

## ANALIZA WRAŻLIWOŚĆ DONOŚNOŚCI POCISKÓW ARTYLERII POŁOWEJ NA TEMPERATURĘ POCZĄTKOWĄ PROCHOWEGO ŁADUNKU MIOTAJĄCEGO

**Streszczenie:** Odpowiedni dobór nastaw do strzelania w warunkach temperaturowych znacznie odbiegających od warunków uznawanych za normalne jest jednym z warunków prowadzenia celnego strzelania artylerii polowej. W tym celu niezbędne jest wprowadzenie właściwej poprawki donośności na odchyłkę temperatury początkowej prochowego ładunku miotającego. Współcześnie, w dobie powszechnej komputeryzacji tendencją jest dążenie do opracowywania zautomatyzowanych systemów kierowania ogniem (ZSKO), w których odpowiednia wartość takiej poprawki może być określona w wyniku numerycznego rozwiązania tzw. problemu głównego balistyki wewnętrznej (PGBW) układów miotających i problemu głównego balistyki zewnętrznej (PGBZ). Tabele strzelnicze, opracowane dla danego układu miotającego strzelającego określonym rodzajem amunicji, stanowią podstawę wprowadzenia właściwej poprawki donośności na zmianę temperatury początkowej ładunku prochowego. W prezentowanym artykule, na przykładzie symulacji strzelania 122 mm pociskiem artyleryjskim OF-462 z haubicy samobieżnej 2S1 „Goździk”, dokonano analizy wpływ temperatury początkowej ładunku miotającego na prędkość pocisku oraz jego donośność, a także dokonano weryfikacji tabelarycznej metody obliczania poprawki w donośności.

## ANALYSIS OF ARTILLERY SHELL RANGE SENSITIVITY TO PROPELLANT CHARGE INITIAL TEMPERATURE

**Abstract:** Suitable adjustment of artillery aiming device in different ambient temperature conditions is one of the factors of accurate artillery firing. To this effect the specific range correction of artillery shell (because of different initial temperature of propellant charge) should be introduced. Mentioned range corrections are included in artillery correction tables elaborated for definite propellant system and definite artillery ammunition. For automated fire control systems, the specific temperature range correction may be calculated on the basis of theoretical interior ballistic model (projectile motion inside the barrel) and exterior ballistic model (projectile motion in the air). In this paper, the influence of initial temperature of propellant charge of howitzer shell (calibre 122 mm) on shell velocity and its range has been analyzed.

### 1. Wprowadzenie

Aktualnie, w procesie wyznaczania nastaw (ustalania kąta celownika) podczas strzelania pociskami artyleryjskimi i moździerzowymi, wpływ temperatury początkowej prochowego ładunku miotającego na donośność pocisku uwzględniany jest w rachunku poprawkowym. Dla konkretnego działła, dla zadanej donośności i ustalonego prochowego ładunku miotającego, z tabel strzelniczych odczytywana jest poprawka w donośności  $\Delta X_{t_{pr}^o}$  na

odchyłkę temperatury ładunku o 10° C od temperatury uznawanej za normalną ( $t_{Npr}^{\circ} = 15^{\circ} \text{C}$ ), a całkowitą poprawkę w donośności  $\Delta X$  dla ładunku o temperaturze  $t_{pr}^{\circ}$  różniącej się od temperatury normalnej  $t_{Npr}^{\circ}$  oblicza się z poniższej zależności liniowej

$$\Delta X = \Delta X_{t_{pr}^{\circ}} \frac{(t_{Npr}^{\circ} - t_{pr}^{\circ})}{10} \quad (1)$$

Konsekwencją takiego stanu rzeczy, w tabelach strzelniczych dla artyleryjskich układów miotających [14-16], jest liniowa zależność poprawki w donośności pocisku od temperatury ładunku prochowego, zarówno dla temperatur początkowych ładunku prochowego mniejszych jak i większych od temperatury normalnej.

W niniejszej pracy zaprezentowano modyfikację modeli matematycznych ruchu pocisku w lufie i poza lufą (na torze lotu) uwzględniając w nich wpływ czynnika temperaturowego na charakterystyki energetyczno-balistyczne ładunku miotającego oraz przeanalizowano uwzględnienie wpływu temperatury początkowej ładunku miotającego na prędkość wylotową i maksymalną pocisku oraz jego donośność.

Odpowiednie analizy numeryczne, których zadaniem była ocena wrażliwości zasięgu pocisków artyleryjskich na temperaturę początkową ładunku prochowego oraz weryfikacja tabelarycznych zapisów obliczania poprawki w donośności, przeprowadzono na przykładzie symulacji strzelania 122 mm pociskiem artyleryjskim OF-462 z haubicy samobieżnej 2S1 „Goździk” dla ładunku czwartego (jednoskładnikowy, składający się z prochu 4/1) oraz ładunku zmniejszonego (dwuskładnikowy, składający się z prochów 4/1 oraz 9/7).

## **2. Wpływ temperatury początkowej prochów 4/1 oraz 9/7 na charakterystyki balistyczne strzału**

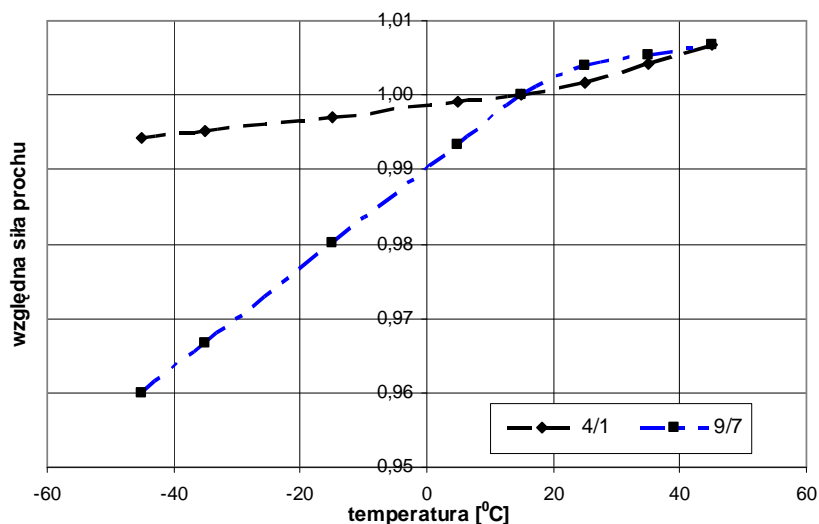
### **2.1. Wyniki badań pirostatycznych prochów 4/1 oraz 9/7 o różnej temperaturze początkowej**

Wpływ temperatury początkowej  $t_0$  ładunku miotającego na właściwości prochu, a w konsekwencji na charakterystyki strzału, uwzględnia się poprzez wprowadzenie odpowiednich zależności względnych, znanych w balistyce wewnętrznej jako funkcje temperaturowe [4,5,7]. Ogólnie funkcję temperaturową  $f_1(t)$  można zdefiniować jako stosunek wartości rozpatrywanej charakterystyki prochu  $Y$  przy danej temperaturze początkowej  $t_0$  i przy temperaturze uznawanej za normalną (temperaturze odniesienia)  $t_n$  w postaci poniższej zależności

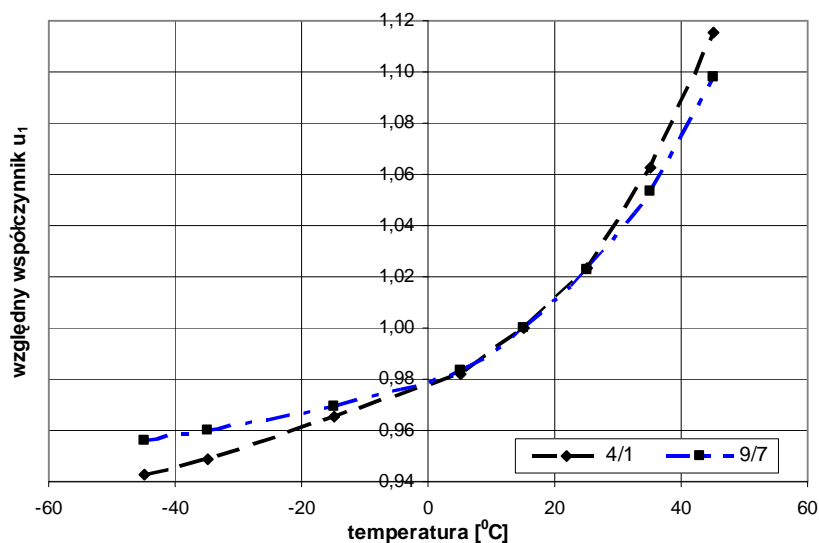
$$f_1(t) = \frac{Y(t_0)}{Y(t_n)} \quad (2)$$

W ramach niniejszej pracy przeprowadzono analizę następujących zależności: siły prochu  $f$ , kowolumenu  $\alpha$  oraz szybkości spalania prochu  $u$  (poprzez współczynnik  $u_1$  liniowego prawa szybkości spalania prochu) od temperatury początkowej ładunku miotającego. Tak sformułowane zadanie zostało zrealizowane w wyniku przeprowadzenia badań pirostatycznych, czyli spalania określonych mas  $\omega$  prochu (o różnych temperaturach początkowych) w stałej, zamkniętej objętości  $W_0$  i pomiarze ciśnienia gazów prochowych. Zastosowany w trakcie badań eksperymentalnych tor badawczo-pomiarowy oraz metodyka badań spełniały wymagania porozumienia standaryzacyjnego STANAG 4115 [10].

Wartości ciśnienia maksymalnego  $p_m (\Delta = \omega W_0)$  wykorzystano do obliczeń siły prochu  $f$  i kowolumenu  $\alpha$  (parametry równania stanu gazów Noblego-Abela [9]), a zarejestrowane, eksperymentalne wykresy ciśnienia  $p(t)$  gazów prochowych posłużyły do oceny dynamiki procesu spalania (impuls ciśnienia  $I_p$  oraz współczynnika  $u_1$ ) [17]. Badania właściwości energetyczno-balistycznych jednobazowych (nitrocelulozowych) prochów 4/1 i 9/7 w przedziale temperatury od  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $+45\text{ }^{\circ}\text{C}$  wykazały [6], że wartości powyższych wielkości (oprócz kowolumenu  $\alpha$ ) silnie zależą od temperatury początkowej prochu.



Rys. 1. Zależność względnej siły prochów 4/1 i 9/7 od ich temperatury początkowej



Rys. 2. Zależność względnego współczynnika  $u_1$  prochów 4/1 i 9/7 od ich temperatury początkowej

Wyniki analiz teoretycznych w postaci zależności siły prochu  $f$  oraz współczynnika  $u_1$  od temperatury początkowej prochów 4/1 i 9/7 przedstawiono na rysunkach 1 i 2. Przeprowadzone badania i analizy wskazują na nieliniowy charakter zależności siły prochu

i szybkości spalania od temperatury początkowej ładunków prochowych, szczególnie w zakresie temperatury wyższej od temperatury normalnej.

Taki nieliniowy charakter zmian szybkości spalania prochu jednobazowego (a takim są oba badane prochy) od jego temperatury początkowej znajduje również potwierdzenie w wynikach badań publikowanych przez czołowych, światowych producentów amunicji [1,3], prowadzących badania nad nową generacją prochów, których szybkość spalania nie będzie zależała od ich temperatury początkowej.

## 2.2. Wyniki badań symulacyjnych strzału dla ładunku $n$ -składnikowego

Podstawowymi zależnościami w termodynamicznym modelu strzału dla lufowego układu miotającego [9,13,17] są zależności pozwalające opisać: uśrednione w przestrzeni zapociskowej lufy ciśnienie gazów prochowych w funkcji czasu (podstawowy wzór pirodynamiki) oraz mechanizm dopływu gazów do przestrzeni zapociskowej z palącej się powierzchni ziaren prochowych. Zwykle zależności te formułowane są dla normalnych warunków temperaturowych ładunku prochowego.

Model termodynamiczny strzału z uwzględnieniem funkcji temperaturowych, dla układu miotającego z  $n$ -składnikowym ładunkiem miotającym (każdy składnik opisany przez masę  $\omega_i$ , gęstość  $\delta_i$ , siłę prochu  $f_i$ , funkcję temperaturową siły prochu  $f_{fi}(t_0)$ , kowolumen  $\alpha_i$ , funkcję wykładnika adiabaty  $\theta_i$ , względną część spalonego prochu  $\psi_i$ ), tworzą [6]:

- uwzględniający prace drugorzędne (poprzez współczynnik  $\varphi$ ) bilans energii strzału, opisujący zmiany ciśnienia gazów prochowych w lufie, początkowo w stałej objętości komory nabojojowej  $W_0$ , a następnie w zmiennej objętości zapociskowej

$$p = \frac{\theta_{sr} \sum_{i=1}^n \frac{f_i \cdot f_{fi}(t)}{\theta_i} \cdot \omega_i \cdot \psi_i - \theta_{sr} \cdot \varphi \cdot m \cdot \frac{V^2}{2}}{W_0 + s \cdot l - \sum_{i=1}^n \frac{\omega_i}{\delta_i} \cdot (1 - \psi_i) - \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot \omega_i \cdot \psi_i} \quad (3)$$

gdzie:  $\theta_{sr}$  – wartość średnia funkcji wykładnika adiabaty gazów prochowych

$$\theta_{sr} = \frac{\sum_{i=1}^n \theta_i \omega_i}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (4)$$

$m$  – masa pocisku;

$l$  – droga pocisku w lufie;

$V$  – prędkość pocisku określana z zależności definicyjnej jako  $dl/dt$  ;

$s$  – pole przekroju poprzecznego przewodu lufy;

- równania dopływu gazów prochowych; liczba równań równa jest liczbie  $n$  prochów (każdy z nich opisany przez początkową powierzchnię  $S_{1i}$  i objętość  $\Lambda_{1i}$  ziarna prochowego, współczynniki kształtu ziaren prochowych  $\chi_{1i}$ ,  $\lambda_{1i}$ , współczynnik  $u_{1i}$  prawa szybkości spalania, funkcję temperaturową szybkości spalania  $f_{ui}(t)$ ) wchodzących w skład ładunku miotającego

$$\frac{d\psi_i}{dt} = \frac{S_{1i}}{\Lambda_{1i}} \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda_{1i}}{\chi_{1i}} \cdot \psi_i \cdot u_{1i} \cdot f_{ui}(t)} \cdot p \quad (5)$$

- równanie ruchu postępowego pocisku

$$\frac{dV}{dt} = \frac{sp}{\varphi m} \quad (6)$$

gdzie

$$\varphi = K + \frac{1}{3} \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i}{m} \quad (7)$$

K – współczynnik zależny od rodzaju broni [9].

Dane wejściowe do rozwiązania równań (3-7) w postaci charakterystyk konstrukcyjnych lufy i masowych 122 mm pocisku OF-462 haubicoarmaty 2S1 „Goździk” przedstawiono w tabeli 1.

**Tabela 1. Dane układu miotającego do rozwiązania PGBW**

Masa pocisku (OF-462)	$m$ [kg]	21,80
Pole przekroju poprzecznego przewodu lufy	$s$ [m <sup>2</sup> ]	$1,2056 \cdot 10^{-2}$
Objętość komory naboju lufy	$W_0$ [dm <sup>3</sup> ]	6,6
Całkowita droga pocisku w przewodzie lufy	$l_w$ [m]	3,4
Współczynnik zależny od rodzaju broni	K	1,1

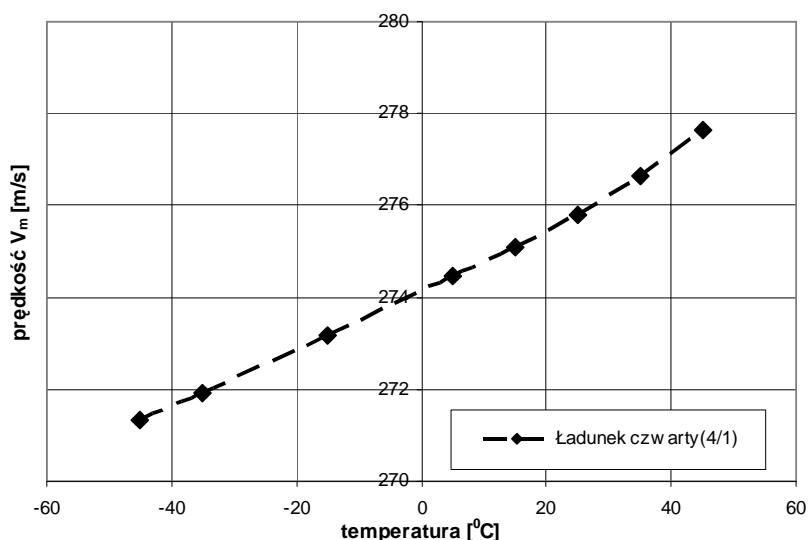
Wartości charakterystyk masowo-geometrycznych i energetyczno-balistycznych prochów 4/1 oraz 9/7 zestawiono w tabeli 2. W tabeli tej wartości siły prochu  $f$ , kowolumenu  $\alpha$  oraz współczynnika  $u_1$  odpowiadają wynikom badań tych prochów w temperaturze normalnej.

**Tabela 2. Dane ładunków prochowych do rozwiązania PGBW**

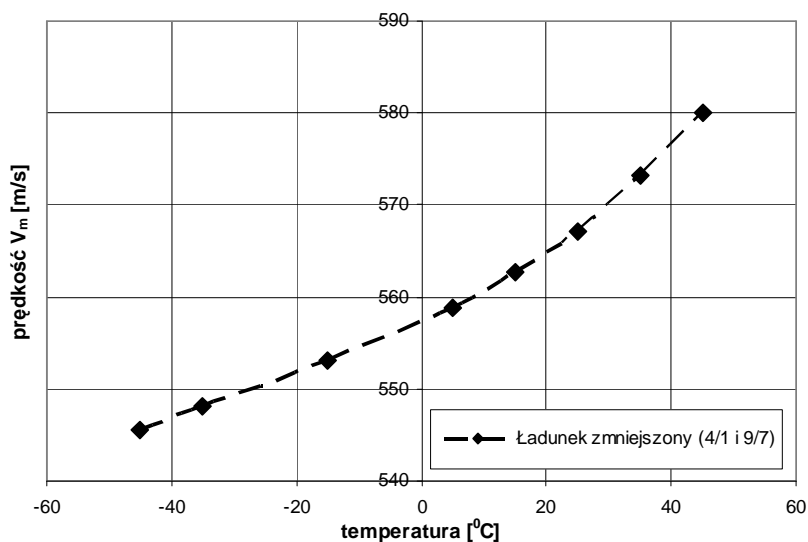
		Proch 4/1	Proch 9/7
Masa prochu $\omega$	Ładunek czwarty	0,58	-
	Ładunek zmniejszony	0,58	1,905
	[kg]		
„Siła” prochu $f$	[MJ/kg]	1,029	0,9598
Kowolumen $\alpha$ gazów prochowych	[dm <sup>3</sup> /kg]	1,087	1,213
Współczynnik $u_1$	[m/(s·Pa)]	$0,607 \cdot 10^{-9}$	$0,655 \cdot 10^{-9}$
Gęstość prochu $\delta$	[kg/m <sup>3</sup> ]	1550	1610
Początkowe pole powierzchni ziarna prochowego $S_1$	[mm <sup>2</sup> ]	25,6	380
Początkowa objętość ziarna prochowego $\Lambda_1$	[mm <sup>3</sup> ]	4,47	268
Współczynniki kształtu ziaren prochowych	$\chi$	1,0597	0,709
	$\lambda$	-0,0563	0,233
	$\mu$	0	-0,0248

Zależności prędkości maksymalnej  $V_m$  pocisku od temperatury początkowej prochu przedstawiono na rysunkach 3 i 4. Wartości tych prędkości stanowiły dane wejściowe do obliczeń odchyłek donośności.

Tabelaryczna prędkość początkowa pocisku OF-462 miotanego ładunkiem czwartym wynosi  $V_0 = 275$  m/s, natomiast miotanego ładunkiem zmniejszonym wynosi  $V_0 = 563$  m/s [15].



Rys. 3. Zależność symulacyjnej prędkości  $V_m$  pocisku (miotanego ładunkiem czwartym) od temperatury początkowej prochu 4/1

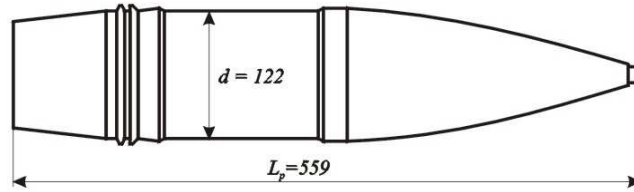


Rys. 4. Zależność symulacyjnej prędkości  $V_m$  pocisku (miotanego ładunkiem zmniejszonym) od temperatury początkowej prochów 4/1 i 9/7

### 3. Wpływ temperatury początkowej prochów 4/1 oraz 9/7 na donośność pocisku OF-462

#### 3.1. Model fizyczny i matematyczny ruchu pocisku w atmosferze ziemskiej

Schemat aerodynamiczny i główne wymiary pocisku OF-462 przyjętego do badań przedstawiono na rys. 5. Charakterystyki aerodynamiczne wyznaczono teoretycznie na podstawie danych literaturowych [2,8], a następnie zidentyfikowano w oparciu o dane zawarte w tabelach strzelniczych [15] - rozwiązując zagadnienie odwrotne balistyki zewnętrznej. Wyniki przeprowadzonych identyfikacji parametrów modelu fizycznego ruchu pocisku OF-462 w atmosferze ziemskiej przedstawiono w pracy [6].



**Rys. 5. Schemat aerodynamiczny pocisku odłamkowo-burzącego OF-462**

Podstawowe charakterystyki geometryczne i masowo-bezwładnościowe pocisku testowego są następujące:

- $L_p$ - długość pocisku	= 559 [mm],
- $d$ - kaliber	= 122 [mm],
- $\lambda$ - wydłużenie	= 4,58,
- $m$ - masa pocisku	= 21,760 [kg],
- $I_x$ - biegunowy moment bezwładności	= 0,0459 [kgm <sup>2</sup> ],
- $I_y$ - równikowy moment bezwładności	= 0,4092 [kgm <sup>2</sup> ],
- $x_{sm}$ - położenie środka masy	= 375 [mm].

Przy opracowywaniu modelu matematycznego ruchu pocisku w atmosferze ziemskiej wykorzystano model o sześciu stopniach swobody, w którym pocisk rozpatrywany jest jako osiowo-symetryczna bryła sztywna, poddana działaniu wypadkowej siły aerodynamicznej (siły oporu, bocznej i nośnej), siły Magnusa i Coriolisa oraz wypadkowego momentu aerodynamicznego wywołanego kątem natarcia  $\alpha$ , kątem ślizgu  $\beta$  oraz prędkościami kątowymi pocisku  $p$ ,  $q$ ,  $r$ . W układzie poruszającym się z pociskiem, na podstawie praw mechaniki klasycznej o zmianie pędu i krętu wektorowe równania ruchu pocisku jako bryły sztywnej mogą być wyrażone następująco [8]:

$$m(\vec{u} + \vec{\omega}_p \times \vec{u}) = \vec{R}^A + m\vec{g} + m\vec{\Lambda} \quad (8)$$

$$\vec{K}_O + \vec{\omega}_p \times \vec{K}_O = \vec{M}_O^A \quad (9)$$

gdzie:

- $\vec{K}_O$  - wektor momentu pędu pocisku względem środka masy,
- $m\vec{g}$  - wektor siły ciężkości,
- $m\vec{\Lambda}$  - wektor siły Coriolisa, wywołanej ruchem obrotowym Ziemi,
- $\vec{M}_O^A$  - wektor wypadkowego momentu aerodynamicznego,
- $\vec{R}^A$  - wektor wypadkowej siły aerodynamicznej,
- $\vec{u}$  - wektor prędkości pocisku względem ziemi,
- $\vec{\omega}_p$  - wektor prędkości kątowej pocisku.

Postać skalarną wyżej wymienionych równań ruchu (w układzie odniesienia pokrywającym się z centralnymi osiami bezwładności pocisku) wraz z równaniami uzupełniającymi, można znaleźć w pracy [6].

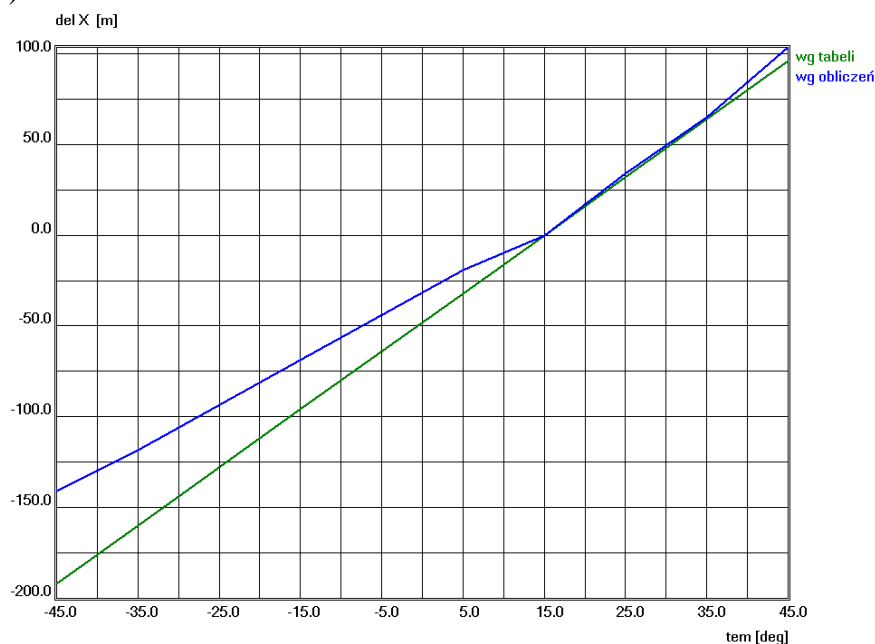
### 3.2. Wyniki badań symulacyjnych odchyłek donośności

Wykorzystując program komputerowy oparty na termodynamicznym modelu strzału (ruchu pocisku w lufie) dla jedno- i wieloskładnikowego prochowego ładunku miotającego (punkt 2.2) oraz na modelu matematycznym symulacji lotu pocisku w atmosferze ziemskiej (punkt 3.1) przeprowadzono - w odniesieniu do 122 mm pocisku artyleryjskiego OF-462 -

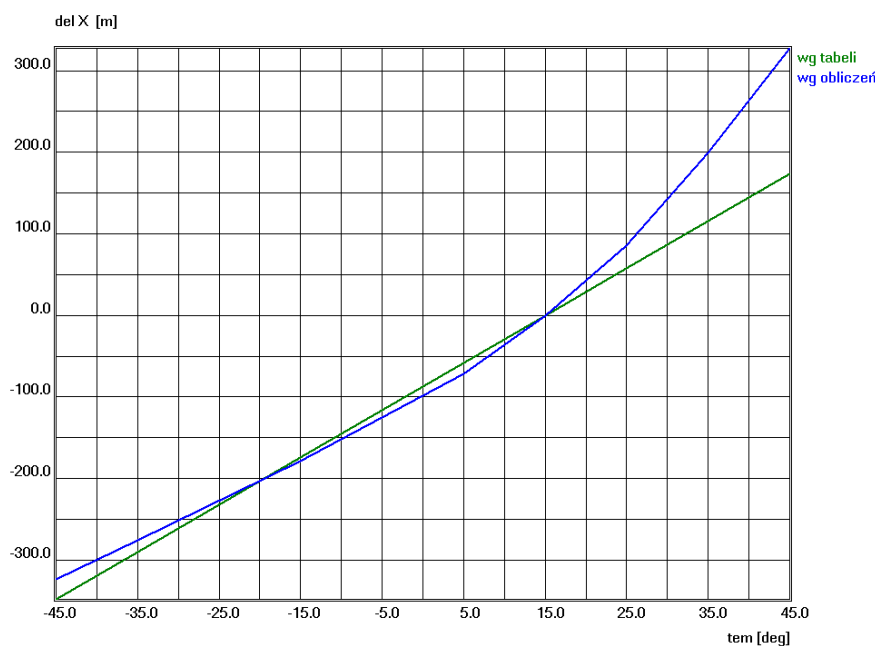
kompleksową analizę wpływu zmian prędkości maksymalnej (wywołanej zmianą temperatury ładunku miotającego) na zmianę donośności.

Badania symulacyjne przeprowadzono dla ładunku czwartego (proch 4/1) oraz zmniejszonego, składającego się z prochów 4/1 oraz 9/7, w obu przypadkach dla czterech kątów podniesienia lufy działa (kątów celownika):  $10^\circ$ ,  $25^\circ$ ,  $45^\circ$  i  $75^\circ$  przyjmując założenie, że strzelania standardowym pociskiem realizowano z nowego działa, stąd też nie uwzględniano poprawki w donośności spowodowanej wydłużeniem komory naboju lufy.

Wyniki obliczeń odchyłki donośności ( $\Delta X$ ) od donośności w warunkach normalnych ( $t_{Npr}^\circ = 15^\circ\text{C}$ ) w przypadku strzelania na kącie celownika  $45^\circ$  przedstawiono na wykresach (rysunki 6 i 7).



**Rys. 6. Wpływ temperatury ładunku na odchyłkę donośności podczas strzelania ładunkiem czwartym ( $V_0 = 275$  m/s) na kącie celownika  $45^\circ$**



**Rys. 7. Wpływ temperatury ładunku na odchyłkę donośności podczas strzelania ładunkiem zmniejszonym ( $V_0 = 563$  m/s) na kącie celownika  $45^\circ$**



Zarówno w przypadku ładunku czwartego jak i ładunku zmniejszonego uzyskano - dla pozostałych kątów podniesienia lufy działa (kątów celownika), czyli 10°, 25° i 75° - podobne jakościowo przebiegi prezentujące wpływ temperatury początkowej ładunku prochowego na odchyłkę donośności.

#### 4. Wnioski

W całym badanym zakresie temperatur początkowych ładunku prochowego, wynikający z symulacji charakter zmian w poprawkach w donośności pocisku jakościowo odpowiada charakterowi zmian funkcji temperaturowych prawa szybkości spalania prochów 4/1 oraz 9/7, czyli prochów wchodzących w skład analizowanego ładunku czwartego i ładunku zmniejszonego.

Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika, że obliczone na podstawie badań numerycznych poprawki w donośności, w całym analizowanym zakresie temperatur początkowych ładunków prochowych, nie pokrywają się z tabelarycznymi. Tabelaryczne poprawki w donośności dla tego układu miotającego i analizowanych ładunków prochowych zmieniają się liniowo ze zmianą temperatury [15], natomiast z badań symulacyjnych wynika nieliniowy charakter zmian poprawek w donośności. Dla ładunku czwartego (proch 4/1) jakościową i ilościową zgodność poprawek w donośności (tabelarycznych i wynikających z symulacji) uzyskano dla temperatur początkowych prochu większych od temperatury normalnej, natomiast dla ładunku zmniejszonego (ładunek prochowy składający się z prochów 4/1 oraz 9/7) jakościową i ilościową zgodność poprawek uzyskano dla początkowych temperatur ładunku prochowego mniejszych od temperatury normalnej.

Widoczne jakościowe i ilościowe odstępstwa w charakterze zmian poprawek w donośności (tabelarycznych i wynikających z badań numerycznych) mogą być efektem wpływu wielu czynników. Jednym z ważniejszych czynników, na który należy zwrócić uwagę, jest właściwa identyfikacja składu chemicznego prochu. Polskie tabele strzelnicze zakładają, że dla określonego rodzaju prochu, każda jego partia produkcyjna charakteryzuje się stałym składem chemicznym. Tymczasem w stosowanej w NATO, a opisanej w porozumieniu standaryzacyjnym STANAG 4500 [12], procedurze określania prędkości wylotowej pocisków artyleryjskich i wymiany informacji o niej pomiędzy NATO-wskimi jednostkami artyleryjskimi, zaleca się uwzględnienie poprawek na prędkość pocisku (a tym samym i na jego donośność) związanych nie tylko z:

- określoną temperaturą początkową prochu;
- odstępstwem od ustalonej (standardowej) masy pocisku;
- stopniem zużycia komory naboju lufy

ale również spowodowanych odstępstwem od standardowego składu prochu, zależnym od jakości procesu technologicznego charakterystycznego dla określonej partii produkcyjnej prochu oraz warunków i czasu składowania prochu lub amunicji.

#### Literatura

- [1] Jeck-Prosche U., Ryf K., *High Performance Propulsion Design For Future Kinetic Energy Ammunition*; Proceedings of the 19<sup>th</sup> International Symposium on Ballistics, pp.33÷40, 7÷11 May 2001, Interlaken, Switzerland, 2001.
- [2] Краснов Н. Ф., *Аэродинамика*, Высшая Школа, Москва, 1976.
- [3] Langlotz W., Mueller D., Wagner Ch., *LTC Gun Propellants For Use In Machine Gun Ammunition*; Proceedings of the 21<sup>th</sup> International Symposium on Ballistics, pp.682÷687, 19÷23 April, 2004, Adelaide, South Australia, 2004.

- [4] Leciejewski Z., *Closed Vessel Tests: Part II – Temperature Factor Determination of Fine-Grained Propellant*, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Armament Conference “Scientific Aspects of Armament Technology-SAAT’2006”, pp. 632÷637, 11÷13 October 2006, Waplewo, Poland, Published by Military University of Technology, Warsaw 2006.
- [5] Leciejewski Z., Surma Z., *Analysis of Influence of Propellant Charge Initial Temperature on Ballistic Parameters of Firing*; Proceedings of the 7<sup>th</sup> Symposium on Weapon Systems, pp.27÷34, 4÷6 May 2005, Brno, Czech Republic 2005.
- [6] Leciejewski Z., Surma Z., Baranowski L., *Sprawozdanie końcowe z realizacji projektu badawczego własnego Nr 0 T00B 010 28 pt. „Badania pirostatycznie-termochemiczne i analiza wpływu temperatury początkowej prochowego ładunku miotającego na właściwości termodynamiczne gazów prochowych oraz parametry ruchu pocisków”*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 2008.
- [7] Leciejewski Z., Surma Z., Trzciński W.A., *Sprawozdanie końcowe z realizacji pracy badawczej własnej PBW 809/WAT/2002 pt. „Badanie wpływu temperatury prochu na jego właściwości decydujące o charakterystykach balistycznych strzału”*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2002.
- [8] Лебедев А. А., Чернобровкин Л. С., *Динамика полета*, Машино-строение, Москва, 1973.
- [9] Sieriebriakow M., *Balistyka wewnętrzna*; Wydawnictwo MON, Warszawa 1955.
- [10] STANAG 4115 Land (Edition 2), *Definition and Determination of Ballistic Properties of Gun Propellants*, 1997.
- [11] STANAG 4400 Land (Edition 1)/1993, *Derivation of Thermochemical Values for Interior Ballistic Calculation*, 1993.
- [12] STANAG 4500 Land (Edition 1)/1998, *Procedures to Determine Field Artillery Muzzle Velocity Management, Interchangeability and Prediction*, 1998.
- [13] Surma Z., *Doświadczalna weryfikacja i modyfikacja równań balistyki wewnętrznej*; Rozprawa doktorska, Wydawnictwo WAT, Warszawa 2000.
- [14] *Tabele strzelnicze do 120 mm moździerzy wz.1938 i wz. 1943*. Art.539/73, Wydawnictwo MON, Warszawa, 1974
- [15] *Tabele strzelnicze do 122 mm haubicy samobieżnej 2S1*. Art.624/78, Wydawnictwo MON, Warszawa, 1979.
- [16] *Tabele strzelnicze do 152 mm armatohaubicy samobieżnej wz.1977*. Art.722/85, Wydawnictwo MON, Warszawa, 1989.
- [17] Torecki S., Surma Z., Leciejewski Z. i inni, *Sprawozdanie końcowe z realizacji projektu badawczego KBN nr OT00A 00811: Badania kompleksowe właściwości termodynamicznych gazów prochowych i rzeczywistej szybkości spalania prochów oraz weryfikacja zależności obliczeniowych balistyki wewnętrznej*, Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa 1999.