



Balistyka wewnętrzna wielokomorowego poddźwiękowego działu gazowego

MAREK RADOMSKI

Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, Instytut Mechaniki i Konstrukcji,
02-524 Warszawa, ul. L. Narbutta 85

Streszczenie. W pracy przedstawiono model matematyczny opisujący zjawisko strzału w zakresie balistyki wewnętrznej z trzykomorowego działu gazowego, gdy prędkość wylotowa pocisku nie przekracza lokalnej prędkości dźwięku w gazie (około 340 m/s). Możliwości aplikacji modelu zilustrowano przykładowymi wynikami obliczeń.

Słowa kluczowe: balistyka wewnętrzna, działu gazowe

Symbole UKD: 623.52

Wykaz oznaczeń

B — stały współczynnik we wzorze określającym strumień masy gazu;

C — krytyczny stosunek ciśnień;

d — kaliber działu;

d_0 — średnica rurociągu (kapilary) łączącego komorę II i III;

d_1 — średnica rurociągu łączącego komorę I i II;

d_2 — średnica otworów łączących komorę II i III;

d_3 — średnica otworów łączących komorę III z otoczeniem;

k — wykładnik adiabaty;

l_w — droga dna pocisku w lufie;

m — masa pocisku;

N_1, N_2, N_3 — masy gazu w komorach I, II i III;

p_1, p_2, p_3 — ciśnienia gazu w komorach I, II i III;

p_{10}, p_{20}, p_{30} — początkowe ciśnienia gazu w komorach I, II i III;

p_0 — ciśnienie przy którym rozpoczyna się ruch pocisku;

p_{at} — ciśnienie atmosferyczne;

R — indywidualna stała gazowa;
 s — powierzchnia przekroju poprzecznego przewodu lufy;
 t — czas;
 T_1, T_2, T_3 — temperatury gazu w komorach I, II i III;
 T_{10}, T_{20}, T_{30} — temperatury początkowe gazu w komorach I, II i III;
 v — prędkość pocisku;
 x — droga pocisku (rys. 1);
 x_2, x_3 — odległości brzegów otworów o średnicach d_2 i d_3 od czoła zamka (rys. 1);
 $y_1(p_2, p_1)$ — funkcja przepływu;
 Y_1, Y_2, Y_3 — strumienie przepływającego gazu;
 W_{10}, W_{20}, W_{30} — pojemności komór I, II i III;
 W_3 — objętość bieżąca komory III;
 φ — współczynnik prac drugorzędnych;
 $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \mu_4$ — współczynniki strat przepływu.

1. Wstęp

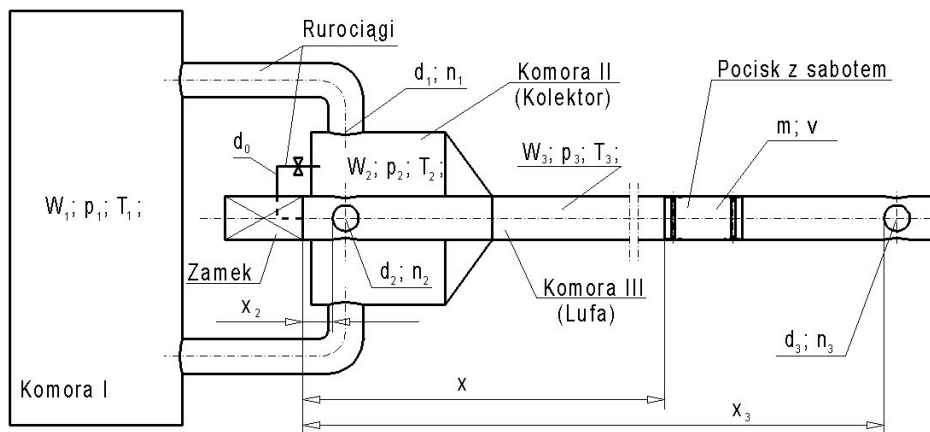
Działa gazowe są stosowane zazwyczaj podczas badań procesów dynamicznych do miotania różnego rodzaju obiektów. Ze względu na prędkość wylotową pocisku, można podzielić je na dwie grupy. Dla prędkości wylotowej, znacznie przekraczającej prędkość 340 m/s, stosowane są działa na gaz lekki (zazwyczaj hel) [1, 2, 3]. W pozostałych przypadkach stosowane są działa zwane armatkami powietrznymi lub pneumatycznymi, ze względu na wykorzystywane najczęściej medium robocze. Wymienione dwie grupy w zasadniczy sposób odróżnia zasada działania i co za tym idzie, budowa oraz sposób modelowania matematycznego.

Armatka powietrzna jest w swej istocie działem Lagrange'a [4]. W tym przypadku energia niezbędna do rozpędzenia pocisku jest dostarczona do gazu przed strzałem, przez wstępne jego sprężenie do wymaganego ciśnienia. Podział komory na części wynika zazwyczaj ze względów konstrukcyjnych i jest stosowany w celu zmniejszenia całkowitej długości urządzenia, szczególnie w przypadku dział o dużych kalibrach.

Istotną cechą odróżniającą armatkę powietrzną od działa na gaz lekki jest to, że jest ona układem jedno- lub wielokomorowym, przy czym w przypadku układów wielokomorowych możliwy jest przepływ masy gazu pomiędzy komorami i w każdej komorze znajduje się medium o takich samych właściwościach termodynamicznych. Ponadto z dostateczną dla zastosowań praktycznych dokładnością, proces strzału z takiego działa może być opisany modelem o parametrach skupionych, gdyż stosunkowo mała prędkość pocisku, która jest mniejsza od lokalnej prędkości dźwięku w gazie, sprawia iż zjawiska falowe mają wówczas niewielką intensywność i ich wpływ na opisywane zjawisko może być pominięty.

2. Model fizyczny

Punktem wyjścia do opracowania modelu fizycznego i matematycznego były prace [5, 6]. Uproszczony schemat działa przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat działa trzyczlorowego

W chwili $t = 0$ w komorze I (zbiornik ciśnieniowy) o pojemności W_{10} znajduje się gaz (np. azot) sprężony do ciśnienia p_{10} , o temperaturze T_{10} . Komora ta jest połączona n_1 rurociągami o średnicy d_1 z komorą II (kolektorem) o pojemności W_{20} . W komorze II znajduje się także gaz o ciśnieniu p_{20} i temperaturze T_{20} . Komora II połączona jest rurociągiem o średnicy d_0 z komorą III oraz n_2 otworami o średnicy d_2 , które są przysłonięte sabotem. W komorze II znajduje się gaz o ciśnieniu p_{30} i temperaturze T_{30} . Otwarcie zaworu na rurociągu o średnicy d_0 powoduje zainicjowanie strzału. Po napełnieniu komory III gazem do ciśnienia p_0 rozpoczyna się ruch pocisku o masie m , który po przebyciu drogi x_2 otwiera stopniowo przepływ przez n_2 otwory o średnicy d_2 . Następuje dalszy wzrost ciśnienia w komorze III. Pocisk jest w dalszym ciągu napędzany siłą parcia gazu na jego dno i po przebyciu drogi x_3 otwiera przepływ gazu do otoczenia (atmosfery) przez n_3 otwory o średnicy d_3 . Strumień masy gazu pomiędzy poszczególnymi komorami mogą być dodatnie lub ujemne, w zależności od kierunku przepływu, o którym decyduje relacja ciśnień w komorach. Strumień masy gazu wypływającego do otoczenia jest zawsze dodatni. Ponadto zakłada się, że:

1. Podczas strzału nie ma wymiany ciepła z powierzchniami komór, rurociągów, dnem pocisku i czołem zamka (izolacja adiabatyczna), gdyż w omawianym przypadku strumienie ciepła są stosunkowo niewielkie, ze względu na relatywnie małe różnice temperatur ścianek urządzenia

i gazu. W tym miejscu warto wspomnieć, że w dziale tego typu zazwyczaj ciepło jest dostarczane do gazu, w broni palnej zaś występują zawsze tzw. straty cieplne ze względu na wysoką temperaturę gazów prochowych.

2. Przepływ gazu pomiędzy komorami i do otoczenia jest quasiustalony i izentropowy.
3. Pomija się spadek ciśnienia wynikający z oporów przepływu w rurociągach.
4. Straty energii, wynikające z oporów przepływu i lokalnych oporów przepływu gazu (zawory, kolanka itp.), uwzględnia się przez wprowadzenie współczynników strat przepływu μ i współczynnika prac drugorzędnych φ .
5. Stopniowe otwieranie otworów o średnicach d_2 i d_3 przez pocisk uwzględnia się zakładając, że powierzchnia, przez którą przepływa gaz, jest proporcjonalna do stosunku powierzchni odkrytego odcinka koła F_3 o wysokości h do powierzchni całego koła F .
6. Gaz jest gazem doskonałym, którego zachowanie opisuje równanie stanu Clapeyrona i charakteryzowany jest stałą gazową R i wykładnikiem adiady k .

3. Model matematyczny

Przedstawiony w poprzednim punkcie model fizyczny pozwala sformułować model matematyczny, opisujący proces zachodzący w trzykomorowym dziale. W tym celu ułożono równania bilansów masy i energii gazu dla poszczególnych komór. Jako bilans energii wykorzystano równanie pierwszej zasady termodynamiki dla układów otwartych. W równaniach bilansowych uwzględniono kierunki przepływu masy gazu i entalpii pomiędzy poszczególnymi komorami, o których decydują relacje pomiędzy ciśnieniami gazu panującymi w komorach. Równania bilansowe uzupełniono znanymi z literatury wzorami dla strumieni przepływającego gazu, równaniami stanu gazu dla poszczególnych komór (w postaci różniczkowej), równaniem ruchu pocisku i związkiem kinematycznym prędkości i drogi pocisku. Po wykonaniu stosownych przekształceń i uporządkowaniu otrzymano następujący układ równań różniczkowych zwyczajnych:

1. Strumień gazu przepływającego pomiędzy komorami I i II n_1 rurociągami o średnicy d_1 :

$$\frac{dY_1}{dt} = \begin{cases} 0 & \text{dla } p_1 = p_2 \\ y_1(p_2, p_1)B_1 \frac{p_1}{\sqrt{T_1}} & \text{dla } p_1 > p_2 \\ -y_1(p_1, p_2)B_1 \frac{p_2}{\sqrt{T_2}} & \text{dla } p_1 < p_2 \end{cases} \quad (1)$$

2. Strumień gazu przepływającego pomiędzy komorami II i III rurociągiem o średnicy d_0 i n_2 otworami o średnicy d_2 :

$$\frac{dY_2}{dt} = \begin{cases} 0 & \text{dla } p_2 = p_3 \\ y_1(p_3, p_2)(B_2 + B_3) \frac{p_2}{\sqrt{T_2}} & \text{dla } p_2 > p_3 \\ -y_1(p_2, p_3)(B_2 + B_3) \frac{p_3}{\sqrt{T_3}} & \text{dla } p_2 < p_3 \end{cases} \quad (2)$$

3. Strumień gazu wypływający z komory III do otoczenia n_3 otworami o średnicy d_3 :

$$\frac{dY_3}{dt} = \begin{cases} 0 & \text{dla } x \leq x_3 \\ y_1(p_{at}, p_3) B_4 \frac{p_3}{\sqrt{T_3}} & \text{dla } x > x_3 \end{cases} \quad (3)$$

4. Bilanse masy gazu w komorach I, II i III:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\frac{dY_1}{dt} \quad (4)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{dY_1}{dt} - \frac{dY_2}{dt} \quad (5)$$

$$\frac{dN_3}{dt} = \frac{dY_2}{dt} - \frac{dY_3}{dt} \quad (6)$$

5. Równanie ruchu pocisku:

$$\frac{dv}{dt} = \begin{cases} 0 & \text{dla } p_3 \leq p_0 \wedge v = 0 \\ \frac{s}{\varphi m} (p_3 - p_{at}) & \text{dla } p_3 > p_0 \vee v \neq 0 \end{cases} \quad (7)$$

6. Związek kinematyczny drogi i prędkości pocisku:

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (8)$$

7. Bilans energii gazu w komorze I:

$$\frac{dT_1}{dt} = \begin{cases} -\frac{T_1}{N_1} \left[\frac{dN_1}{dt} + k \frac{dY_1}{dt} \right] & \text{dla } p_1 \geq p_2 \\ -\frac{1}{N_1} \left[T_1 \frac{dN_1}{dt} + kT_2 \frac{dY_1}{dt} \right] & \text{dla } p_1 < p_2 \end{cases} \quad (9)$$

8. Bilans energii gazu w komorze II:

$$\frac{dT_2}{dt} = \begin{cases} \frac{1}{N_2} \left[kT_1 \frac{dY_1}{dt} - T_2 \left(\frac{dN_2}{dt} + k \frac{dY_2}{dt} \right) \right] & \text{dla } (p_1 \geq p_2) \wedge (p_2 \geq p_3) \\ \frac{1}{N_2} \left[-T_2 \left(\frac{dN_2}{dt} + k \left(\frac{dY_2}{dt} - \frac{dY_1}{dt} \right) \right) \right] & \text{dla } (p_1 < p_2) \wedge (p_2 \geq p_3) \\ \frac{1}{N_2} \left[-T_2 \left(\frac{dN_2}{dt} - k \frac{dY_1}{dt} \right) - kT_3 \frac{dY_2}{dt} \right] & \text{dla } (p_1 < p_2) \wedge (p_2 < p_3) \\ \frac{1}{N_2} \left[k \left(T_1 \frac{dY_1}{dt} - T_3 \frac{dY_2}{dt} \right) - T_2 \frac{dN_2}{dt} \right] & \text{dla } (p_1 \geq p_2) \wedge (p_2 < p_3) \end{cases} \quad (10)$$

9. Bilans energii gazu w komorze III:

$$\frac{dT_3}{dt} = \begin{cases} \frac{1}{N_3} \left[kT_2 \frac{dY_2}{dt} - T_3 \left(\frac{dN_3}{dt} + k \frac{dY_3}{dt} \right) - \frac{(k-1)s}{R} pv \right] & \text{dla } p_2 \geq p_3 \\ \frac{1}{N_3} \left[-T_3 \left(\frac{dN_3}{dt} - k \left(\frac{dY_2}{dt} - \frac{dY_3}{dt} \right) \right) - \frac{(k-1)s}{R} pv \right] & \text{dla } p_2 < p_3 \end{cases} \quad (11)$$

10. Zmiana objętości komory III:

$$\frac{dW_3}{dt} = sv \quad (12)$$

11. Równania stanu gazu w komorach I, II i III

$$\frac{dp_1}{dt} = p_1 \left(\frac{1}{N_1} \frac{dN_1}{dt} + \frac{1}{T_1} \frac{dT_1}{dt} \right) \quad (13)$$

$$\frac{dp_2}{dt} = p_2 \left(\frac{1}{N_2} \frac{dN_2}{dt} + \frac{1}{T_2} \frac{dT_2}{dt} \right) \quad (14)$$

$$\frac{dp_3}{dt} = p_3 \left(\frac{1}{N_3} \frac{dN_3}{dt} + \frac{1}{T_3} \frac{dT_3}{dt} - \frac{1}{W_3} \frac{dW_3}{dt} \right) \quad (15)$$

gdzie:

$$B = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{R(k+1)}}; \quad C = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}; \quad (16)$$

$$B_1 = B \frac{\pi d_1^2}{4} n_1 \mu_1; \quad B_2 = B \frac{\pi d_0^2}{4} \mu_2; \quad (17)$$

$$B_3 = \begin{cases} 0 & \text{dla} & x \leq x_2 \\ B \frac{\pi d_2^2}{4} n_2 \mu_3 & \text{dla} & x \geq x_2 \\ BF_3 n_2 \mu_3 & \text{dla} & x > x_2 \wedge x < x_2 + d_2 \\ \text{gdzie:} & F_3 = \frac{d_2^2}{8} (\gamma - \sin \gamma) \\ & \gamma = 2 \arccos \left(\frac{d_2 - 2h}{d_2} \right) \\ & h = x - x_2 \end{cases} \quad (18)$$

$$B_4 = \begin{cases} 0 & \text{dla} & x \leq x_3 \\ B \frac{\pi d_3^2}{4} n_3 \mu_4 & \text{dla} & x \geq x_3 \\ BF_3 n_3 \mu_4 & \text{dla} & x > x_3 \wedge x < x_3 + d_3 \\ \text{gdzie:} & F_3 = \frac{d_3^2}{8} (\gamma - \sin \gamma) \\ & \gamma = 2 \arccos \left(\frac{d_3 - 2h}{d_3} \right) \\ & h = x - x_3 \end{cases} \quad (19)$$

$$y_1(p_2, p_1) = \begin{cases} 1 & \text{dla } p_2/p_1 \leq C \\ \sqrt{\frac{2}{(k-1)\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}} \sqrt{\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}}}}} & \text{dla } p_2/p_1 > C \end{cases} \quad (20)$$

Podany układ równań uzupełniają następujące warunki początkowe, dla czasu $t = 0$:

$$Y_1 = Y_2 = Y_3 = v = x = 0; \quad p_1 = p_{10}; \quad p_2 = p_{20}; \quad p_3 = p_{30}; \quad (21)$$

$$N_1 = \frac{W_{10}}{RT_{10} + \alpha}; \quad N_2 = \frac{W_{20}}{RT_{20} + \alpha}; \quad N_3 = \frac{W_{30}}{RT_{30} + \alpha}; \quad (22)$$

$$T_1 = T_{10}; \quad T_2 = T_{20}; \quad T_3 = T_{30}; \quad W_3 = W_{30}. \quad (23)$$

4. Przykładowe wyniki obliczeń

Przedstawiony w poprzednim punkcie układ równań różniczkowych zwyczajnych pierwszego rzędu rozwiązano numerycznie za pomocą mikrokomputera klasy IBM PC stosując algorytm oparty na metodzie Rungego-Kutty IV rzędu. W tym celu został opracowany program w języku Object Pascal z Borland Delphi v. 5.0 Standard, w którym zaadaptowano algorytm z procedury o nazwie „RungeKutta4system” z pracy [7].

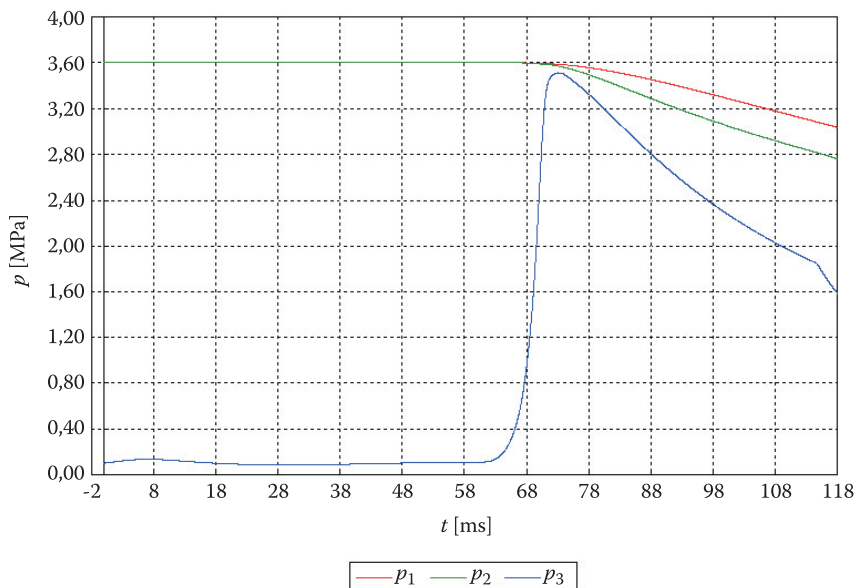
Model i program zweryfikowano dla istniejącej armatki pneumatycznej opisanej w pracach [8, 9]. Analiza otrzymanych wyników wykazała bardzo dobrą zbieżność, gdyż różnice pomiędzy charakterystycznymi wielkościami (prędkości wylotowe pocisku i ciśnienia maksymalne w komorach) obliczonymi i doświadczalnymi nie przekraczały 5%.

Poniżej przedstawiono przykładowe wyniki obliczeń dla działka trzykomorowego i następujących danych:

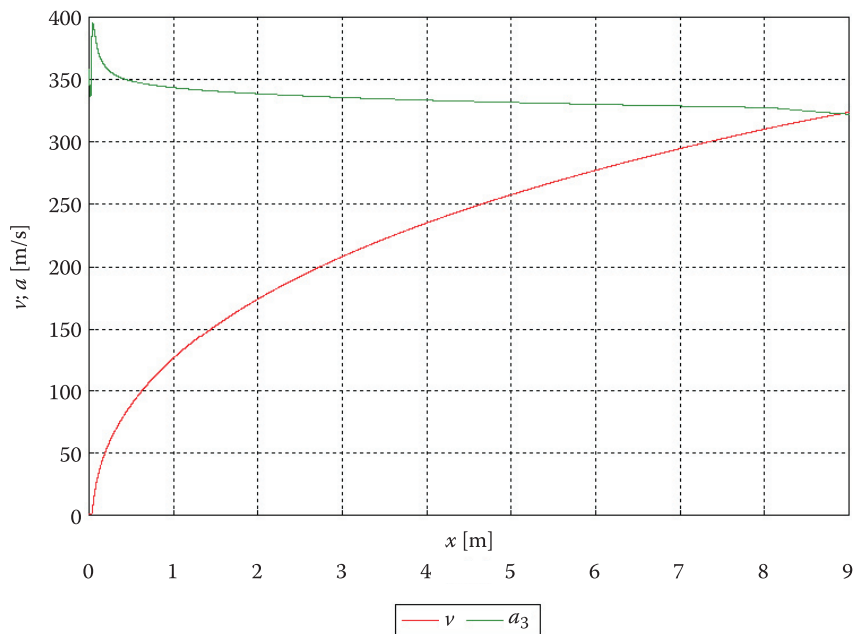
— kaliber	$d = 250 \text{ mm};$
— długość drogi pocisku w lufie	$l_w = 9 \text{ m};$
— położenie otworów o średnicy d_2	$x_2 = 0,03 \text{ m};$
— położenie otworów o średnicy d_3	$x_3 = 0,03 \text{ m};$

— średnica rurociągu	$d_0 = 2,4 \text{ mm};$
— średnica rurociągu	$d_1 = 150 \text{ mm};$
— średnica otworów	$d_2 = 125 \text{ mm};$
— średnica otworów	$d_3 = 150 \text{ mm};$
— współczynniki strat przepływu	$\mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = 0,82;$
— liczby otworów	$n_1 = n_2 = n_3 = 4;$
— masa pocisku z sabotem	$m = 17 \text{ kg};$
— współczynnik prac drugorzędnych	$\phi = 1,1;$
— pojemność komory I	$W_{10} = 2 \text{ m}^3;$
— pojemność komory II	$W_{20} = 0,1 \text{ m}^3;$
— pojemność komory III	$W_{30} = 0,005 \text{ m}^3$
— temperatura początkowa gazu w komorach I, II i III	$T_{10} = T_{20} = T_{30} = 288 \text{ K};$
— ciśnienie początkowe w komorach I i II	$p_{10} = p_{20} = 3,6 \text{ MPa};$
— ciśnienie początkowe w komorze III	$p_{30} = 0,1 \text{ MPa};$
— ciśnienie ruszenia pocisku	$p_0 = 0,1 \text{ MPa};$
— ciśnienie atmosferyczne	$p_{at} = 0,1 \text{ MPa};$
— czynnik roboczy azot techniczny:	stała gazowa $R = 296,75 \text{ J/kg/K};$
	wykładnik adiady $k = 1,4.$

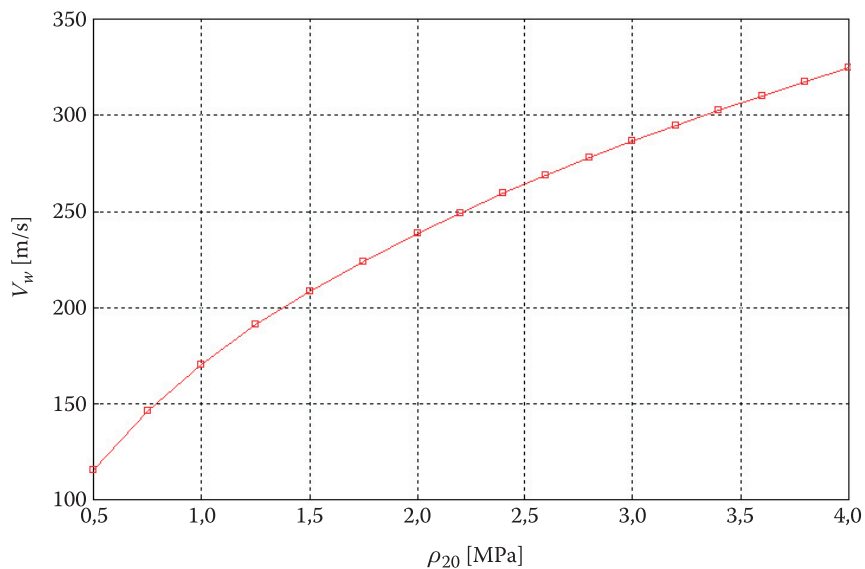
Na rysunku 2 zamieszczono przebiegi ciśnień gazu w komorach I, II i III w funkcji czasu, zaś na rysunku 3 przebiegi prędkości pocisku i lokalnej prędkości



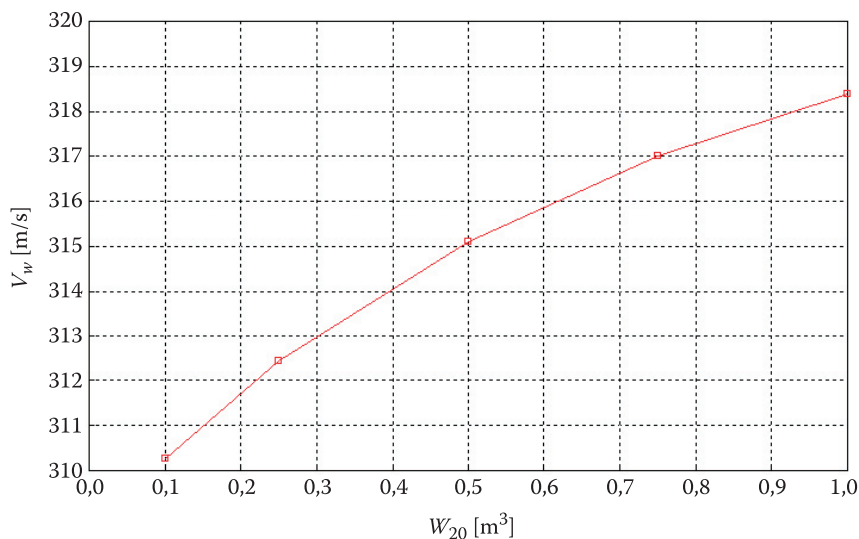
Rys. 2. Przebiegi ciśnień p_1 , p_2 i p_3 gazu w komorach I, II i III w funkcji czasu



Rys. 3. Przebiegi prędkości pocisku v i lokalnej prędkości dźwięku a_3 w gazie zawartym w komorze III, w funkcji drogi pocisku x



Rys. 4 Wpływ zmian ciśnień początkowych w komorach I i II ($p_{10} = p_{20}$) na prędkość wylotową pocisku v_w , dla $l_w = 8$ m



Rys. 5. Wpływ zmian pojemności komory II (W_{20}) na prędkość wylotową pocisku v_w , dla $l_w = 8$ m i $p_{10} = p_{20} = 3,6$ MPa

dźwięku w gazie zawartym w komorze III, w funkcji drogi pocisku. Rysunki 4 i 5 ilustrują wpływ zmian ciśnień początkowych w komorach I i II ($p_{10} = p_{20}$) oraz zmian pojemności komory II (W_{20}) na prędkość wylotową pocisku.

Przedstawione wyniki ujawniają bardzo dobrą możliwość sterowania prędkością wylotową pocisku za pomocą ciśnienia początkowego w komorach I i II ($p_{10} = p_{20}$) oraz stosunkowo niewielki wpływ zmian pojemności komory II (W_{20}) (kolektora) na prędkość wylotową pocisku.

5. Podsumowanie

Wydaje się, że zaprezentowany model może być z powodzeniem stosowany w procesie balistycznego projektowania wielokomorowych dział gazowych, gdy zakładana prędkość wylotowa pocisku nie przekracza lokalnej prędkości dźwięku w gazie i wpływ zjawisk falowych na zjawisko strzału może być pominięty. Model ten może być także przydatny podczas eksploatacji działu do planowania eksperymentu, np. przez odpowiednią implementację modelu w mikroprocesorowym systemie sterowania pracą urządzenia.

Artykuł wpłynął do redakcji 19.05.2008 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w czerwcu 2008 r.

LITERATURA

- [1] W. D. CROZIER, W. HUME, *High Velocity Light-gas Gun*, J. of Applied Physics, v. 28, no 8, 1957.
- [2] A. JOURNEAU, *Étude Théorique du Canon à Gaz Léger*, Mémorial de l'Artillerie Française, t. 37, fasc. 3, 1963, 519-557.
- [3] R. TRĘBIŃSKI, E. WŁODARCZYK, *O zastosowaniu metody S. K. Godunowa do rozwiązania problemu quasi-jednowymiarowego przepływu gazu z falą uderzeniową*, Biul. WAT, 31, 9, 1982, 11-28.
- [4] A. E. A. LOVE, F. B. PIDDUCK, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 222, 1921-22, 167-226.
- [5] A. RADOMSKA, M. RADOMSKI, *Rozwiązanie problemu głównego balistyki wewnętrznej pistoletu policyjnego HK 9 mm PARA*, PTUiR, 34, Zielonka, 1984, 37-53.
- [6] M. RADOMSKI, *Analiza procesu spalania w „Bombie Crawforda”*, maszynopis, IMiK PW, Warszawa, 2006.
- [7] A. MARCINIAK, D. GREGULEC, J. KACZMAREK, *Podstawowe procedury numeryczne w języku Turbo Pascal*, Nakom, Poznań, 1997.
- [8] J. IWASZKO, *Armata powietrzna do badania osłon obrabiarek. Symulacja komputerowa i założenia konstrukcyjne*, mat. konf. „Napędy i Sterowania Hydrauliczne i Pneumatyczne ‘2005’”, Wrocław, 2005, 217-224.
- [9] R. JASTRZĘBSKI, *Stanowisko do udarowego badania osłon obrabiarek z działkiem pneumatycznym*, mat. konf. „Napędy i Sterowania Hydrauliczne i Pneumatyczne ‘2005’”, Wrocław, 2005, 473-479.

M. RADOMSKI

Interior ballistics of low-velocity multi-chamber gas gun

Abstract. The interior ballistics model of low velocity (to 340 mps) multi chamber gas gun has been presented. The possibilities of application of the model illustrated with an example of calculations results.

Keywords: interior ballistics, gas gun

Universal Decimal Classification: 623.52