

OBLICZENIA TEMPERATURY LUFY ZDALNIE STEROWANEGO SYSTEMU PRZECIWLOTNICZEGO KALIBRU 35 MM DLA PRZYJĘTEGO CYKLU STRZELANIA

Streszczenie: W zdalnie sterowanym systemie przeciwlotniczym kalibru 35 mm w przypadku zbyt dużego nagrzania lufy lub układu wylotowego strzelającej armaty nastąpi automatyczne wstrzymanie ognia, z równoczesnym aktywowaniem prowadzenia strzelania z pozostałych armat, pozostających w gotowości do strzelania. W artykule przedstawiono analizę obciążeń cieplnych lufy podczas strzału pojedynczego i podczas strzelania seryjnego. W wyniku tych analiz wyodrębniono przekrój lufy najbardziej obciążony cieplnie podczas strzelania oraz określono maksymalną (dopuszczalną) długość serii ze względu na ograniczenia cieplne materiału lufy. W części końcowej przedstawiono wyniki analizy zmiany temperatury lufy dla określonego cyklu strzelania.

BARREL TEMPERATURE CALCULATION FOR ESTABLISHED SHOOTING CYCLE OF 35 MM REMOTE CONTROL ANTI-AIRCRAFT GUN SYSTEM

Abstract: In the case of too big heating of barrel's wall of 35 mm remote control anti-aircraft gun system, shooting will be stopped. Other barrels (being thus far in operational readiness) of the gun system may be activated then. Heat load analysis of the barrel's wall during a single shoot and volley shooting are presented in this paper. The most heat loaded barrel's section has been separated and maximum (acceptable on account of thermal restriction of barrel's material) length of burst has been determined. Results of barrel's temperature change analysis for specified shooting cycle are presented in the end part of the paper.

I. Wstęp

W trakcie realizacji projektu rozwojowego nr O R00 0021 09, którego celem jest opracowanie i wykonanie demonstratora technologii zdalnie sterowanego systemu przeciwlotniczego (ZSSP) kalibru 35 mm, koniecznym okazało się przeanalizowanie zakładanego, dla tego systemu, rytmu strzelań ze względu na temperaturę lufy osiąganą podczas strzelania. Wśród podstawowych podsystemów ZSSP [1] ma znaleźć się również podsystem kontroli i sterowania armaty realizujący m.in.: ustawienie rodzaju amunicji i długości serii oraz zliczanie wystrzelonej amunicji. W przypadku zbyt dużego nagrzania lufy lub układu wylotowego strzelającej armaty nastąpi automatyczne wstrzymanie ognia, z równoczesnym aktywowaniem prowadzenia strzelania z pozostałych armat, pozostających dotychczas w gotowości. Istnieje zatem potrzeba weryfikacji jednego z zakładanych rytmów strzelań oraz przeanalizowanie możliwości strzelania w innym trybie biorąc pod uwagę

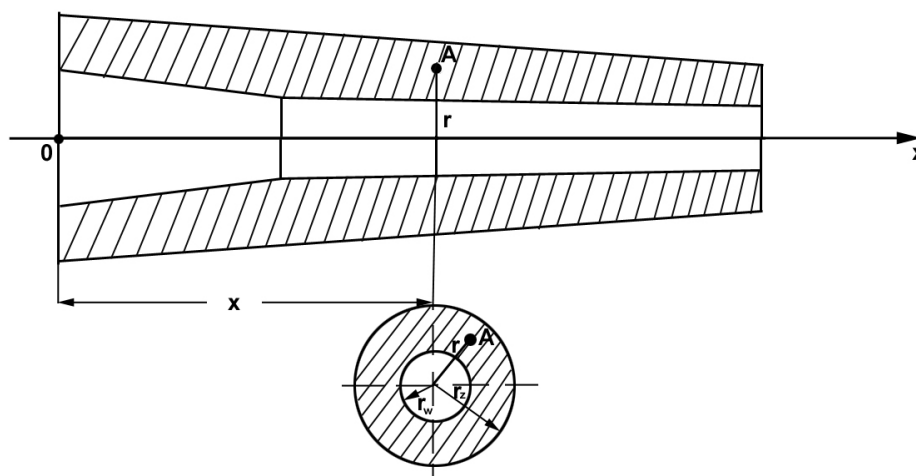
właściwą eksploatację bojową armat wchodzących w skład zdalnie sterowanego systemu przeciwlotniczego.

2. Analiza obciążeń cieplnych lufy

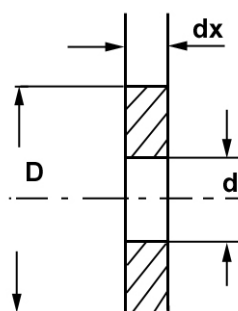
2.1. Obciążenia cieplne lufy podczas strzału pojedynczego

Jako miarę obciążeń cieplnych dowolnego (x) przekroju lufy (rys.1) przyjęto stosunek ciepła Q_x przekazywanego przez gazy prochowe pierścieniowi ścianki lufy (rys. 2) o grubości dx do masy m_x tego pierścienia podczas jednego strzału

$$\bar{Q}_x = \frac{Q_x}{m_x} \quad (1)$$



Rys. 1. Przyjęty układ współrzędnych



Rys. 2. Pierścień ścianki lufy w wybranym przekroju

Uwzględniając:

$$m_x = \rho_s \frac{\pi}{4} (D_x^2 - d^2) dx$$

$$Q_x = \pi \cdot d \cdot dx \int_0^{t_k} q_x(t) dt = \pi \cdot d \cdot dx \int_0^{t_k} \alpha_x(t) [T_g(t) - T_{w_x}(t)] dt$$

gdzie oznaczono:

t_k – czas od minięcia przez dno pocisku przekroju x do końca okresu powylotowego działania gazów prochowych na lufę;

ρ_s – gęstość materiału ścianki lufy;

d – kaliber (średnica przewodu) lufy;

D_x – średnica zewnętrzna lufy w przekroju x ;

T_{wx} – temperatura nagrzewanej powierzchni przewodu lufy w przekroju x ;

T_g – temperatura gazów prochowych;

α_x – współczynnik przejmowania ciepła w przekroju x (na podstawie [2, 3]),

$$\alpha_x = \frac{6,1}{d^{0,2}} (\rho w_x)^{0,8} \quad (2)$$

ρ – gęstość gazów prochowych;

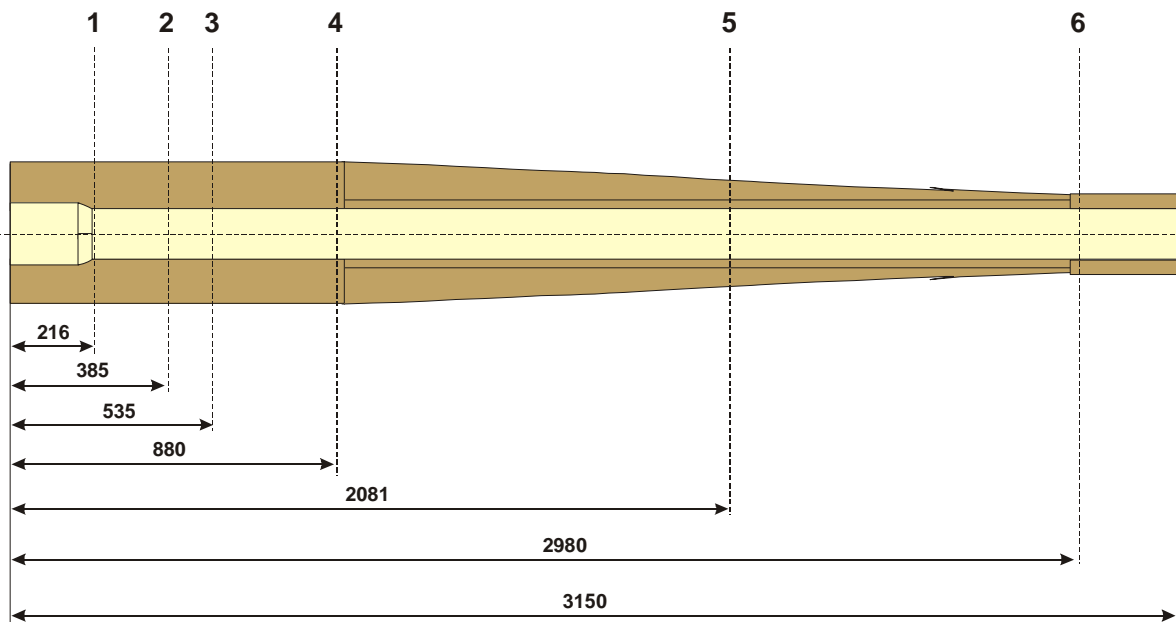
w_x – prędkość gazów prochowych w przekroju x

oraz przyjmując, że temperatura nagrzewanej powierzchni równa jest temperaturze początkowej ścianki lufy $T_{wx} = T_0 = \text{const}$, otrzymano ostatecznie:

$$\bar{Q}_{x0} = \frac{4 \int_0^{t_k} \alpha_x(t) [T_g(t) - T_0] dt}{\rho_s \frac{D_x^2 - d^2}{d}} \quad (3)$$

Występujące w powyższych wzorach: gęstość ρ , prędkość w_x i temperatura T_g gazów prochowych w poszczególnych przekrojach x przewodu lufy są funkcjami czasu t . Do otrzymania wartości tych wielkości w danym przekroju x przewodu lufy rozwiązano model matematyczny [4, 5] problemu głównego balistyki wewnętrznej (PGBW) dla 35 mm układu miotającego strzelającego amunicją 35 mm FAPDS-T [6].

Poglądowe umiejscowienie analizowanych przekrojów (1-6) lufy oraz odległości tych przekrojów od płasku wlotowego lufy zaprezentowano na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat rozpatrywanej 35 mm lufy wraz z zaznaczeniem umiejscowienia analizowanych przekrojów

Przekrój nr 6 charakteryzuje się najmniejszą grubością ścianki lufy. Pomiedzy przekrojem nr 6, a płaskiem wylotowym (koniec lufy) na lufę nakręcane jest urządzenie wylotowe (zawierające hamulec, sensory pomiaru prędkości wylotowej pocisków oraz układ programowania zapalnika) zwiększające grubość tej części lufy.

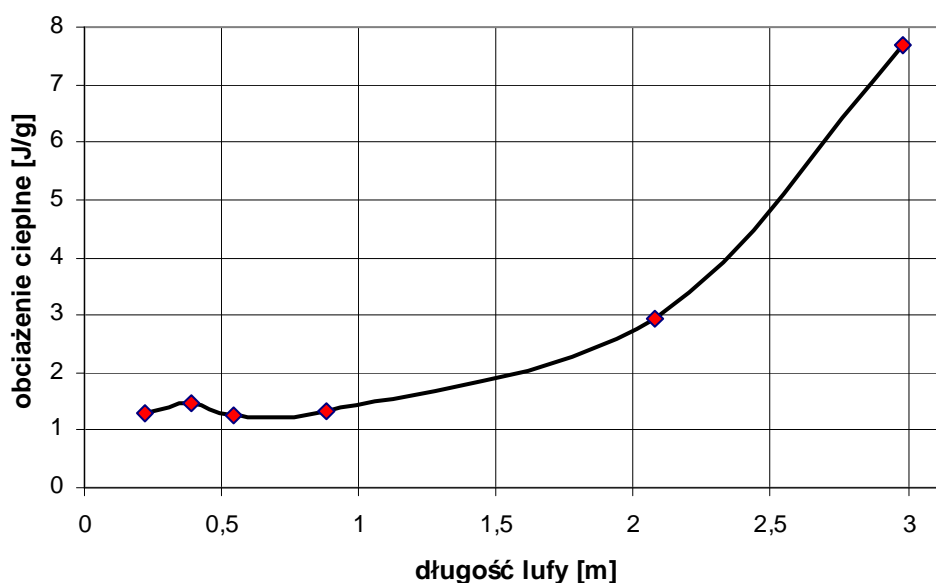
Znajdująca się w ZSSP lufa 35 mm armaty wykonana jest ze stali 32CrMoV12 10, dla której przyjęto następujące dane materiałowe: gęstość $\rho_s = 8000 \text{ kg/m}^3$, ciepło właściwe $c=550 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, a dopuszczalna maksymalna temperatura eksploatacji wynosi 800°C .

Ponadto do obliczeń symulacyjnych obciążeń cieplnych lufy przyjęto następujące wartości parametrów wejściowych: temperatura początkowa lufy (przed pierwszym strzałem) 293 K , ciśnienie zapłonu 5 MPa , ciśnienie forsowania 30 MPa oraz krok całkowania $10 \mu\text{s}$.

W wyniku przeprowadzonych obliczeń dla pojedynczego strzału wyznaczono obciążenia cieplne (3) poszczególnych przekrojów lufy, których wartości zestawiono w tabeli 2 oraz pokazano na rysunku 4.

Tabela 2. Obciążenia cieplne wybranych przekrojów lufy

Nr przekroju	$\bar{Q}_{x0} \text{ [J/g]}$
1	1,29
2	1,46
3	1,26
4	1,34
5	2,95
6	7,70



Rys. 4. Charakter zmian obciążeń cieplnych lufy z zaznaczeniem wartości (znaczniki o kolorze czerwonym) dla analizowanych przekrojów

Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że najbardziej obciążonym cieplnie przekrojem lufy jest przekrój nr 6, znajdujący się w pobliżu wylotu, w obszarze lufy nie osłoniętym zamocowanym na niej urządzeniem wylotowym. W tym przekroju przyrost temperatury po pierwszym strzale wyniesie około 14°C .

2.2. Obciążenie cieplne lufy przy strzelaniu seriami

Przy strzelaniu ogniem ciągłym (seriami), z przeciętną dla broni automatycznej szybkostrzelnością teoretyczną n strzałów na sekundę, czas między kolejnymi strzałami

$$t_s = \frac{1}{n} [s] = \frac{1000}{n} [ms]$$

jest zwykle o rząd wielkości dłuższy od czasu balistycznego, w którym lufa jest nagrzewana przez gazy prochowe. Zakładając, że strzelanie jest realizowane w warunkach normalnych można przyjąć, że jest to czas w zasadzie wystarczający do praktycznego wyrównania się temperatury w obszarze między powierzchnią wewnętrzną (przewodu), a zewnętrzną ścianki lufy, a jednocześnie na tyle mały, aby dopuszczalne było pominięcie wpływu powietrznego chłodzenia lufy na jej stan cieplny w okresie prowadzenia ognia ciągłego (seryjnego).

Konsekwencją powyższych uwag jest wniosek, że analiza wymiany ciepła przy dowolnym strzale w serii może być prowadzona analogicznie, jak w przypadku strzału pojedynczego (pierwszego) z uwzględnieniem jedynie odpowiedniej dla danego strzału wartości temperatury T_0 w warunkach początkowych jednowymiarowego (przestrzennie) niestabilnego równania przewodnictwa ciepła [7].

Temperaturę średnią ścianki w wybranym przekroju po wystrzeleniu ogniem ciągłym N pocisków można obliczyć metodą sumowania impulsów cieplnych. Mianowicie w wyniku N kolejnych strzałów serii, zrealizowanej z szybkostrzelnością teoretyczną, elementarnemu pierścieniowi lufy o grubości dx , usytuowanemu w odległości x od wlotu, przekazane zostanie ciepło

$$\Delta Q_N = \sum_{i=1}^N Q_i \quad (4)$$

gdzie Q_i – impulsy cieplne, przekazywane pierścieniowi lufy przez gazy prochowe podczas kolejnych strzałów ($i = 1, 2, 3, \dots, N$).

Po uwzględnieniu początkowego stanu cieplnego lufy oraz podzieleniu stronami (4) przez iloczyn ciepła właściwego c materiału ścianki i masy m rozpatrywanego pierścienia otrzymamy

$$T_N = T_0 + \frac{1}{cm} \sum_{i=1}^N Q_i = T_0 + \sum_{i=1}^N \Delta T_i \quad (5)$$

gdzie: T_N – temperatura średnia ścianki lufy w rozpatrywanym przekroju po serii N strzałów,

T_0 – temperatura lufy w chwili inicjowania pierwszego strzału serii (temperatura początkowa),

ΔT_i – przyrosty temperatury średniej lufy po kolejnych strzałach.

Impulsy cieplne Q_i można wyznaczyć z zależności

$$Q_i = \pi \cdot d \cdot dx \int_0^{t_k} q_i dt \quad (6)$$

Wielkości $q_i = \alpha(T_g - T_{wi}) = q_i(t)$ są natężeniem (gęstością) strumieni cieplnych na powierzchni przewodu lufy w rozpatrywanym przekroju podczas kolejnych strzałów serii.

Ponieważ temperatura T_{wi} powierzchni przewodu lufy podczas kolejnych strzałów zwiększa się, regułą będzie

$$q_{i-1} > q_i > q_{i+1}$$

$$Q_{i-1} > Q_i > Q_{i+1}$$

oraz

$$\Delta T_{i-1} > \Delta T_i > \Delta T_{i+1}$$

Z uwagi na to, że przyrosty temperatury ΔT_i są niewielkie w porównaniu z temperaturą gazów prochowych, w odniesieniu do krótkich serii w obliczeniach praktycznych można przyjąć, że

$$\Delta T_i = \Delta T_1$$

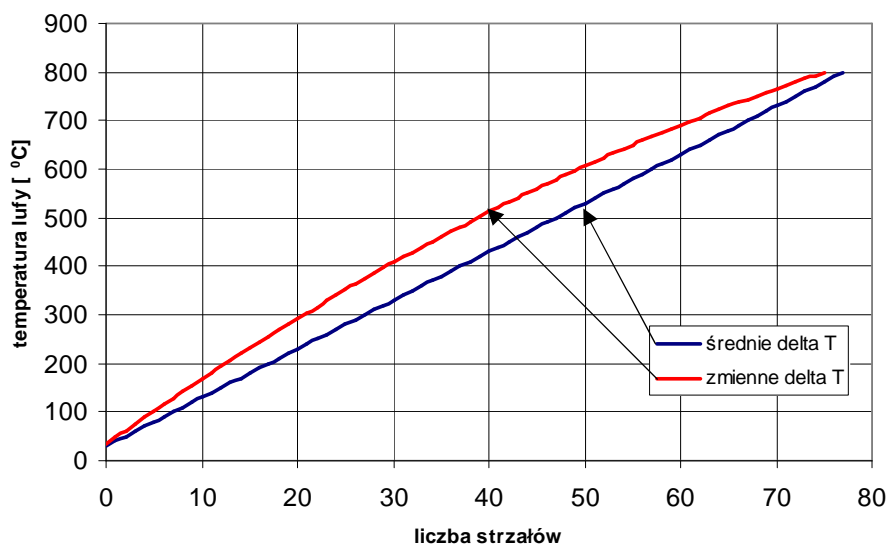
a do ocen porównawczych wyznaczać q_i z zależności przybliżonej

$$q_i = \alpha(T_g - T_{N-1})$$

gdzie $T_{N-1} = T_0 + \sum_{i=1}^{N-1} \Delta T_i \approx T_0 + (N-1)\Delta T_1$

Z analiz przeprowadzonych w punkcie 2.1 wynika, że przyrost temperatury ΔT_1 ścianki lufy w przekroju nr 6 po pierwszym strzale wyniesie około $14,0^\circ\text{C}$. Po kolejnych strzałach w serii, przyrosty temperatury ΔT będą maleć (po ok. $0,1^\circ\text{C}$ na strzał). Przyjmując, że dopuszczalna temperatura lufy ze względu na właściwości stali wynosi 800°C , obliczono dopuszczalną długość serii $N_d = 78$ strzałów. Dla tak określonej długości serii można przyjąć, że średni jednostkowy przyrost temperatury lufy wyniesie $\Delta T = 10^\circ\text{C}$. Ze względu na brak danych doświadczalnych tak obliczoną wartość N_d należy traktować jako wielkość orientacyjną (niekoniecznie zgodną z danymi producenta).

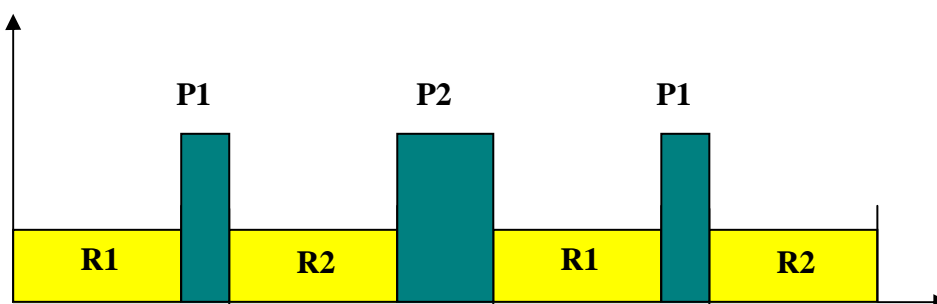
Graficzny obraz zmiany temperatury lufy dla stałego (średniego) i zmiennego przyrostu temperatury lufy (od strzału do strzału) w przekroju nr 6 dla dopuszczalnej długości serii zaprezentowano na rys. 5.



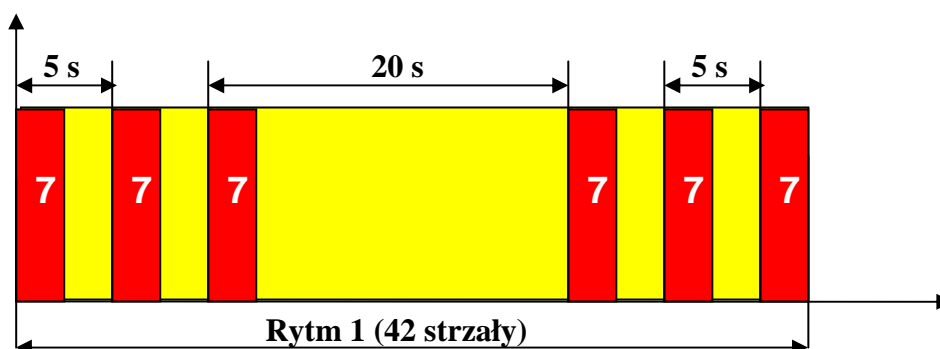
Rys. 5. Zmiana temperatury lufy w przekroju nr 6 w trakcie strzelania ogniem ciągłym (serią o dopuszczalnej długości)

3. Temperatura lufy po realizacji założonego cyklu strzelań

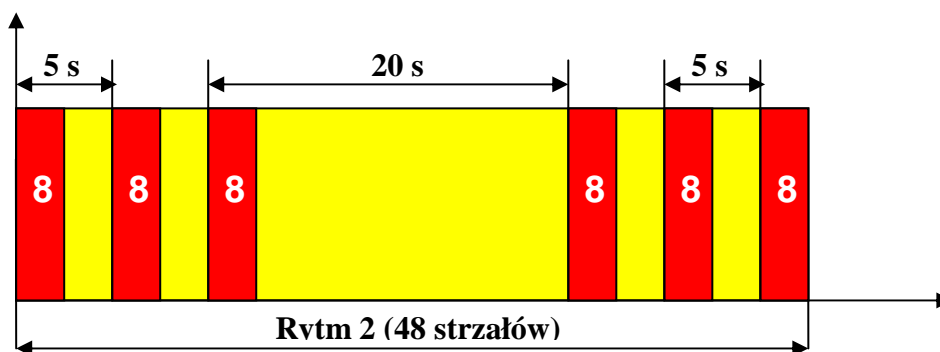
Biorąc za podstawę rozważania i zależności przedstawione w punkcie 2.2 oraz wyniki rozwiązania problemu głównego balistyki wewnętrznej dla przekroju nr 6, przeprowadzono obliczenia temperatury lufy w tym przekroju dla cyklu strzelania obejmującego fazy R1-P1-R2-P2 (rys. 6-8).



Rys. 6. Cykl strzelań dla amunicji klasycznej i podkalibrowej:
R1 – rytm 1, R2 – rytm 2; P1 –przerwa 180 sekund; P2- przerwa 600 sekund



Rys. 7. Rytm 1: trzy serie 7-strzałowe – przerwa 20 sekund – trzy serie 7-strzałowe

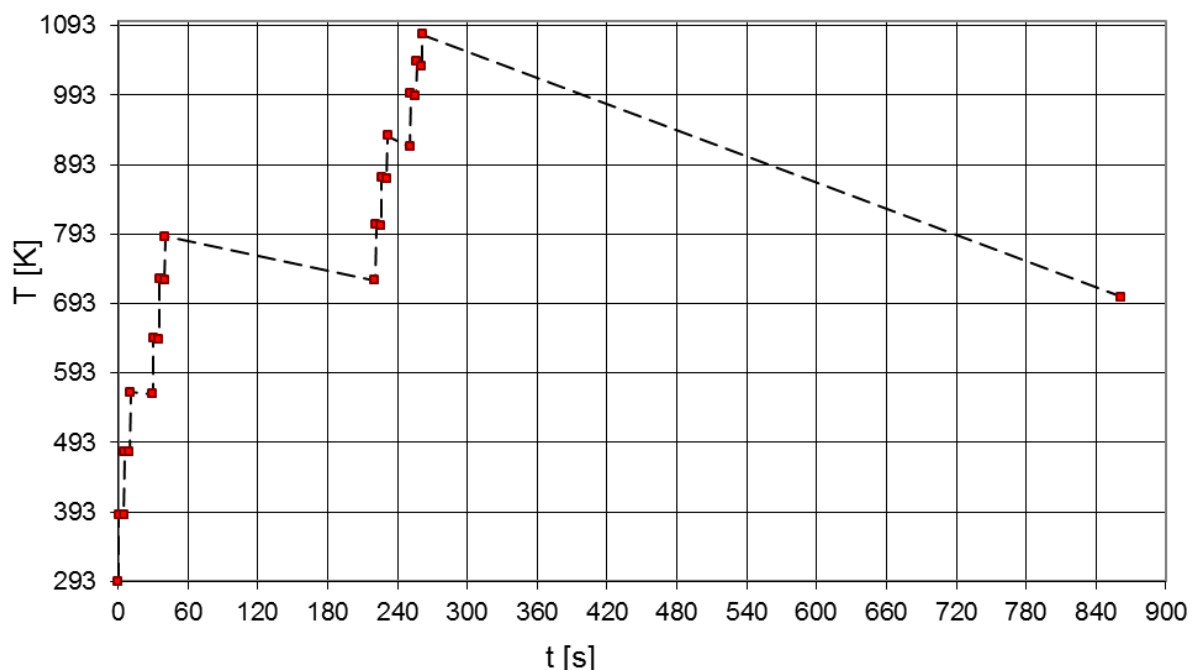


Rys. 8. Rytm 2: trzy serie 8-strzałowe - przerwa 20 sekund – trzy serie 8-strzałowe

Obliczenia przeprowadzono dla zmiennego przyrostu (od strzału do strzału) temperatury lufy. Wyniki obliczeń temperatury lufy w przekroju nr 6, po charakterystycznych etapach cyklu strzelania zaprezentowano na rysunku 9. Z obliczeń tych wynika, że po cyklu strzelania, obejmującym fazy R1-P1-R2, lufa osiąga temperaturę dopuszczalną, a po przerwie trwającej 600 sekund temperatura lufy w wyniku chłodzenia nie obniży się wystarczająco,

aby możliwe było powtórzenie cyklu strzelania (obejmującego fazy R1-P1-R2) zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 6.

Kolejny cykl strzelania obejmujący fazy R1-P1-R2 powinien być ewentualnie realizowany z wykorzystaniem innej lufy, znajdującego się w baterii, zdalnie sterowanego systemu przeciwlotniczego lub po dłuższym, niż 600 sekund, chłodzeniu.



Rys. 9. Wykres zmiany temperatury lufy w wyniku realizacji cyklu strzelania R1-P1-R2-P2

4. Wnioski

1. Przyrosty temperatury średniej lufy po pierwszym i kolejnych strzałach obliczone zostały bez uwzględnienia rzeczywistej temperatury powierzchni przewodu lufy podczas strzelania. Oznacza to, że ich wartości mogą być nieco zawyżone, co powinno zapewnić bezpieczne strzelanie według pozytywnie ocenionych programów.
2. Z przeprowadzonych obliczeń wynika, że najbardziej obciążonym cieplnie przekrojem lufy jest przekrój nr 6, znajdujący się w odległości 170 mm od wylotu lufy, w obszarze nie osłoniętym zamocowanym na niej urządzeniem wylotowym.
3. Wykonane analizy i obliczenia wskazują, że dopuszczalna długość serii wynosi $N_d = 78$ strzałów. W celu uściślenia informacji odnośnie dopuszczalnej długości serii oraz oceny różnych programów strzelań niezbędne wydaje się przeprowadzenie badań doświadczalnych przynajmniej z pomiarem temperatury powierzchni zewnętrznej lufy w kilku wybranych przekrojach po zakończeniu serii o różnych długościach.
4. Z obliczeń temperatury lufy w przekroju nr 6 wynika, że po cyklu strzelania obejmującym fazy R1-P1-R2 lufa osiąga temperaturę dopuszczalną, a po przerwie trwającej 600 sekund temperatura lufy w wyniku chłodzenia nie obniży się wystarczająco, aby możliwe było powtórzenie cyklu strzelania (obejmującego fazy R1-P1-R2) zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 6. Kolejny cykl strzelania obejmujący fazy R1-P1-R2 powinien być ewentualnie realizowany z wykorzystaniem innej lufy, znajdującego się w baterii, zdalnie sterowanego systemu przeciwlotniczego lub po dłuższym niż 600 sekund chłodzeniu.

Literatura

- [1] T. Linkiewicz, A. Pokraśniewicz, K. Stępień, M. Szulc, R. Woźniak, T. Zawada, *Charakterystyka demonstratora technologii zdalnie sterowanego systemu przeciwlotniczego kalibru 35 mm dla Sił Zbrojnych RP*, Materiały VIII Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. Naukowe aspekty techniki uzbrojenia, str. 563-575, Pułtusk, 6-8.10.2010.
- [2] B. W. Orłow, G. J. Mazing, *Termodinamiczeskije i ballisticzeskije osnovy projektowanija raketnych dwigatjelej na twierdom topliwie*, Wydawnictwo „Maszynostrojenije”, Moskwa 1968.
- [3] S. Torecki, *Analiza procesu wymiany ciepła w lufach strzeleckiej broni automatycznej*, Dysertacja WAT, Warszawa 1962.
- [4] M. Sieriebriakow, *Balistyka wewnętrzna*, MON 1955.
- [5] S. Torecki, *Balistyka wewnętrzna*, WAT, Warszawa 1980.
- [6] K. Sienicki, K. Motyl, *Weryfikacja modelu matematycznego pocisku przeciwlotniczego kalibru 35 mm na podstawie tabel strzelniczych*, Problemy mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa, Nr 2(2) 2010, str. 35-49, Warszawa, 2010.
- [7] S. Wiśniewski, *Termodynamika techniczna*, WNT, Warszawa 1980.

Praca została zrealizowana jako część projektu rozwojowego nr O R00 0021 09 finansowanego przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2009-2011.