



Obliczenia charakterystyk termodynamicznych gazów prochowych

ZBIGNIEW SURMA

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki, Instytut Elektromechaniki,
00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

Streszczenie. W pracy przedstawiono metodę oraz wyniki numerycznych obliczeń składu i charakterystyk termodynamicznych produktów spalania stałych materiałów miotających (prochów) w stałej objętości. Otrzymane charakterystyki, takie jak izochoryczno-adiabaticzna temperatura spalania T_s , siła prochu f oraz stosunek ciepł właściwych $k=c_p/c_v$, stosowane są w obliczeniach balistyki wewnętrznej. Za pomocą opracowanego programu komputerowego wykonano obliczenia dla wybranych prochów (nitrocelulozowych i nitroglicerynowego) oraz przeanalizowano wpływ ciśnienia na charakterystyki termodynamiczne gazów prochowych. Porównano charakterystyki prochów wyznaczone z wykorzystaniem opracowanego programu oraz programu CHEETAH.

Słowa kluczowe: balistyka wewnętrzna, spalanie, proch

Symbole UKD: 623.52

1. Wstęp

Do prowadzenia obliczeń balistyki wewnętrznej i analizy działania prochowych układów miotających niezbędne są dane wejściowe, spośród których część stanowią charakterystyki produktów spalania (gazów prochowych) prochowego ładunku miotającego, m.in. izochoryczno-adiabaticzna temperatura spalania T_s , tzw. siła prochu $f=RT_s$, gdzie R — stała gazowa gazów prochowych, oraz stosunek ciepł właściwych $k=c_p/c_v$, przy stałym ciśnieniu i przy stałej objętości. W dotychczas stosowanej w kraju praktyce, siłę prochu f wyznacza się w oparciu o wyniki doświadczalnych badań pirostatycznych, natomiast wartość wykładnika adiabaty przyjmuje się: do wylotu pocisku z lufy $k=1,2$, w okresie powylotowym $k=1,25$ [6]. W rozpowszechnionym w państwach NATO modelu matema-

tycznym strzału, opisanym w porozumieniu standaryzacyjnym NATO [12], oprócz wymienionych f i k wykorzystuje się ponadto temperaturę spalania T_s prochu.

W związku z powyższym, w celu wyznaczania charakterystyk gazów prochowych metodami teoretycznymi, opracowano na świecie wiele programów, tzw. kodów termochemicznych, spośród których najbardziej znanymi są: BAGHERA [2], BLAKE [3] oraz CHEETAH [4]. Możliwościom wykorzystania programu CHEETAH do wyznaczania charakterystyk termodynamicznych gazów prochowych poświęcona jest praca [9].

W artykule zaprezentowano metodę obliczeń opartą o stałe równowagi termochemicznej [1, 7, 8]. Wykorzystując opracowany program komputerowy, przeprowadzono obliczenia składu i właściwości termodynamicznych produktów spalania wybranych prochów w stałej objętości. Charakterystyczne wyniki obliczeń porównano z wynikami otrzymanymi z programu CHEETAH. Przeanalizowano wpływ ciśnienia gazów prochowych na parametry termodynamiczne gazów prochowych.

2. Układ równań i metoda rozwiązania

Przedmiotem analiz jest stały materiał miotający — proch, w skład którego wchodzi cztery pierwiastki: węgiel C, wodór H, tlen O oraz azot N. Ze względu na wysoką temperaturę spalania T_s prochów (2500-3500 K), w produktach ich spalania będą zachodzić reakcje dysocjacji termicznej i mogą występować obok takich gazów, jak: CO_2 , CO, H_2O , H_2 , N_2 , O_2 produkty dysocjacji: OH, NO, H, O, N. Określenie składu gazowych produktów spalania prochu wymaga więc rozwiązania układu jedenastu równań:

a) czterech równań zachowania masy:

$$g_C = \frac{12}{\sum_i \mu_i p_i} (p_{\text{CO}_2} + p_{\text{CO}}) \quad (1a)$$

$$g_H = \frac{1}{\sum_i \mu_i p_i} (2p_{\text{H}_2\text{O}} + 2p_{\text{H}_2} + p_{\text{OH}} + p_{\text{H}}) \quad (1b)$$

$$g_O = \frac{16}{\sum_i \mu_i p_i} (2p_{\text{O}_2} + 2p_{\text{CO}_2} + p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{CO}} + p_{\text{OH}} + p_{\text{NO}} + p_{\text{O}}) \quad (1c)$$

$$g_N = \frac{14}{\sum_i \mu_i p_i} (2p_{\text{N}_2} + p_{\text{NO}} + p_{\text{N}}) \quad (1d)$$

oraz

b) siedmiu równań stałych równowagi chemicznej:

$$K_1(T) = \frac{p_{CO} \cdot p_{O_2}^{0.5}}{p_{CO_2}} \quad K_2(T) = \frac{p_{CO} \cdot p_{H_2O}}{p_{CO_2} \cdot p_{H_2}} \quad K_3(T) = \frac{p_{OH} \cdot p_{H_2}^{0.5}}{p_{H_2O}} \quad (2)$$

$$K_4(T) = \frac{p_{NO}^2}{p_{N_2} \cdot p_{O_2}} \quad K_5(T) = \frac{p_H^2}{p_{H_2}} \quad K_6(T) = \frac{p_O^2}{p_{O_2}} \quad K_7(T) = \frac{p_N^2}{p_{N_2}},$$

gdzie: g_C, g_H, g_O, g_N — udziały masowe węgla, wodoru, tlenu i azotu w prochu; p_i — ciśnienie cząstkowe i -tego gazu; μ_i — masa cząsteczkowa i -tego gazu; $K_i(T)$ — stała równowagi i -tej reakcji (stabilizowana funkcja temperatury T).

Prezentowany układ sformułowany został przy następujących założeniach:

- produkty spalania znajdują się w stanie równowagi termochemicznej;
- proces spalania przebiega adiabaticznie (pominięto straty ciepłne na nagrzewanie ścianek komory spalania);
- ciśnienie p gazowych produktów spalania jest sumą ciśnień cząstkowych p_i poszczególnych gazów

$$p = \sum_i p_i. \quad (3)$$

Z rozwiązania przedstawionego układu otrzymuje się ciśnienia cząstkowe (udziały) jedenastu gazów w danej (przyjętej) temperaturze T oraz przy danym (przyjętym) ciśnieniu p_k . Następnie, w oparciu o znane udziały poszczególnych gazów o temperaturze T , można obliczyć ich energię wewnętrzną u oraz ciepło tworzenia q z zależności

$$u = \sum_i g_i u_i \quad (4)$$

$$q = \sum_i g_i q_i, \quad (5)$$

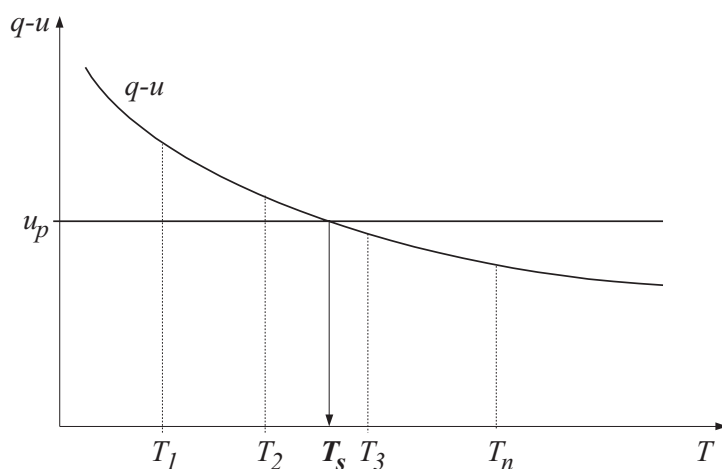
gdzie: g_i — udział masowy i -tego gazu; u_i — energia wewnętrzna i -tego gazu (stabilizowana funkcja temperatury T); q_i — ciepło tworzenia i -tego gazu.

Poszukiwaną temperaturą spalania T_s gazów prochowych jest temperatura spełniająca równanie zachowania energii

$$u_p = q - u, \quad (6)$$

gdzie: u_p — ciepło tworzenia prochu, $u_p = \sum_i b_i u_{pi}$; u_{pi} — ciepło tworzenia i -tego składnika prochu; b_i — udział masowy i -tego składnika w prochu.

W celu wyznaczenia temperatury T_s należy zatem przeprowadzić obliczenia dla kilku wartości temperatury T , tak aby obramować przewidywaną temperaturę T_s . Następnie, obliczając dla przyjętych temperatur energię wewnętrzną u i ciepło tworzenia q gazów prochowych, sporządzamy wykres $q(T)-u(T)$. Punkt przecięcia się krzywej $q-u$ z prostą $u_p = \text{const}$ (rys. 1), będący rozwiązaniem bilansu energii (6), wyznacza temperaturę spalania T_s .



Rys. 1. Wykres obrazujący sposób wyznaczenia temperatury spalania T_s gazów prochowych w stałej objętości

Bilans energii (6) jest uzupełnieniem układu równań (1)-(5). Rozwiązanie tego układu jest kłopotliwe i pracochłonne. W związku z tym opracowano program komputerowy realizujący obliczenia składu i charakterystyk termodynamicznych gazów prochowych metodą kolejnych przybliżeń.

Danymi wejściowymi do programu są:

- udziały masowe b_i poszczególnych składników prochu;
- procentowa zawartość azotu $N\%$ w nitrocelulozie;
- ciepło tworzenia u_{pi} składników prochu;
- przewidywana temperatura spalania T ;
- ciśnienie w komorze spalania p_k .

Ciepło tworzenia nitrocelulozy obliczono ze wzoru doświadczalnego [10]

$$u_{pNC} = 500 + 82,73(14,12 - N\%) \quad [\text{kcal/kg}]. \quad (7)$$

Po wprowadzeniu danych wejściowych obliczane są udziały masowe węgla g_C , wodoru g_H , tlenu g_O i azotu g_N w prochu oraz jego ciepło tworzenia u_p . Następnie, metodą kolejnych przybliżeń, obliczane są ciśnienia cząstkowe p_i poszcze-

gólnych gazów (udziały masowe i objętościowe), energia wewnętrzna u i ciepło tworzenia q gazów. Po obramowaniu poszukiwanej temperatury spalania T_s , jej wartość wyznaczana jest w wyniku interpolacji liniowej spełniającej równanie bilansu energii (6).

Ostatecznymi wynikami obliczeń są:

- temperatura spalania T_s ;
- ciśnienia cząstkowe p_i oraz udziały masowe g_i poszczególnych gazów w produktach spalania prochu;
- ciepła właściwe c_p i c_v oraz wykładnik adiabaty $k = c_p/c_v$;
- masa cząsteczkowa μ oraz stała gazowa R gazów prochowych;
- siła prochu $f = RT_s$.

3. Wyniki obliczeń

Wykorzystując opracowany program, wyznaczono charakterystyki termodynamiczne prochów bezdymnych produkcji krajowej:

- nitrocelulozowych: WT, 4/7, 5/7cfl;
- nitroglicerynowego NBL-80.

Obliczenia przeprowadzono dla ciśnień p_k gazów od 50 MPa do 300 MPa co 50 MPa. W tabeli 1 zamieszczono charakterystyczne wyniki obliczeń dla skrajnych ciśnień gazów prochowych. Wykładnik adiabaty k obliczono dla zakresu temperatury od $T = 1000$ K do $T = T_s$. W ostatniej kolumnie zamieszczono wartości siły prochu f_{eksp} wyznaczonej na podstawie badań pirostatycznych [5, 11]. W tabeli 2 porównano natomiast parametry gazów prochowych przy ciśnieniu 300 MPa, wyznaczone z wykorzystaniem opracowanego programu oraz programu CHEETAH.

TABELA 1

Wartości charakterystyk termodynamicznych rozpatrywanych prochów

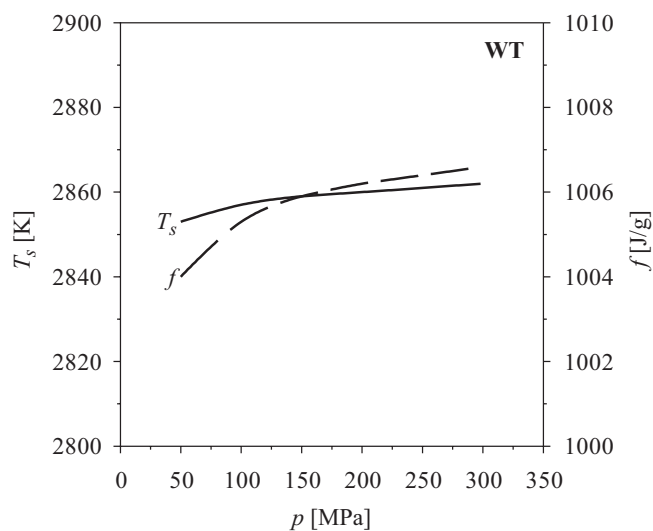
| Nazwa prochu | p_k [MPa] | T_s [K] | R [J/(kgK)] | μ [g/mol] | f [J/g] | k | f_{eksp} [J/g] |
|--------------|----------------|--------------|------------------|------------------|--------------|-------|---------------------|
| WT | 50 | 2853 | 352,0 | 23,6 | 1004,0 | 1,262 | 1004,6 |
| | 300 | 2862 | 351,7 | 23,6 | 1006,6 | 1,261 | |
| 4/7 | 50 | 2854 | 349,9 | 23,8 | 998,7 | 1,260 | 999,4 |
| | 300 | 2863 | 349,7 | 23,8 | 1001,3 | 1,259 | |
| 5/7cfl | 50 | 2462 | 378,8 | 22,0 | 932,4 | 1,279 | 903,1 |
| | 300 | 2464 | 378,7 | 22,0 | 933,0 | 1,279 | |
| NBL-80 | 50 | 3487 | 321,5 | 25,9 | 1121,1 | 1,233 | 1100,9 |
| | 300 | 3572 | 319,3 | 26,0 | 1140,5 | 1,230 | |

TABELA 2

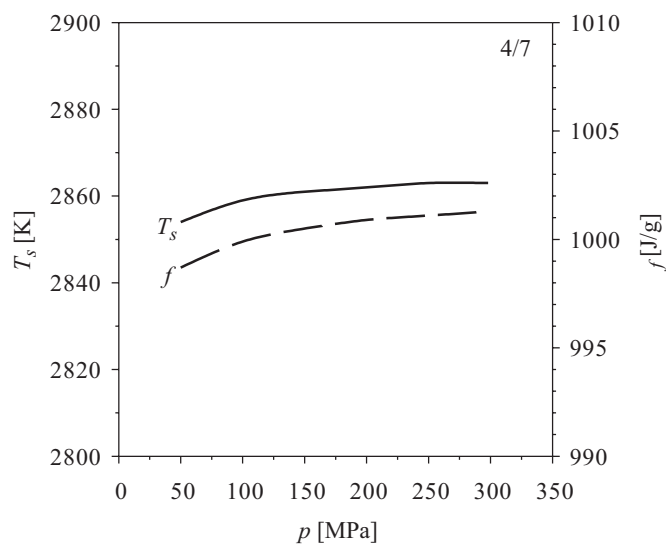
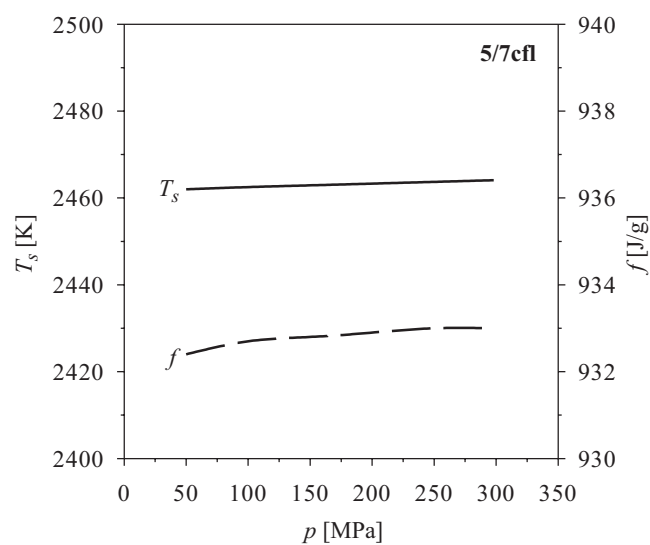
Porównanie parametrów termodynamicznych obliczonych za pomocą opracowanego programu (OP) i programu CHEETAH (CH)

| Nazwa prochu | Program | T_s [K] | μ [g/mol] | f [J/g] | k |
|--------------|-------------|-----------|---------------|-----------|-------|
| WT | CH | 2910 | 23,7 | 1021,6 | 1,247 |
| | OP | 2862 | 23,6 | 1006,6 | 1,261 |
| | różnica [%] | -1,6 | -0,4 | -1,5 | 1,1 |
| 4/7 | CH | 2910 | 23,8 | 1017,5 | 1,245 |
| | OP | 2863 | 23,8 | 1001,3 | 1,259 |
| | różnica [%] | -1,6 | 0,0 | -1,6 | 1,1 |
| 5/7cfl | CH | 2525 | 22,1 | 950,2 | 1,265 |
| | OP | 2464 | 22,0 | 933,0 | 1,279 |
| | różnica [%] | -2,4 | -0,5 | -1,8 | 1,1 |
| NBL-80 | CH | 3632 | 26,1 | 1158,6 | 1,217 |
| | OP | 3572 | 26,0 | 1140,5 | 1,230 |
| | różnica [%] | -1,7 | -0,4 | -1,6 | 1,1 |

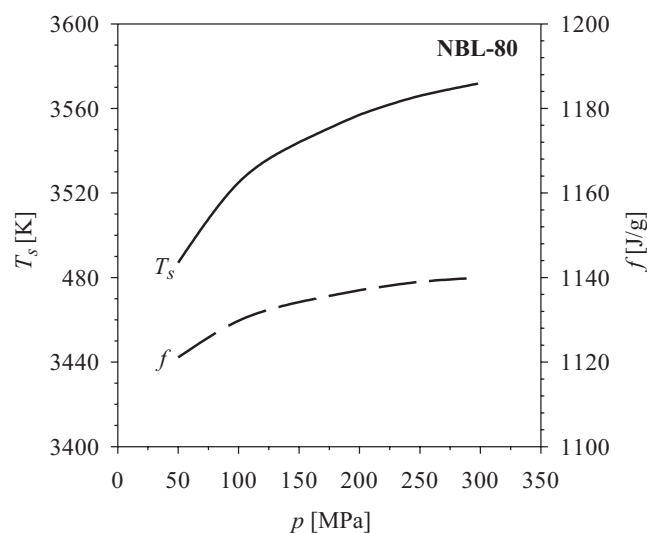
Ponadto na rysunkach 2-5 przedstawiono wpływ ciśnienia gazów prochowych na temperaturę spalania T_s oraz siłę prochu f rozpatrywanych prochów.



Rys. 2. Zależności temperatury spalania T_s i siły prochu f od ciśnienia p gazów prochowych (proch WT)

Rys. 3. Zależności temperatury spalania T_s i siły prochu f od ciśnienia p gazów prochowych (proch 4/7)Rys. 4. Zależności temperatury spalania T_s i siły prochu f od ciśnienia p gazów prochowych (proch 5/7cfl)

Przy wyznaczaniu różnic wyników obliczeń dwiema metodami, jako odniesieniowe (bazowe) przyjęto wartości charakterystyk termodynamicznych otrzymanych za pomocą programu CHEETAH.



Rys. 5. Zależności temperatury spalania T_s i siły prochu f od ciśnienia p gazów prochowych (proch NBL-80)

4. Uwagi i wnioski końcowe

Zaprezentowana metoda obliczeń termochemicznych oraz opracowany program mogą służyć do wyznaczania parametrów termodynamicznych produktów spalania prochów, wykorzystywanych następnie w obliczeniach balistyki wewnętrznej. Zaobserwowano dobrą zgodność wyznaczonej doświadczalnie i obliczonej za pomocą opracowanego programu siły prochu f rozpatrywanych prochów (różnice nie przekraczają 4%). Zadowalające są również małe różnice wartości parametrów termodynamicznych wyznaczonych za pomocą opracowanego programu i programu CHEETAH.

Ponadto w oparciu o otrzymane wyniki obliczeń można sformułować następujące wnioski:

- wykładnik k adiabaty gazów prochowych wyznaczony w sposób teoretyczny jest o kilka procent większy od przyjmowanego tradycyjnie ($k = 1,2$) w balistyce wewnętrznej;
- charakterystyki termodynamiczne prochów nitrocelulozowych (WT, 4/7, 5/7cfl), takie jak: R , c_p , c_v , k praktycznie nie wykazują zależności od ciśnienia gazów prochowych w badanym przedziale ($p = 50 \div 300$ MPa); występuje natomiast mały wpływ ciśnienia na temperaturę spalania T_s i siłę prochu f (wzrost tych charakterystyk mniejszy od 1%);
- większą zależnością parametrów termodynamicznych od ciśnienia charakteryzuje się proch nitroglicerynowy (NBL-80); w rozpatrywanym prze-

dziale ciśnienia temperatura spalania T_s i siła prochu f rosła odpowiednio o 2,4% i 1,7%; zmiany pozostałych charakterystyk są mniejsze od 1%.

Artykuł wpłynął do redakcji 28.11.2005 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w lutym 2006 r.

LITERATURA

- [1] J. CORNER, *Theory of the interior ballistics of guns*, New York-London, 1950.
- [2] J. P. BAC, Bagheera, *A Ballistic Thermodynamic Code*, 3rd International Gun Propellant Symposium, Picatinny Arsenal, Dover, New Jersey, 1984.
- [3] E. FREEDMAN, BLAKE — *A Thermodynamic Code Based on TIGER*, BRL Report ARBRL-TR-02411, 1982.
- [4] L. E. FRIED, *CHEETAH 1.39 — User's Manual*, LLNL, 1996.
- [5] Z. LECIEJEWSKI, R. PASZKOWSKI, Z. SURMA, *Badania wpływu temperatury początkowej prochu na jego charakterystyki balistyczne*, Międzynarodowa Konferencja Naukowa IPO, Ustroń, 16-18 czerwca 2004.
- [6] M. SIERIEBRIAKOW, *Balistyka wewnętrzna*, MON, Warszawa, 1955.
- [7] G. SINIARIEW, M. DOBROWOLSKI, *Silniki raketowe na paliwo płynne*, MON, Warszawa, 1957.
- [8] S. TORECKI, *Podstawy termodynamiczne balistyki wewnętrznej i silników raketowych*, WAT, Warszawa, 1986.
- [9] W. A. TRZCIŃSKI, Z. LECIEJEWSKI, Z. SURMA, *Zastosowanie kodów termochemicznych do wyznaczenia parametrów materiałów miotających dla potrzeb balistyki wewnętrznej*, Biul. WAT, 10, Warszawa, 2002.
- [10] J. WEISS, S. TORECKI, S. MAJEWSKI, *Podstawy teorii i konstrukcji silników raketowych na paliwo stałe*, WAT, Warszawa, 1966.
- [11] Sprawozdanie z realizacji projektu badawczego KBN nr 0T00A 00811 — *Badania kompleksowe właściwości termodynamicznych gazów prochowych i rzeczywistej szybkości spalania prochów oraz weryfikacja zależności obliczeniowych balistyki wewnętrznej*, WAT, Warszawa, 1999.
- [12] STANAG 4367 — *Thermodynamic Interior Ballistic Model with Global Parameters*, NATO 2000.

Z. SURMA

Calculations of gun propellants parameters

Abstract. The method and results of numerical calculations of composition and thermodynamic parameters of the products of gun propellants combustion in closed vessel are presented in this paper. The parameters such as: isochoric-adiabatic flame temperature T_s , force constant f and specific heat ratio $k = c_p/c_v$, are initial data for interior ballistics computations. The calculations for chosen single-base and double-base propellants and investigations of pressure influence on thermodynamic parameters of propellant gases have been carried out. Thermodynamic parameters of propellant gases calculated by means of presented method and CHEETAH program have been compared.

Keywords: interior ballistics, combustion, gun propellants

Universal Decimal Classification: 623.52

