

Mô hình thuật phóng của pháo trên xe có sử dụng thiết bị khí hút khói

Interior ballistics model of mounted cannons on vehicles using bore evacuator device

Trần Quốc Trình^{1,*}, Võ Văn Biên¹, Nguyễn Minh Phú¹, Phùng Xuân Sơn²

¹Học viện Kỹ thuật Quân sự

²Khoa Cơ khí, Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội

*Email: tranquoctrinh9981@yahoo.com.vn

Mobile: 0976298659

Tóm tắt

Từ khóa:

Pháo 100mm D10-T2C; Thuật phóng trong; Thiết bị hút khói; Xe tăng T55.

Trên cơ sở phân tích hoạt động của bộ phận hút khói của pháo trên xe, bài báo đã trình bày một phương pháp xây dựng mô hình toán xác định các đặc trưng thuật phóng của các loại pháo trên xe có sử dụng thiết bị hút khói. Mô hình mới thành lập được áp dụng để giải cho pháo 100mm D10-T2C trên xe tăng T55. Kết quả nghiên cứu của bài báo phục vụ trực tiếp cho quá trình tính toán thiết kế bộ phận hút khói trên pháo.

Abstract

Keywords:

100mm D10-T2C cannon, Interior ballistics, Bore evacuator, T55 tanks.

On the basis of analyzing the performance of the bore evacuator, the paper presented a method of building mathematical model to determine interior ballistics characteristics of cannons mounted on vehicles using bore evacuators. Newly established model were applied as solutions for 100mm D10-T2C cannon on T55 tanks. The research results of the paper served directly for the process of designing and calculating bore evacuators on cannons.

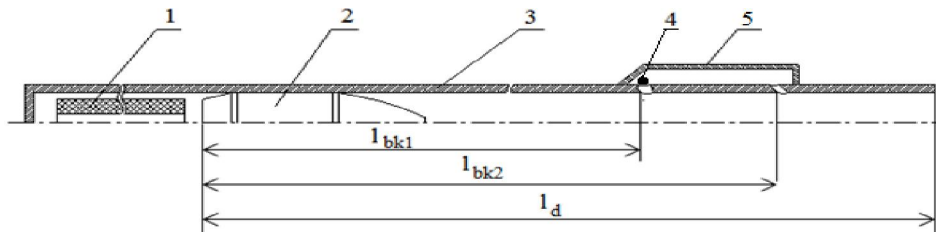
Ngày nhận bài: 31/7/2018

Ngày nhận bài sửa: 05/9/2018

Ngày chấp nhận đăng: 15/9/2018

1. GIỚI THIỆU CHUNG

Bộ phận hút khói của các pháo trên xe tăng hoạt động theo nguyên lý trích khí. Khi đầu đạn qua các lỗ trích - xả khí, khí thuốc trong nòng trao đổi với buồng khí. Khi đầu đạn ra khỏi nòng, áp suất trong nòng bằng áp suất khí quyển, khi đó áp suất trong buồng khí khá lớn. Khí thuốc qua các vòi phun phụt về trước với tốc độ lớn, tạo ra phía sau nó một vùng áp suất thấp. Do đó khí thuốc trong nòng và buồng đạn được cuốn ra ngoài với số lượng đáng kể, làm giảm nồng độ khí thuốc trong khoang chiến đấu của xe, tránh ngộ độc cho pháo thủ cũng như giảm khả năng xuất hiện luồng lửa ngược khi mở khóa nòng trong trường hợp khí thuốc chưa cháy hết.



Hình 1. Mô hình vật lý của pháo trên xe tăng có sử dụng bộ phận hút khí
1. Thuốc phóng; 2. Đầu đạn; 3. Nòng pháo; 4. Viên bi; 5. Buồng khí.

Việc xác định quy luật thay đổi các đặc trưng thuật phóng của pháo và buồng khí có ý nghĩa hết sức quan trọng trong việc tính toán thiết kế các chi tiết thuộc bộ phận hút khí của các loại pháo trên xe. Mô hình vật lý của bộ phận hút khí của các pháo trên xe được biểu diễn trên hình 1.

2. NỘI DUNG BÀI TOÁN

2.1. Xây dựng phương trình vi phân thuật phóng trong

2.1.1. Các giả thiết

- Thuốc phóng cháy theo quy luật hình học và quy luật tốc độ cháy là tuyến tính một số hạng: $u = u_1 p$;
- Thuốc phóng chỉ cháy trong lòng nòng, thành phần sản phẩm cháy không thay đổi trong suốt thời gian xảy ra hiện tượng bắn;
- Các công thức yếu của khí thuốc đều tỷ lệ với công chủ yếu làm đạn chuyển động tịnh tiến và được tính đến bởi hệ số tăng nặng φ ;
- Toàn bộ liều thuốc cháy trong điều kiện môi trường có áp suất như nhau và bằng áp suất thuật phóng;
- Bỏ qua tổn thất nhiệt trong lòng nòng và buồng khí;
- Tại thời điểm áp suất khí thuốc đạt tới áp suất tổng đạn p_0 , đai đạn được cắt một cách tức thời và đạn cũng bắt đầu chuyển động.

2.1.2. Hệ phương trình vi phân thuật phóng trong

Khảo sát các quá trình xảy ra của hiện tượng bắn tại thời điểm t . Khi đó ta có thể xây dựng được hệ phương trình vi phân mô tả tính quy luật của các quá trình như sau:

a. Các phương trình biểu diễn quy luật cháy và tạo khí

$$\frac{dz}{dt} = \begin{cases} \frac{P}{I_k} & (0 < t \leq t_k); \\ 0 & (t > t_k); \end{cases} \quad (1)$$

$$\frac{d\psi}{dt} = \begin{cases} \chi(1 + 2\lambda z + 3\mu z^2) \frac{dz}{dt} & (0 < t \leq t_k); \\ 0 & (t > t_k); \end{cases} \quad (2)$$

Trong đó: I_k - xung lượng áp suất khí thuốc trong thời gian thuốc phóng cháy; ψ - lượng thuốc phóng cháy tương đối; χ, λ, μ - là các đặc trưng hình dạng của thuốc phóng; z - là bề dày cháy tương đối tính đến thời điểm đang xét; t_k - thời điểm thuốc phóng cháy hết.

b. Các phương trình chuyển động của đạn

$$\frac{dl}{dt} = \begin{cases} 0 & (0 \leq t \leq t_0) \\ v & (t > t_0) \end{cases} \quad (3)$$

$$\frac{dv}{dt} = \begin{cases} 0 & (0 \leq t \leq t_0) \\ \frac{S_n p}{\varphi m_d} & (t > t_0) \end{cases} \quad (4)$$

Ở đây: φ - hệ số tính công thứ yếu, theo [2]: $\varphi = k + \frac{1}{3} \frac{\omega}{q}$; v, m_d - vận tốc, khối lượng đạn; p_0 - áp suất tổng đạn; t_0 - thời điểm đạn được tổng hoàn toàn vào lòng nòng, khi $p = p_0$; S_n - diện tích tiết diện ngang của lòng nòng.

c. Phương trình biểu diễn quy luật thay đổi áp suất khí thuốc trong lòng nòng

Phương trình biểu diễn quy luật thay đổi áp suất khí thuốc trong lòng nòng được xác định dựa vào định luật bảo toàn khối lượng và phương trình trạng thái khí thuốc trong lòng nòng có tính đến khối lượng khí thuốc trao đổi giữa lòng nòng và buồng khí.

Phương trình bảo toàn khối lượng khí trong lòng nòng có dạng:

$$m_+ = m + m_{bk} \quad (5)$$

Trong đó: m_+ - khối lượng khí thuốc sinh ra do quá trình cháy sau thời gian t ; m - khối lượng khí thuốc còn lưu lại trong lòng nòng tại thời điểm t ; m_{bk} - khối lượng khí phụt từ lòng nòng sang buồng khí.

Phương trình trạng thái khí thuốc trong lòng nòng:

$$pW = mRT \quad (6)$$

Trong đó: T - nhiệt độ khí thuốc trong lòng nòng; W - thể tích tự do của khí trong lòng nòng; R - hằng số khí.

Tiến hành đạo hàm theo thời gian hai vế của phương trình (5) kết hợp với phương trình (6) ta được phương trình biểu diễn quy luật thay đổi áp suất khí thuốc trong lòng nòng:

$$\dot{p} = \frac{dp}{dt} = \frac{1}{W} \left[RT(\dot{m}_+ - \dot{m}_{bk}) - p\dot{W} + \frac{pW}{T} \dot{T} \right] \quad (7)$$

Biểu thức W có dạng:

$$W = \begin{cases} W_0 + S_n l - \frac{\omega}{\delta} (1 - \psi) - \alpha \omega \psi & \text{khi } l \leq l_{bk1}; \\ W_0 + S_n l - \frac{\omega}{\delta} (1 - \psi) - \alpha (\omega \psi - m_{bk}) & \text{khi } l > l_{bk1}; \end{cases}$$

Trong đó: W_0 - thể tích buồng đốt; δ - khối lượng riêng của thuốc phóng; α - hệ số cộng tích của khí thuốc; ω - khối lượng ban đầu của liều thuốc phóng.

Biểu thức tính \dot{m}_+ có dạng: $\dot{m}_+ = \frac{dm_+}{dt} = \omega \frac{d\psi}{dt}$

Biểu thức xác định \dot{m}_{bk} :

- Khi $l \leq l_{bk1}$: $m_{bk} = 0$; $\dot{m}_{bk} = 0$;

- Khi $l_{bk1} < l \leq l_{bk2}$:

+ Trường hợp $p \leq \frac{m_{bi} \cdot g}{F_1}$: $\dot{m}_{bk} = 0$;

+ Trường hợp $p > \frac{m_{bi} \cdot g}{F_1}$:

Trong trường hợp này, khí thuốc chảy từ lòng nòng vào buồng khí.

Biểu thức xác định lưu lượng phụt khí qua lỗ phụt từ lòng nòng vào buồng khí có dạng [4]:

$$\dot{m}_{bk} = \dot{m}_{bk1} = \frac{dm_{bk1}}{dt} = \begin{cases} \varphi_2 K_0(k) F_1 \frac{p}{\sqrt{RT}} & khi \frac{p}{p_{bk}} \geq \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}; \\ \varphi_2 F_1 \frac{p}{\sqrt{RT}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_{bk}}{p}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_{bk}}{p}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} & khi 1 \leq \frac{p}{p_{bk}} < \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}; \end{cases}$$

- Khi $l > l_{bk2}$:

Phụ thuộc vào tương quan về độ lớn của áp suất khí thuốc trong lòng nòng (p) và áp suất khí thuốc trong buồng khí (p_{bk}) mà khí có thể chảy từ lòng nòng vào buồng khí hay ngược lại [4].

+ Khi $p > p_{bk}$: Trong trường hợp này, khí chảy từ lòng nòng vào buồng khí. Biểu thức xác định lưu lượng chảy khí từ lòng nòng vào buồng khí có dạng:

$$\dot{m}_{bk} = \dot{m}_{bk1} + \dot{m}_{bk2} = \begin{cases} \varphi_2 K_0(k) (F_1 + F_2) \frac{p}{\sqrt{RT}} & khi \frac{p}{p_{bk}} \geq \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}; \\ \varphi_2 (F_1 + F_2) \frac{p}{\sqrt{RT}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_{bk}}{p}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_{bk}}{p}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} & khi 1 \leq \frac{p}{p_{bk}} < \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}; \end{cases}$$

Với:

$$\dot{m}_{bk2} = \frac{dm_{bk2}}{dt} = \begin{cases} \varphi_2 K_0(k) F_2 \frac{p}{\sqrt{RT}} & khi \frac{p}{p_{bk}} \geq \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}; \\ \varphi_2 F_2 \frac{p}{\sqrt{RT}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_{bk}}{p}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_{bk}}{p}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} & khi 1 \leq \frac{p}{p_{bk}} < \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}; \end{cases}$$

+ Khi $p < p_{bk}$: Trong trường hợp này, khí chảy từ buồng khí vào lòng nòng. Biểu thức xác định lưu lượng chảy khí từ buồng khí vào lòng nòng có dạng:

$$\dot{m}_{bk} = \frac{dm_{bk}}{dt} = \begin{cases} -\varphi_2 K_0(k) F_2 \frac{p_{bk}}{\sqrt{RT_{bk}}} & \text{khi } \frac{p_{bk}}{p} \geq \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}; \\ -\varphi_2 F_2 \frac{p_{bk}}{\sqrt{RT_{bk}}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p}{p_{bk}}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p}{p_{bk}}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} & \text{khi } 1 < \frac{p_{bk}}{p} < \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{k}{k-1}}; \end{cases}$$

+ Khi $p = p_{bk}$: $\dot{m}_{bk} = 0$;

Trong đó, φ_2 - hệ số tổn thất lưu lượng khí; T, T_{bk} - lần lượt là nhiệt độ của khí thuốc trong lòng nòng và buồng khí; F_1, F_2 - diện tích tiết diện ngang của lỗ khí trước và sau; $K_0(k)$ - hàm của chỉ số mũ đoạn nhiệt:

$$K_0(k) = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}}$$

d. Phương trình biểu diễn quy luật thay đổi nhiệt độ khí thuốc trong lòng nòng

Phương trình biểu diễn quy luật thay đổi nhiệt độ khí thuốc trong lòng nòng được xác định từ phương trình định luật I nhiệt động học:

$$dQ = dU + \sum_{i=1}^n dL_i \quad (8)$$

Trong đó: Q - nhiệt lượng do thuốc phóng cháy tạo ra sau thời gian t

$$dQ = (\dot{m}_+ dt) c_v T_1 = c_v T_1 \dot{m}_+ dt \quad (9)$$

Với c_v - nhiệt dung đẳng tích của khí; T_1 - nhiệt độ cháy của thuốc phóng;

U - nội năng của khí trong nòng,

$$dU = d[(m_+ - m_{bk}) c_v T] = c_v [(\dot{m}_+ - \dot{m}_{bk}) T dt + (m_+ - m_{bk}) \dot{T} dt] \quad (10)$$

$\sum_{i=1}^n dL_i$ - tổng các công của khí thuốc thực hiện khi bắn. Trong mô hình khảo sát ta chỉ xét

đến công để tạo năng lượng chuyển động tịnh tiến cho đầu đạn E_{dan} và entalpi của khối lượng khí trong buồng khí I_{bk} . Do đó:

$$\sum_{i=1}^n dL_i = dE_{dan} + dI_{bk} \quad (11)$$

$$dE_{dan} = d\left(\frac{\varphi m_d v^2}{2}\right) = \varphi m_d v \dot{v} dt; \quad (12)$$

$$dI_{bk} = \dot{I}_{bk} dt = \begin{cases} 0 & \text{khi } p = p_{bk} \text{ hoặc } l \leq l_{bk1}; \\ (\dot{m}_{bk} c_p T) dt & \text{khi } p > p_{bk} \text{ và } l > l_{bk1}; \\ (\dot{m}_{bk} c_p T_{bk}) dt & \text{khi } p < p_{bk} \text{ và } l > l_{bk1}; \end{cases} \quad (13)$$

Thay (12) và (13) vào phương trình (11) ta được:

$$\sum_{i=1}^n dL_i = \varphi m_d v \dot{v} dt + \dot{I}_{bk} dt \quad (14)$$

Thay (9), (10) và (13) vào (8) và biến đổi ta được phương trình biểu diễn quy luật thay đổi nhiệt độ trong lòng nòng có dạng:

$$\dot{T} = \frac{dT}{dt} = \frac{1}{(m_+ - m_{bk})} \left[T_1 \dot{m}_+ - (\dot{m}_+ - \dot{m}_{bk}) T - \frac{1}{c_v} (\varphi m_d v \dot{v} + \dot{I}_{bk}) \right] \quad (15)$$

e. Phương trình biểu diễn quy luật thay đổi áp suất khí thuốc trong buồng khí

Phương trình biểu diễn quy luật thay đổi áp suất khí thuốc trong buồng khí được xác định từ phương trình trạng thái khí thuốc trong buồng khí:

$$p_{bk} W_{bk} = m_{bk} R T_{bk} \quad (16)$$

Trong đó: p_{bk} : áp suất khí thuốc trong buồng khí; T_{bk} : nhiệt độ khí thuốc trong buồng khí; W_{trk} : thể tích tự do buồng khí: $W_{bk} = W_{bk.0} - \alpha m_{bk}$; $W_{bk.0}$: thể tích ban đầu của buồng khí.

Tiến hành đạo hàm hai vế phương trình (16) theo thời gian và thực hiện các phép biến đổi ta được phương trình biểu diễn quy luật thay đổi áp suất khí thuốc trong buồng khí có dạng:

$$\dot{p}_{bk} = \frac{dp_{bk}}{dt} = \frac{R}{W_{bk}} \left(\dot{m}_{bk} T_{bk} + m_{bk} \dot{T}_{bk} + \frac{\alpha \dot{m}_{bk} m_{bk} T_{bk}}{W_{bk}} \right) \quad (17)$$

f. Phương trình biểu diễn quy luật thay đổi nhiệt độ khí thuốc trong buồng khí

Phương trình biểu diễn quy luật thay đổi nhiệt độ trong buồng khí được xác định dựa vào định luật bảo toàn năng lượng. Sau khi đi vào buồng khí, năng lượng của khí thuốc ở dạng nhiệt năng sẽ được lưu trữ dưới dạng nội năng khí thuốc. Dựa vào định luật bảo toàn năng lượng ta có:

$$dQ = dU_{bk} \quad (18)$$

Trong đó: dQ : biến thiên nhiệt lượng của khí thuốc trong buồng khí, cũng chính là lượng entalpi của khối lượng khí trao đổi giữa lòng nòng và buồng khí,

$$dQ = \dot{I}_{bk} dt = (\dot{m}_{bk} dt) c_p T \quad (19)$$

U_{bk} : Nội năng của khí trong buồng khí.

$$\begin{aligned} dU_{bk} &= d(m_{bk} c_v T_{bk}) = c_v (\dot{m}_{bk} dt T_{bk} + m_{bk} \dot{T}_{bk} dt) \\ &= c_v (\dot{m}_{bk} T_{bk} + m_{bk} \dot{T}_{bk}) dt \\ dU_{bk} &= c_v (\dot{m}_{bk} T_{bk} + m_{bk} \dot{T}_{bk}) dt \end{aligned} \quad (20)$$

Thay (19) và (20) vào (18) ta được:

Do đó, phương trình biểu diễn quy luật thay đổi nhiệt độ trong buồng khí có dạng:

$$\frac{dT_{bk}}{dt} = \frac{1}{c_v m_{bk}} \left[\dot{I}_{bk} - c_v \dot{m}_{bk} T_{bk} \right] \quad (21)$$

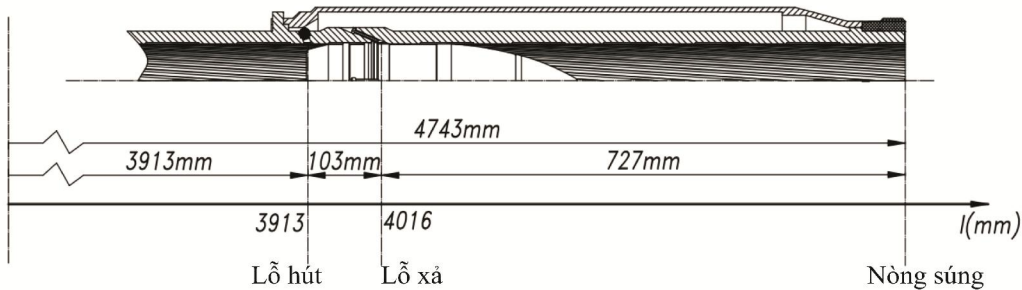
Như vậy, hệ gồm các phương trình: (1)÷(4), (7), (16), (17), (21) được dùng để xác định các đặc trưng thuật phóng trong của pháo trên xe có sử dụng bộ phận hút khói.

Các điều kiện ban đầu để giải hệ phương trình là: $t = 0$; $z = z_0$; $\psi = \psi_0$; $v = 0$; $l = 0$; $p = p_{moi}$; $p_{bk} = p_{bk.0}$; $T = 2000K$; $T_{bk} = 293 K$.

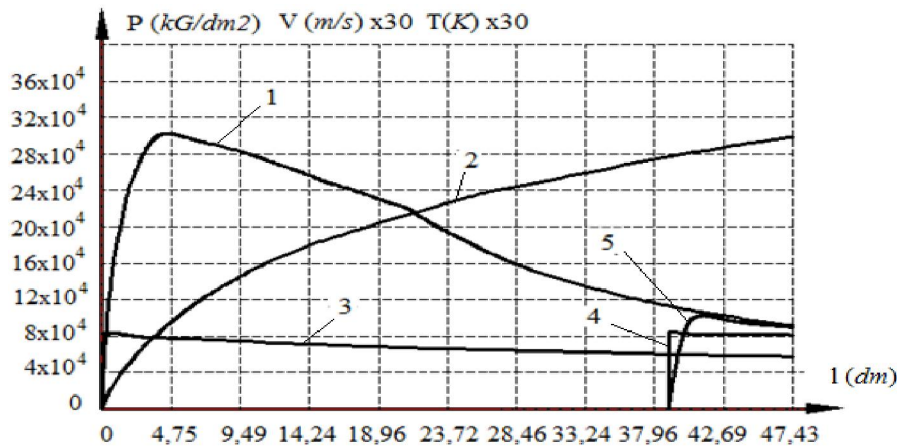
$$\psi_0 = \frac{\frac{1}{f} - \frac{1}{\delta}}{\frac{1}{f} + \alpha - \frac{1}{\delta}}; \quad \sigma_0 = \sqrt{1 + 4 \frac{\lambda}{\chi} \psi_0} = \sqrt{1 - 4 \frac{\chi - 1}{\chi^2} \psi_0}; \quad z_0 = \frac{\sigma_0 - 1}{2\lambda} = \frac{2\psi_0}{\chi(\sigma_0 + 1)}. \quad (22)$$

2.2. Áp dụng mô hình giải bài toán thuật phóng trong cho pháo 100mm D10-T2C trên xe tăng T55

Bộ phận hút khói của pháo 100mm D10-T2C thuộc kiểu van bi, bao gồm các chi tiết: ống bọc, lỗ hút - xả, lỗ xả và các van bi, có cấu tạo như hình 2 [1]. Các tham số đầu vào theo [3] [4] như sau: $W_0 = 8,25$ [dm³]; $S_n = 0,79$ [dm²]; $l_d = 47,43$ [dm]; $m = 15,6$ [kg]; $p_0 = 300$ [kG/cm²]; $|\omega| = 5,5$ [kg]; $f = 1030000$ [kG.dm/kg]; $\alpha = 0,969$; $\delta = 1,6$ [kg/dm³]; $I_k = 1726$ [kG.s/dm³]; $T_1 = 2790K$; $l_{bk1} = 39,13$ [dm]; $l_{bk2} = 41,16$ [dm]; $k = 1,2$; $\varphi = 1,16$; $\chi = 1,06$; $\lambda = -0,056$; $F_1 = 78,5 \cdot 10^{-4}$ [dm²]; $F_2 = 76,93 \cdot 10^{-4}$ [dm²]; $W_{bk.0} = 9,22$ [dm³].



Hình 2. Thiết bị hút khói của 100mm D10-T2C trên xe tăng T55



Hình 3. Quy luật thay đổi các tham số thuật phóng của pháo 100mm D10-T2C theo chiều dài nòng pháo

1. Quy luật thay đổi áp suất trong lòng nòng;
2. Quy luật thay đổi vận tốc đầu đạn;
3. Quy luật thay đổi nhiệt độ trong lòng nòng;
4. Quy luật thay đổi nhiệt độ trong buồng khí;
5. Quy luật thay đổi áp suất trong buồng khí.

Bảng 1. Các tham số của bài toán áp suất và so sánh với số liệu của nhà sản xuất cung cấp [5][6].

STT	Các đại lượng	Đơn vị	Giá trị tính toán	Giá trị nhà sản xuất cung cấp [4]	Sai số
1	Áp suất lớn nhất trong nòng	kG/cm^2	3046	3000	1,53%
2	Áp suất khi đạn ra tới miệng nòng	kG/cm^2	965,67	950	1,65%
3	Áp suất lớn nhất trong buồng khí	kG/cm^2	1097,2		
4	Sơ tốc đầu đạn	m/s	912	900	1,3%

Trên hình 3 thể hiện kết quả tính toán các thông số thuật phóng theo quỹ đạo chuyển động của đạn của pháo 100mm Д10-Т2С trên xe tăng Т55.

Căn cứ vào kết quả giải trên hình 3 và bảng 1 cho thấy mô hình thuật phóng trong vừa thiết lập khá phù hợp, các sai số khá nhỏ và có thể chấp nhận được. Qua đó cho thấy độ tin cậy của mô hình và có thể sử dụng mô hình này phục vụ cho các bài toán thiết kế thiết bị hút khói trên xe.

3. KẾT LUẬN

Bài báo đã xây dựng được mô hình toán theo phương pháp mới mô tả đầy đủ tính quy luật các quá trình xảy ra khi bắn của các loại pháo trên xe có sử dụng thiết bị hút khói.

Mô hình toán thể hiện khá chi tiết quá trình trao đổi khí giữa lòng nòng và buồng khí theo các chế độ dưới tới hạn và trên tới hạn nhằm đưa mô hình toán sát hơn với mô hình thật.

Bài báo áp dụng tính toán cho pháo 100mm Д10-Т2С trên xe tăng Т55 và kết quả thu được khá phù hợp với các công bố của nhà sản xuất, nó có ý nghĩa quan trọng trong việc tính toán thiết kế thiết bị hút khói của các loại pháo trên xe.

LỜI CẢM ƠN

Nhóm tác giả cảm ơn sự hỗ trợ của Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội trong nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Tổng cục Kỹ thuật (1995); *Hướng dẫn sử dụng pháo tăng 100mmД10-Т2С*.
- [2]. Nghiêm Xuân Trình (2015); *Thuật phóng trong*; Học viện Kỹ thuật Quân sự, Hà Nội.
- [3]. Nguyễn Quang Lượng, Trần Quốc Trình (2010); *Số liệu Vũ khí-đạn*; Học viện KTQS, Hà Nội.
- [4]. Khổng Đình Tuy (1977); *Trang bị điển hình vũ khí tổng hợp*; Học viện KTQS, Hà Nội.
- [5]. P. E. Соркин (1967); *Газотермодинамика ракетных двигателей на твердом топливе*. Москва.
- [6]. Б. В. Орлов, Г. Ю. Мазинг (1968); *Термодинамические и баллистические основы проектирования ракетных двигателей на твердом топливе*. Москва.