

## ZASTOSOWANIE FUNKCJI ŻYWOŚCI PROCHU ARTYLERYJSKIEGO W OBLICZENIACH BALISTYKI WEWNĘTRZNEJ

**Streszczenie:** W artykule zawarto opis metody wykorzystującej eksperymentalną dynamiczną funkcję żywości prochu, uzyskaną w wyniku spalania prochu w bombie manometrycznej, do obliczeń parametrów balistyki wewnętrznej działa. Przeprowadzono obliczenia dla dwóch wariantów ładunków miotających i porównano z wynikami badań strzelaniem. Zgodność uzyskanych wyników wskazuje, że metoda może być stosowana do projektowania nowych systemów broni artyleryjskiej z wystarczającą dokładnością.

Słowa kluczowe: działko, ładunek miotający, proch, żywość prochu, balistyka wewnętrzna

## AN APPLICATION OF EXPERIMENTAL VIVACITY FUNCTION OF GUN PROPELLANT TO INTERIOR BALLISTIC CALCULATIONS

**Abstract:** The article includes the description of the method on calculation of interior ballistic parameters of gun with use of the experimental dynamic vivacity function of propellant obtained from closed vessel tests. The author performed calculations for two variants of propellant charges and their results compared to experimental data. The theoretical and experimental data confirm that the method is useful for design of new gun systems with satisfactory accuracy.

Keywords: gun, propellant charge, powder, vivacity, interior ballistic

### 1. Wstęp

Używane w kraju metody obliczeń balistyki wewnętrznej oparte są na głównie na przyjęciu geometrycznego prawa spalania się prochu w przewodzie lufy za pociskiem. Metody te omawiane są przez Sieriebriakowa w monograficznej pracy [1]. W państwach NATO obowiązuje porozumienie standaryzacyjne STANAG 4367 [2], opisujące termodynamiczny model rozwiązania problemu głównego balistyki wewnętrznej dla uśrednionych parametrów. W modelu tym także przyjęto geometryczne prawo spalania się prochu. Mimo prób normalizacji obliczeń balistycznych wiele firm posługuje się własnymi metodami, zwłaszcza dla broni i amunicji będących w użytkowaniu od wielu lat. Powoduje to niekiedy trudności we współpracy, zwłaszcza gdy zachodzi konieczność zakupu materiałów miotających za granicą. W niniejszej pracy zaproponowano metodę obliczania podstawowych parametrów balistyki wewnętrznej działa, wykorzystując żywość dynamiczną prochu jako parametr umożliwiający łatwiejsze porozumienie pomiędzy konstruktorami i producentami prochu.

## 2. Podstawowe równania balistyki wewnętrznej

Poniżej podano zawarte w porozumieniu standaryzacyjnym STANAG 4367 podstawowe równania rekomendowane do stosowania przy rozwiązywaniu problemu głównego balistyki wewnętrznej, zachowując oryginalne oznaczenia parametrów, opisujące ruch pocisku w przewodzie lufy, prędkość pocisku, ciśnienie produktów spalania na dno pocisku, objętościową prędkość spalania ładunku miotającego, średnie ciśnienie balistyczne w przewodzie lufy.

Równanie ruchu pocisku w lufie ma postać:

$$\frac{d(v_p)}{dt} = \frac{A(P_b - f_R br - P_g)}{m_p},$$

gdzie:

$v_p$  - prędkość pocisku,

$A$  - pole przekroju poprzecznego pocisku,

$P_b$  - ciśnienie produktów spalania działające na dno pocisku,

$f_R br$  - funkcja tarcia pocisku o ścianki przewodu lufy,

$P_g$  - ciśnienie powietrza w przewodzie lufy przed pociskiem.

$m_p$  - masa pocisku

Ciśnienie produktów spalania działające na dno pocisku wyrażone jest wzorem:

$$P_b = [P + C_T \frac{(P_g + f_R br)}{3m_p}] / \left[ 1 + \frac{C_T}{3m_p} \right],$$

gdzie:

$P$  - średnie ciśnienie balistyczne w przewodzie lufy,

$C_T$  - masa ładunku miotającego.

Prędkość pocisku:

$$v_p = \int_0^t \frac{d(v_p)}{dt} dt.$$

Ciśnienie na dno przewodu lufy:

$$P_0 = P_b + \frac{C_T}{2m_p} (P_b - f_R br - P_g).$$

Objętościowa prędkość spalania ładunku miotającego:

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{Sr}{V},$$

gdzie:

$r$  - prędkość liniowa palenia się prochu (w funkcji ciśnienia  $P$ ),

$S$  - powierzchnia palenia się prochu,

$V$  - objętość prochu

Względna objętość spalonego ładunku miotającego:

$$Z = \int_0^t \left( \frac{dZ}{dt} \right) dt,$$

Średnie ciśnienie balistyczne w przewodzie lufy (prawo Noble'a-Abel'a):

$$P = \frac{TF C_T Z}{V_c T_0},$$

gdzie:

$T$  - temperatura palenia się prochu,

$F$  - siła prochu,

$V_C$  – objętość przestrzeni za pociskiem określona równaniem:

$$V_C = V_0 + Ax - \frac{C_T}{\rho}(1 - Z) - C_T b Z$$

$V_0$  – objętość swobodna komory naboju,

$x$  – droga pocisku w przewodzie lufy,

$\rho$  – gęstość prochu,

$b$  – współobjętość gazów prochowych (kowolumen)

$T_0$  – temperatura gazów prochowych określona równaniem:

$$T_0 = \frac{\frac{FC_T Z}{\gamma - 1} - E_{pt} - E_{pr} - E_p - E_{br} - E_r - E_d - E_h}{\frac{FC_T Z}{\gamma - 1}}$$

$\gamma$  – wykładnik adiabaty dla gazów prochowych,

$E_{pt}$  – energia kinetyczna ruchu postępowego pocisku,

$E_{pr}$  – energia kinetyczna ruchu obrotowego pocisku,

$E_p$  – energia zużyta na przesunięcie ładunku miotającego,

$E_{br}$  – energia zużyta na pokonanie oporów tarcia w przewodzie lufy,

$E_r$  – energia odrzutu,

$E_h$  – energia zużyta na ogrzanie ścianek lufy.

Powyższe równania są w zasadzie zbliżone do podawanych w pracy Sieriebriakowa [1]. Różnice polegają głównie na możliwości uwzględnienia złożonego procesu początkowego stadium ruchu pocisku i indywidualnego uwzględniania prac drugorzędnych [3]. Wymaga to przed rozpoczęciem obliczeń znajomości wielu charakterystyk zarówno dotyczących właściwości prochów jak też systemu broni, które nie zawsze są dostępne w momencie przystępowania do prac projektowych. Ponadto dane te otrzymywane z różnych źródeł (np. od zagranicznego producenta prochów) często są nieprecyzyjne, co powoduje, że wyniki obliczeń nie potwierdzają się w badaniach poligonowych. Autorzy normy STANAG 4367 zdawali sobie sprawę z tych trudności i zaproponowali wprowadzanie współczynników poprawkowych (dotyczących np. siły prochu, prędkości palenia się prochu, strat cieplnych, tarcia pocisku w przewodzie lufy itp.) w celu „dopasowania” wyników obliczeń do wyników rzeczywistych. Oczywiście jest, że taka sytuacja nie jest „komfortowa” dla konstruktorów broni i amunicji. W dalszej części niniejszej artykułu zaproponowano metodę obliczeń parametrów balistyki wewnętrznej pozwalającą na oszacowanie ich wartości na wstępnym etapie prac, opartą na wykorzystaniu dynamicznej funkcji żywości prochu  $L$ , określanej dla danego prochu (a także i danej partii produkcyjnej prochu) przy użyciu bomby manometrycznej.

### 3. Funkcja żywości dynamicznej prochu jako parametr wejściowy do obliczeń balistycznych

Badania własności balistycznych prochu polegają na spalaniu prochu w stałej objętości i rejestracji przebiegu ciśnienia w funkcji czasu. Na podstawie tych pomiarów wyznacza się podstawowe charakterystyki prochu takie jak:

- siła prochu  $F$ ,
- współobjętość gazów prochowych (kowolumen)  $b$ ,
- współczynnik liniowego prawa szybkości spalania  $\beta$ ,
- funkcja żywości dynamicznej prochu  $L$ .

Zazwyczaj obliczenia balistyki wewnętrznej przeprowadza się na podstawie określonych przy użyciu bomby manometrycznej parametrów: siły prochu, kowolumenu i współczynnika liniowego prawa szybkości spalania się prochu, przyjmując geometryczne zależności pomiędzy powierzchnią spalania i objętością spalonego prochu.

Obliczenia te dają zadowalające rezultaty pod warunkiem, że proch posiada stałe własności w objętości ziarna, prędkość spalania prochu zależy liniowo od ciśnienia (lub określonej innej zależności np. wykładniczej), oraz ziarna nie ulegają rozpadowi w trakcie spalania.

Dokładniejsze wyniki można uzyskać wykorzystując wspomniany wyżej parametr – funkcję żywości dynamicznej prochu  $L$  (dynamic vivacity function) określoną równaniem:

$$L = \frac{1}{PP_{\max}} \frac{dP}{dt} = \frac{1}{P} \frac{dZ}{dt},$$

Jak widać funkcja  $L$  określa szybkość dopływu gazów do przestrzeni pozapociskowej w funkcji ciśnienia, Ponieważ:

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{Sr}{V},$$

zakładając stałą powierzchnię palenia się prochu niezależną od  $Z$  (proch rurkowy o grubości warstwy palnej  $2e_1=2$ ), można przyjąć, że jedynie współczynnik szybkość palenia  $\beta_L$  zmienia się w zależności od wartości żywości prochu:

$$\beta_L = Le_1,$$

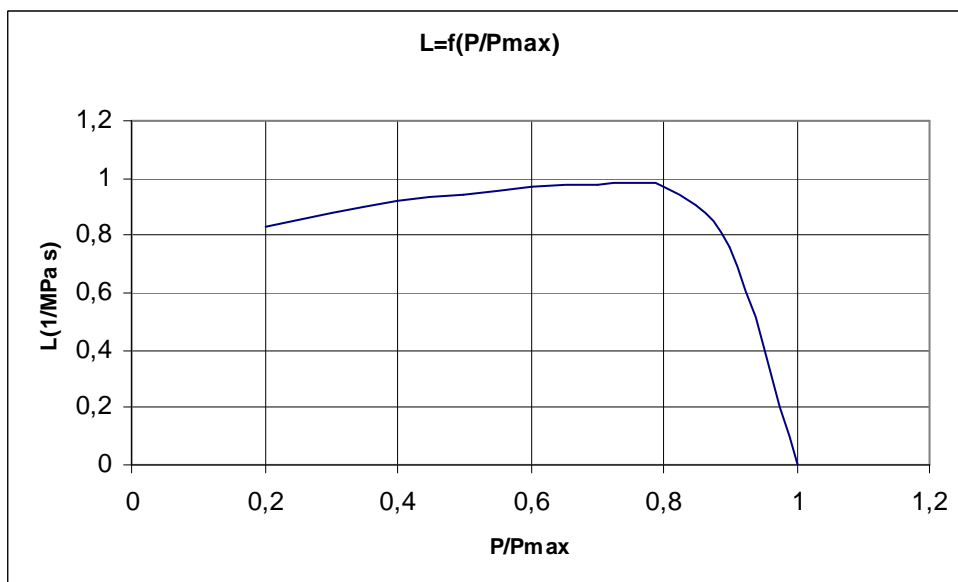
gdzie:  $\beta_L$  – pozorny współczynnik szybkości palenia się prochu.

W Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia opracowano program VIVA, w którym wykorzystano wyżej omówioną metodę.

#### 4. Eksperymentalna weryfikacja wyników obliczeń

Obliczenia balistyki wewnętrznej wykonane przy użyciu programu VIVA zweryfikowano w trakcie badań ładunków miotających do amunicji artyleryjskiej. Użyto prochu dostarczonego przez producenta, który deklarował, że w określonej konfiguracji: masa pocisku - 7 kg i masa prochu – 7,8 kg , pocisk uzyska prędkość początkową 1660 m/s , a ciśnienie maksymalne w przewodzie lufy nie przekroczy 430 MPa.

Żywość prochu w zakresie od 0,2  $P/P_{\max}$  do 1,0  $P/P_{\max}$  przedstawiona na rys.1 została określona w zakładzie produkcyjnym przy użyciu bomby manometrycznej. Nie podano wartości  $L$  , istotnej dla fazy rozpalania się ładunku prochowego, ponieważ w zakresie tym występują duże oscylacje, pomiary są niedokładne i zazwyczaj przy ustabilizowanej produkcji producenci podają wartości w zakresie od 0,2  $P/P_{\max}$  do 0,7  $P/P_{\max}$  . Niekiedy sprawdza się tylko  $L$  dla  $P=0,625P_{\max}$  [4]. W związku z tym, w procesie symulacji strzału przyjęto ekstrapolację zmienności  $L$  w zakresie 0,0 - 0,2 opisaną parabolą styczną w punkcie [0;0] do osi  $y$  i styczną do znanej wartości  $L$  w punkcie [0,2; $L_{0,2}$ ]



**Rys.1. Funkcja żywości prochu użytego w badaniach.**

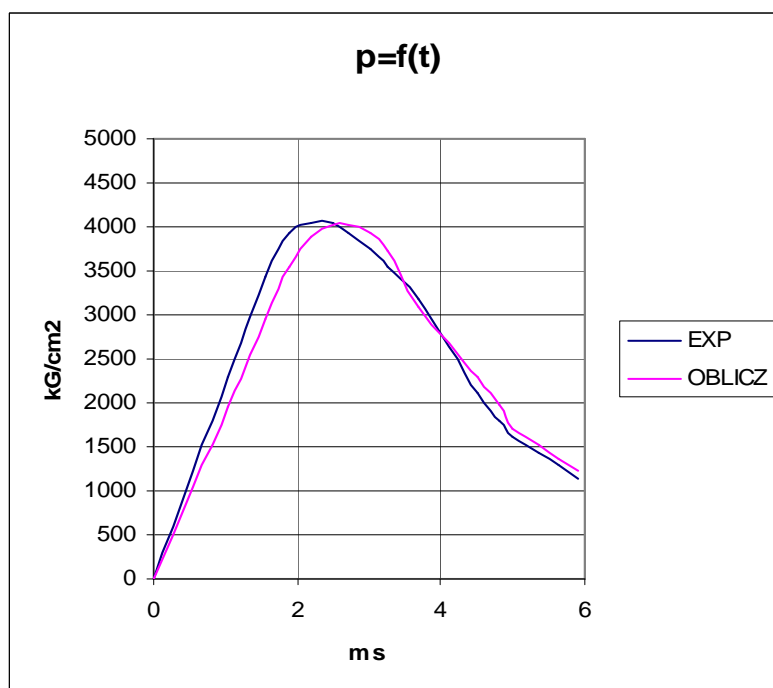
Obliczenia balistyczne oraz badania strzelaniem przeprowadzono dla dwóch wariantów:

-Wariant I – masa materiału miotającego  $C_T=7,4$  kg,

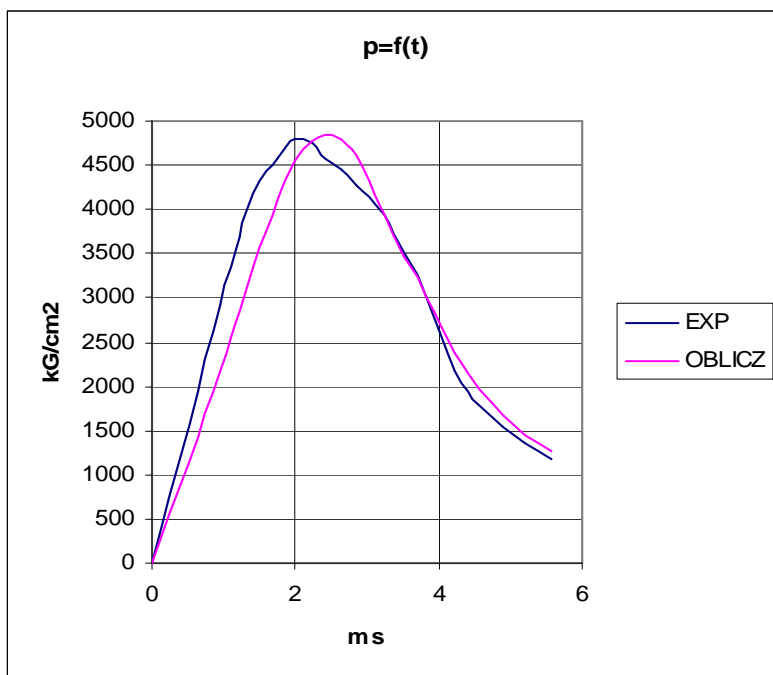
-Wariant II- masa materiału miotającego  $C_T=7,8$  kg.

Prędkość początkową mierzono za pomocą zestawu Dopplera, a ciśnienie czujnikiem piezoelektrycznym umiejscowionym w rejonie dna przewodu lufy.

Wykresy zmienności ciśnienia  $p$  na dno przewodu lufy w funkcji czasu  $t$  dla obu badanych wariantów przedstawiono na rys.2 i rys.3.



**Rys.2. Przebieg funkcji  $p=f(t)$  dla wariantu I.  
OBLICZ – obliczeniowy, EXP – eksperymentalny.**



**Rys.2. Przebieg funkcji  $p=f(t)$  dla wariantu II.  
OBLICZ – obliczeniowy, EXP – eksperymentalny.**

W tabeli nr 1 zestawiono zbiorcze wyniki badań strzelaniem i wyniki obliczeń wykonanych w programie VIVA dla wariantu I.

Analogiczne zestawienie dla wariantu II podano w tabeli nr 2.

Tabela 1

Wariant I $C_T=7,4$ kg	obliczenia	eksperyment
Prędkość początkowa $v_{p0}$ (m/s)	1544	1536
Ciśnienie maksymalne na dno przewodu lufy $P_{0max}$ (MPa)	403	409
Ciśnienie maksymalne balistyczne $P_{0max}$ (MPa)	356	-

Tabela 2

Wariant II $C_T=7,8$ kg	obliczenia	eksperyment
Prędkość początkowa $v_{p0}$ (m/s)	1622	1619
Ciśnienie maksymalne na dno przewodu lufy $P_{0max}$ (MPa)	484	482
Ciśnienie maksymalne balistyczne $P_{0max}$ (MPa)	427	-

Wyniki badań strzelaniem w pełni potwierdziły przydatność metody obliczeniowej opartej na wykorzystaniu rzeczywistej funkcji żywości prochu do opisu zjawiska strzału w broni artyleryjskiej. Widoczne na wykresach niewielkie opóźnienie (ok. 0,3 ms) wystąpienia obliczonego ciśnienia maksymalnego w stosunku do określonego w badaniu strzelaniem, można wyjaśnić nie uwzględnianiem (z braku danych o funkcji żywości dla okresu początkowego) wpływu względnego wzrostu żywości prochu w początkowej fazie palenia się prochu.

## 5. Wnioski

Z przedstawionych powyżej analiz i wyników obliczeń parametrów balistycznych z wykorzystaniem programu VIVA oraz przeprowadzonych badań strzelaniem, można stwierdzić, że metoda wykorzystania funkcji rzeczywistej żywości prochu w obliczeniach balistyki wewnętrznej działa jest przydatna na etapie projektowania i doboru ładunku miotającego do nowych wzorów amunicji. Umożliwia skrócenie tego okresu i zmniejszenie ilości kosztownych i czasochłonnych badań strzelaniem.

## Literatura

- [1] Sieriebriakow M., *Balistyka wewnętrzna*, MON, Warszawa, 1955
- [2] *STANAG 4367 LAND (Ed. 2) – Thermodynamic interior ballistic model with global parameters*, MAS, Bruksela, 2000
- [3] Gula A., Analiza metod obliczeń balistyki obowiązujących w NATO, *Problemy Techniki Uzbrojenia i Radiolokacji*, Zeszyt 70, str. 7, Zielonka, 1999
- [4] Grivell M.R., *The closed vessel test and determination of ballistic properties of gun propellants*, DTIC., Adelaide, 1983