wewnętrzna*, MON, Warszawa 1955.
- [2] Włodarczyk E., *Wstęp do mechaniki wybuchu*, PWN, Warszawa 1994.
- [3] Maranda S., Cudziło S., Nowaczewski J., Papliński A., *Podstawy chemii materiałów wybuchowych*, WAT, Warszawa 1997.
- [4] Papliński A., An implementation of the steepest descent method to evaluation of equilibrium composition of reactive mixtures containing components in condensed phases, *Central European Journal of Energetic Materials*, vol. 4, no. 1-2, 2007, pp. 135-150, 2007.

The Analysis of the Processes Influencing on the Projectile Movement in the Period of Transitory Ballistics. Part I. An Analysis of Shock Parameters of the Gases Compressed by Projectile Moving in the Barrel

Abstract. In the paper evaluation of the parameters of gases compressed by the piston moving in the tube is presented. The relations describing values of the pressure and mass density of the compressed gas as well as velocity of shock wave induced by the projectile moving in the barrel, in dependence of the piston velocity, are presented.

Keywords: mechanics, ballistics, projectile velocity, shock waves