

# NGHIÊN CỨU CÁC THÀNH PHẦN LỰC CẢN CHÍNH DIỆN TÁC DỤNG LÊN ĐÀU ĐẠN SÚNG BỘ BINH BẰNG PHƯƠNG PHÁP MÔ PHỎNG SỐ

## INVESTIGATION ON THE COMPONENTS OF THE AERODYNAMIC DRAG ACTING ON A SMALL-CALIBER BULLET USING NUMERICAL SIMULATION METHOD

Nguyễn Quang Tuấn\*

Trường Đại học Kỹ thuật Lê Quý Đôn, Việt Nam<sup>1</sup>

\*Tác giả liên hệ / Corresponding author: tuannnguyenmta28@gmail.com

(Nhận bài / Received: 13/8/2024; Sửa bài / Revised: 12/9/2024; Chấp nhận đăng / Accepted: 26/9/2024)

**Tóm tắt** - Bài báo phân tích các thành phần lực cản chính diện của đầu đạn súng bộ binh bằng phương pháp mô phỏng số. Mô hình chảy rối được sử dụng là mô hình k- $\epsilon$ . Các phân tích và tính toán được áp dụng cho đầu đạn M855. Lưới với kích thước 2,16 triệu điểm được sử dụng cho mô phỏng. Phương pháp mô phỏng được kiểm chứng bằng cách đối chiếu kết quả nhận được bằng mô phỏng với dữ liệu thực nghiệm. Lực cản sóng chiếm tỷ trọng lớn nhất (khoảng 50%), lực cản ma sát chiếm tỷ trọng nhỏ nhất (khoảng 10% - 15%), lực cản dính chiếm tỷ trọng đáng kể (khoảng 35% - 45%) tổng lực cản chính diện với số Mach từ 1,47 tới 2,62. Hai phương án cải tiến giảm lực cản của đầu đạn M855 được nghiên cứu. Kết quả cho thấy, phương án tăng chiều dài mũi đạn là hợp lý hơn cả để giảm lực cản. Phương pháp được trình bày trong bài báo có thể được sử dụng trong quá trình thiết kế đạn để tối ưu hình dạng nhằm giảm lực cản chính diện tác dụng lên đầu đạn.

**Từ khóa** - Đạn súng bộ binh; mô phỏng số; CFD; lực cản chính diện; Ansys Fluent.

### 1. Đặt vấn đề

Trong quá trình nghiên cứu, phát triển đạn dược nói chung, lực cản chính diện là thông số đóng vai trò vô cùng quan trọng. Do đó, việc xác định lực cản chính diện của đầu đạn là giai đoạn không thể bỏ qua trong quá trình thiết kế, chế tạo, cải tiến đạn dược. Lực cản chính diện gồm các thành phần là lực cản sóng, lực cản ma sát và lực cản dính. Lực cản sóng sinh ra do các sóng nén và sóng giãn nở hình thành tại mũi đạn và đuôi đạn. Lực cản ma sát sinh ra do ma sát của các phần tử không khí với bề mặt đầu đạn. Lực cản dính phát sinh do vùng khí xoáy ngay sau đầu đạn có áp suất thấp hơn nhiều so với áp suất xung quanh [1]. Việc nghiên cứu tỷ trọng của các thành phần lực cản đóng vai trò quan trọng trong quá trình thiết kế nhằm đưa ra các phương pháp hợp lý để giảm lực cản chính diện tác dụng lên đầu đạn. Hiện nay, có ba phương pháp chủ yếu để xác định lực cản chính diện. Đó là phương pháp bán thực nghiệm, phương pháp thực nghiệm và phương pháp mô phỏng số. Các phần mềm tính toán khí động lực học phổ biến sử dụng phương pháp bán thực nghiệm là Missile Datcom, PRODAS, MC Drag... Ưu điểm của phương pháp bán thực nghiệm là có thể dự báo lực cản chính diện của vật thể bay một cách nhanh chóng. Phương pháp thực nghiệm để xác định lực cản chính diện tuy cho kết quả chính xác nhất nhưng lại tốn kém thời gian và công sức chuẩn bị. Hiện nay, phương pháp khí động lực học tính toán (CFD) ngày càng trở thành một công cụ mạnh mẽ và

**Abstract** - This paper analyzes the components of the aerodynamic drag of a small-caliber bullet using a numerical simulation method. The analyses are applied to the M855 bullet. The turbulence model k- $\epsilon$  is used. The mesh size of 2.16 million elements is applied. The simulation method has been verified by comparing the obtained results with experimental data. The wave drag accounts for the largest proportion (about 50%), the friction drag accounts for the smallest proportion (from 10% to 15%), the base drag accounts for a significant proportion (from 35% to 45%) of the total drag at Mach number from 1.47 to 2.62. Two modified M855 bullets have been studied. The obtained results showed that the variation of increasing the length of the bullet nose is the most reasonable to be adopted. The method presented in this paper can be used in the projectile design process to optimize its shape for reducing the aerodynamic drag.

**Key words** - Small-caliber bullets; numerical simulation; CFD; aerodynamic drag; Ansys Fluent.

hiệu quả để nghiên cứu các đặc trưng khí động của vật thể bay [2]. Trong những năm gần đây, một số tác giả đã áp dụng thành công phương pháp mô phỏng CFD để nghiên cứu các đặc trưng khí động cho các loại đầu đạn súng bộ binh. Demir và các đồng nghiệp đã nghiên cứu giảm lực cản chính diện tác dụng lên đầu đạn bằng cách tạo các đường cắt trên thân đạn và đuôi đạn [3]. Trong [4], Hao và các cộng sự đã khảo sát ảnh hưởng của độ cong phần mũi đạn tới giá trị của hệ số lực cản chính diện tác dụng lên đầu đạn. Khan và các đồng tác giả đã phân tích ảnh hưởng của chiều dài đầu đạn tới giá trị lực cản chính diện và lực nâng tác dụng lên đầu đạn với tốc độ dưới âm bằng phương pháp mô phỏng số kết hợp với thực nghiệm [5]. Ntantis nghiên cứu dòng chảy siêu âm quanh đầu đạn và so sánh các giá trị hệ số lực cản chính diện nhận được bằng phương pháp mô phỏng số và phương pháp đo đạc bằng thực nghiệm trong ống thổi khí động [6]. Ở trong nước, hiện có rất ít các công trình nghiên cứu về khí động lực học của đầu đạn được công bố. Trong [7], các tác giả đã nghiên cứu lực cản khí động tác dụng lên đầu đạn pháo cỡ 122mm sử dụng cần ổn định. Kết quả nghiên cứu trong bài báo cho thấy, các cánh đuôi ổn định có ảnh hưởng rất lớn tới lực cản chính diện tác dụng lên đầu đạn. Có thể thấy, các công trình đã được công bố hiện nay mới chỉ tập trung vào việc đánh giá ảnh hưởng của hình dạng đầu đạn tới các đặc trưng khí động mà chưa đi sâu phân tích tỷ trọng các thành phần của lực cản chính diện. Do đó, mục đích chủ yếu của bài báo là

<sup>1</sup> Le Quy Don Technical University, Vietnam (Nguyen Quang Tuan)

đánh giá tỷ trọng của các thành phần lực cản của đầu đạn ở các tốc độ dòng chảy khác nhau để làm cơ sở đề xuất các giải pháp giảm lực cản chính diện tác dụng lên đầu đạn. Phương pháp được sử dụng trong bài báo là phương pháp mô phỏng số trên phần mềm Ansys Fluent [8]. Một số đặc trưng khí động của đầu đạn 5,56x45mm M855 đã được nghiên cứu thực nghiệm và được công bố rộng rãi. Do đó, bài báo lựa chọn đầu đạn M855 làm đối tượng nghiên cứu để có cơ sở so sánh, đánh giá tính chính xác của mô hình mô phỏng số.

## 2. Mô hình toán học và phương pháp giải

Các đặc trưng khí động của dòng chảy bao quanh đầu đạn được mô tả bởi hệ phương trình Navier-Stokes [9]:

- Phương trình liên tục:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

- Phương trình chuyển động:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i \quad (2)$$

- Phương trình năng lượng:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho E u_i)}{\partial x_i} = \\ = -\frac{\partial(p u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial(u_j \tau_{ij} - q_i)}{\partial x_i} + \rho f_i u_i + q_H \end{aligned} \quad (3)$$

Trong đó:  $\rho$ ,  $p$  lần lượt là mật độ không khí và áp suất không khí;  $u_i = (u_1, u_2, u_3)$  là vector vận tốc của dòng chảy;  $\tau_{ij}$  là tensor ứng suất nhớt;  $\rho f_i$  là lực khối;  $q_H$  là hóa năng;  $\rho E = \rho e + \frac{1}{2} \rho u_i^2$  là tổng năng lượng toàn phần trên một đơn vị thể tích;  $e$  là nội năng;  $q_i$  là dòng nhiệt theo phương  $x_i$ .

Nội năng  $e$  được xác định bởi phương trình Calori cho khí lý tưởng:

$$e = C_v T \quad (4)$$

với  $R = 287 \text{ N.m/kg.K}$  và  $C_v = 717 \text{ N.m/kg.K}$ .

Nhiệt độ  $T$  được xác định thông qua phương trình trạng thái của khí lý tưởng như sau:

$$p = \rho R T \quad (5)$$

Với giả thiết quan hệ tuyến tính giữa ứng suất - biến dạng, tensor ứng suất nhớt có dạng:

$$\tau_{ij} = 2\mu S_{ij} + \lambda \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \quad (6)$$

Trong đó:  $S_{ij}$  là tensor biến dạng:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

$\delta_{ij}$  là ký hiệu Kronecker,  $\delta_{ij} = 1$  khi  $i = j$ ;  $\delta_{ij} = 0$  khi  $i \neq j$ ;

$\mu$  là hệ số nhớt của dòng chảy, phụ thuộc vào nhiệt độ theo quy luật Sutherland:

$$\mu = \frac{1,45T^{3/2}}{T+110} 10^{-6} \quad (8)$$

$\lambda$  là hệ số nhớt, theo Schlichting, có thể lấy:

$$\lambda = -\frac{2}{3} \mu \quad (9)$$

Dòng nhiệt  $q_i$  thường được xấp xỉ theo quy luật Fourier:

$$q_i = -k_T \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (10)$$

Trong đó:  $k_T$  là hệ số truyền nhiệt.

Như vậy, hệ phương trình Navier-Stokes (1)-(3) cùng với các biểu thức liên hệ động học và nhiệt động lực học (4)-(10) tạo thành một hệ phương trình kín. Bằng cách giải hệ phương trình này có thể xác định được các tham số của dòng chảy tại mọi điểm là mật độ ( $\rho$ ), áp suất ( $p$ ), tốc độ (thành phần vận tốc trung bình) ( $u$ ), nhiệt độ ( $T$ ), nội năng ( $e$ ) và tensor ứng suất nhớt (tensor ứng suất Reynolds trung bình) ( $\tau_{ij}$ ) từ đó xác định được lực cản chính diện tác dụng lên đầu đạn.

Trong các nghiên cứu phục vụ thiết kế kỹ thuật, hệ phương trình Navier-Stokes thường được giải bằng phương pháp Mô phỏng số trung bình theo Reynolds (Reynolds-averaged Navier-Stokes - RANS). Bản chất của phương pháp này là biểu diễn các biến số của dòng chảy qua giá trị trung bình theo thời gian của chúng. Tuy nhiên, trong phương pháp RANS, những hiện tượng xảy ra với quy mô nhỏ hơn kích thước lưới sẽ không được phản ánh trong kết quả mô phỏng. Để mô tả những hiện tượng này cần thêm vào RANS các mô hình bổ sung được gọi là các mô hình chảy rối. Mô hình chảy rối được sử dụng trong bài báo là mô hình chảy rối hai phương trình  $k-\varepsilon$  [10]. Mô hình  $k-\varepsilon$  dựa trên hệ phương trình Navier-Stokes với hai phương trình bổ sung cho hai tham số là động năng chảy rối  $k$  và độ tiêu tán động năng chảy rối  $\varepsilon$ .

Các số hạng nguồn của mô hình  $k-\varepsilon$  là:

$$Q_{\rho k} = P - \rho \varepsilon \quad (11)$$

$$Q_{\rho \varepsilon} = c_1 \frac{\varepsilon}{k} P - c_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} \quad (12)$$

Trong đó:  $c_1 = 1,44$  và  $c_2 = 1,92$  là các hằng số;  $P$  là dẫn xuất động năng chảy rối, khi áp dụng xấp xỉ Boussinesq,  $P$  có dạng:

$$P = -\overline{\rho u_i u_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \left[ \mu_T \left( 2S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho k \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (13)$$

Trong mô hình  $k-\varepsilon$ , độ nhớt chảy rối được xác định từ biểu thức:

$$\mu_T = c_\mu \frac{\rho k^2}{\varepsilon} \quad (14)$$

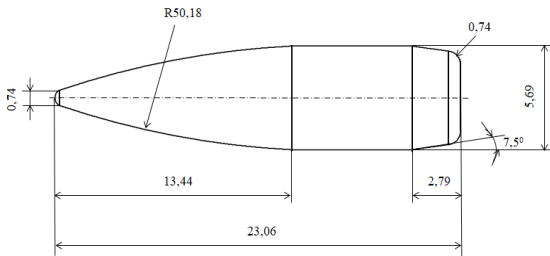
Trong đó:  $c_\mu = 0,09$ ;  $\sigma_k = 1,0$  và  $\sigma_\varepsilon = 1,3$  được coi là không đổi.

Hiện nay, việc giải hệ phương trình Navier-Stokes với mô hình chảy rối  $k-\varepsilon$  có thể được thực hiện với sự hỗ trợ của các phần mềm tính toán khí động lực học chuyên dụng như Ansys Fluent, COMSOL, OpenFOAM, FLOW-3D... Trong đó, Ansys Fluent là phần mềm mô phỏng CFD được sử dụng rộng rãi hơn cả bởi có nhiều ưu điểm vượt trội hơn các phần mềm cùng loại khác. Phần mềm này còn có thể

khảo sát đa dạng các hiện tượng vật lý phức tạp như dòng chảy đa pha, truyền nhiệt, tương tác chất lưu-kết cấu (FSI) và cung cấp cho người sử dụng một số tính năng tiên tiến như cải thiện lưới thích nghi, cho phép điều chỉnh lưới tại những khu vực có hình dạng phức tạp. Ngoài ra, Ansys Fluent còn có một giao diện thân thiện với người dùng và cung cấp nhiều công cụ hữu dụng để xử lý và phân tích kết quả sau mô phỏng. Do đó, Ansys Fluent không chỉ được ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực công nghiệp mà còn là một công cụ đắc lực trong nghiên cứu khoa học. Vì vậy, trong bài báo này sẽ sử dụng phần mềm Ansys Fluent để nghiên cứu lực cản chính diện tác dụng lên đầu đạn.

**3. Mô hình mô phỏng số**

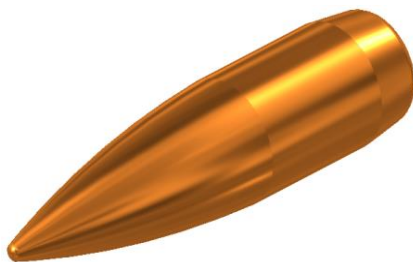
Mô hình hình học của đầu đạn M855 dùng cho khảo sát được thể hiện trên Hình 1. Các kích thước của đầu đạn được lấy từ [11]. Chiều dài tổng thể của đầu đạn là 23,06mm, đường kính phần trụ là 5,69mm, góc vát phần đuôi là 7,5°. Mũi đạn hình cung nhọn và có chiều dài là 13,44mm, phần thân hình trụ dài 6,83mm, phần đuôi dài 2,79mm.



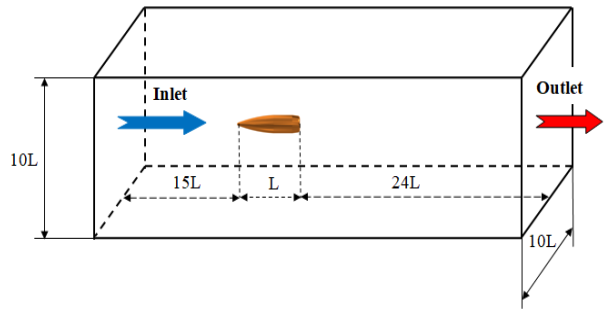
**Hình 1.** Kích thước đầu đạn 5,56x45mm M855 (các kích thước có đơn vị là mm)

Mô hình 3D của đầu đạn được xây dựng trên phần mềm CAD Inventor Professional 2021 (Hình 2) và được tích hợp vào phần mềm Ansys Fluent để tiến hành khởi tạo vùng thể tích tính toán và chia lưới phục vụ quá trình mô phỏng tiếp theo.

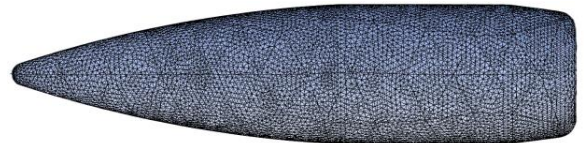
Vùng thể tích tính toán hình hộp chữ nhật với chiều dài, chiều rộng và chiều cao tương ứng là 40L, 10L và 10L. Ở đây, L là chiều dài tổng thể của đầu đạn. Vùng thể tích tính toán được khởi tạo với kích thước đủ lớn để có thể phân ảnh được đầy đủ các hiện tượng khí động học xảy ra trước mũi đạn cũng như sau đuôi đạn. Mô hình đầu đạn được đặt trên trục dọc đối xứng của vùng thể tích tính toán và cách mặt biên Inlet một khoảng là 15L (Hình 3). Để có thể phân ảnh được các hiện tượng xảy ra tại lớp biên, lưới tính toán được chia mịn nhất trên bề mặt đầu đạn (Hình 4) sau đó đến phần sát bề mặt đầu đạn và thưa hơn ở vùng gần biên tự do (Hình 5).



**Hình 2.** Mô hình 3D của đầu đạn M855



**Hình 3.** Vùng thể tích tính toán



**Hình 4.** Lưới trên bề mặt đầu đạn M855



**Hình 5.** Lưới xung quanh đầu đạn

Dòng chảy bao quanh đầu đạn được coi là dòng chảy rối và nén được với số Reynolds cao, do đó bộ giải Density-based solver được lựa chọn. Mô hình không khí được sử dụng là khí lý tưởng (Ideal gas). Mô hình nhớt được chọn là mô hình Sutherland ba hệ số. Các tham số của dòng chảy tự do là  $p_\infty = 101325 \text{ Pa}$  và  $T_\infty = 300 \text{ K}$ . Các điều kiện tính toán cho mô hình mô phỏng được trình bày trong Bảng 1. Đối với mô hình chảy rối k-ε thì lời giải được coi là hội tụ nếu các phần dư (Residuals) đạt giá trị nhỏ hơn  $10^{-3}$  [12].

**Bảng 1.** Các điều kiện tính toán cho mô hình mô phỏng

TT	Tham số	Giá trị
1	Inlet	$M = 1,47; 1,68; 2,23; 2,46; 2,62$
2	Outlet	Pressure Outlet
3	Biên tự do	No slip wall
4	Biên thành đạn	$V_x = V_y = V_z = 0$

**4. Kết quả và thảo luận**

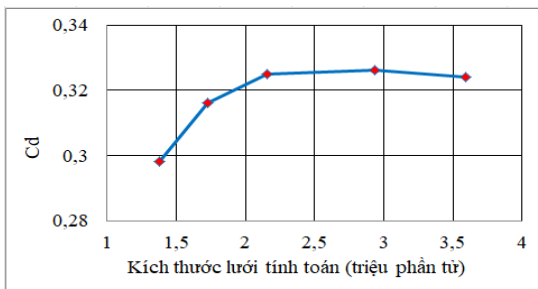
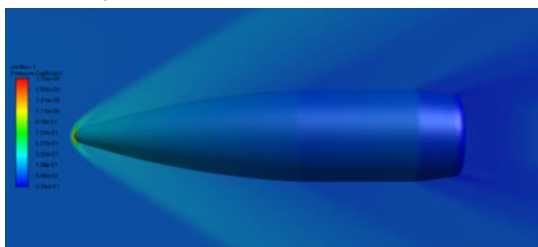
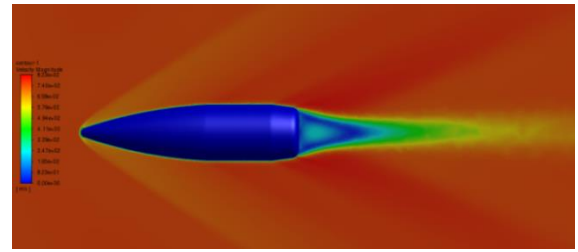
**4.1. Khảo sát ảnh hưởng của kích thước lưới tới kết quả mô phỏng**

Kết quả nhận được của các phương pháp mô phỏng số thường bị ảnh hưởng bởi kích thước lưới tính toán. Lưới càng mịn thì kết quả càng chính xác hơn, tuy nhiên, thời gian tính toán lại tăng lên. Do đó, cần tìm được kích thước lưới hợp lý cho kết quả tính toán với độ chính xác chấp nhận được và thời gian tính toán phù hợp. Cụ thể, trong bài báo này kích thước lưới được tăng từ 1,38 triệu phần tử đến 3,59 triệu phần tử. Sử dụng mô hình chảy rối k-ε và các tham số thiết lập như được trình bày ở trên để tiến hành mô phỏng trên phần mềm Ansys Fluent với tốc độ dòng chảy là Mach bằng 2,23, góc tấn bằng 0°. Hệ số lực cản chính diện ( $C_d$ ) nhận được đối với các kích thước lưới khác nhau được thể hiện trên Bảng 2.

**Bảng 2.** Hệ số lực cản chính diện theo kích thước lưới

TT	Kích thước lưới (triệu phần tử)	Hệ số lực cản chính diện (Ca)	Chênh lệch (%)
1	1,38	0,298	8,30
2	1,73	0,316	2,76
3	<b>2,16</b>	<b>0,325</b>	-
4	2,94	0,326	0,30
5	3,59	0,324	0,30

Xu hướng ảnh hưởng của kích thước lưới tới giá trị hệ số lực cản chính diện Cd được thể hiện trên Hình 6. Từ Bảng 2 và Hình 6 có thể rút ra nhận xét, kể từ kích thước lưới 2,16 triệu phần tử thì việc tăng kích thước lưới không làm thay đổi đáng kể giá trị hệ số lực cản chính diện nhận được. Do đó, tính tới yếu tố độ chính xác và thời gian tính toán thì bài báo này sẽ sử dụng lưới có kích thước 2,16 triệu phần tử để nghiên cứu các thành phần lực cản. Với kích thước lưới 2,16 triệu phần tử thì lưới trên bề mặt đầu đạn được chia mịn nhất với các phần tử có kích thước lớn nhất là 0,3mm. Kích thước các phần tử lưới vùng lân cận thân đạn và vùng gần biên tự do tăng dần theo tỷ lệ 1,1 và kích thước tối đa của các phần tử là 3,0mm. Trong trường hợp này, hệ số lực cản chính diện nhận được bằng mô phỏng là 0,325, trong khi đó hệ số lực cản chính diện được xác định bằng thực nghiệm trong [11] là 0,32. Sai số giữa giá trị hệ số lực cản nhận được bằng phương pháp mô phỏng số và giá trị hệ số lực cản nhận được bằng phương pháp thực nghiệm là 1,56%. Sai số này là chấp nhận được đối với các nghiên cứu ứng dụng kỹ thuật. Như vậy, có thể sử dụng phương pháp mô phỏng số được trình bày ở trên để nghiên cứu các thành phần lực cản tác dụng lên đầu đạn súng bộ binh trên quỹ đạo bay. Trường phân bố áp suất và vận tốc dòng chảy quanh đầu đạn được thể hiện trên Hình 7 và Hình 8. Có thể nhận thấy, áp suất đạt giá trị lớn nhất tại mũi đạn và nhỏ nhất tại vùng không gian sau đáy đạn. Chính sự chênh lệch phân bố áp suất này đã sinh ra thành phần lực cản áp suất. Ngoài ra, còn có thể quan sát thấy sự hình thành của các sóng xung kích tại mũi đạn cũng như tại những vị trí mà thân đạn có sự thay đổi hình dạng đột ngột.

**Hình 6.** Xu hướng ảnh hưởng của kích thước lưới tới giá trị hệ số lực cản chính diện (Cd)**Hình 7.** Trường phân bố áp suất quanh đầu đạn**Hình 8.** Phân bố vận tốc dòng chảy quanh đầu đạn

#### 4.2. Khảo sát tỷ trọng của các thành phần lực cản chính diện tác dụng lên đầu đạn M855 tiêu chuẩn với tốc độ dòng chảy khác nhau

Việc chia lực cản chính diện tác dụng lên đầu đạn trong quá trình bay trong không khí thành những phần có bản chất vật lý khác nhau nhằm mục đích tìm ra những giải pháp phù hợp nhất để giảm các thành phần lực cản này. Để làm giảm lực cản ma sát cần gia công bề mặt đầu đạn nhẵn hơn hoặc có thể sơn bề mặt đầu đạn. Để giảm lực cản sóng và lực cản đáy cần tối ưu hình dạng mũi đạn và đuôi đạn. Mỗi giải pháp được áp dụng đều có thể ảnh hưởng tới các chỉ tiêu chiến-kỹ thuật và kinh tế của đạn. Do đó, để đưa ra được những giải pháp hiệu quả thì cần phải biết được bản chất và tỷ trọng đóng góp của mỗi thành phần trong tổng giá trị lực cản. Đầu đạn súng bộ binh chuyên động với tốc độ trên âm trên toàn bộ quỹ đạo bay. Do đó, để đánh giá tỷ trọng của các thành phần lực cản ở các tốc độ chuyên động khác nhau của đầu đạn, tác giả tiến hành mô phỏng dòng chảy quanh đầu đạn với các số Mach đặc trưng của đầu đạn M855 là 1,47; 1,68; 2,23; 2,46 và 2,62 [11]. Giá trị nhận được của các thành phần lực cản sóng, lực cản ma sát và lực cản đáy được thể hiện trong Bảng 3.

**Bảng 3.** Các thành phần lực cản chính diện

TT	Số Mach	Lực cản sóng (N)	Lực cản ma sát (N)	Lực cản đáy (N)	Tổng lực cản (N)
1	1,47	0,705	0,177	0,620	1,502
2	1,68	0,870	0,204	0,746	1,820
3	2,23	1,327	0,296	1,058	2,681
4	2,46	1,625	0,505	1,091	3,221
5	2,62	1,759	0,541	1,159	3,459

Tỷ trọng của các thành phần lực cản chính diện được thể hiện trong Bảng 4.

**Bảng 4.** Tỷ trọng của các thành phần lực cản chính diện

TT	Số Mach	Lực cản sóng (%)	Lực cản ma sát (%)	Lực cản đáy (%)
1	1,47	46,93	11,78	41,27
2	1,68	47,80	11,20	40,98
3	2,23	49,49	11,04	39,46
4	2,46	50,45	15,67	33,87
5	2,62	50,85	15,64	33,50

Từ kết quả nhận được có thể thấy, xu hướng chung: lực cản ma sát chiếm tỷ trọng nhỏ nhất (từ 11,04% tới 15,67%), lực cản sóng chiếm tỷ trọng lớn nhất (từ 46,93% tới 50,85%), lực cản đáy chiếm tỷ trọng đáng kể trong các thành phần lực cản (từ 33,50% đến trên 41,27%). Ngoài ra, tỷ trọng của các thành phần lực cản còn thay đổi theo tốc

độ chuyển động của đầu đạn. Số Mach càng lớn, nghĩa là tốc độ chuyển động của đầu đạn càng cao thì tỷ trọng của lực cản ma sát và lực cản sóng càng tăng, tỷ trọng của lực cản đáy càng giảm.

Do đó, đối với các loại đầu đạn có hình dạng tương tự như đầu đạn M855 (gồm mũi đạn hình cung nhọn, thân đạn hình trụ và đuôi đạn hình côn), để giảm tổng lực cản chính diện tác dụng lên đầu đạn thì nhất thiết cần áp dụng các biện pháp nhằm làm giảm thành phần lực cản sóng và thành phần lực cản đáy.

#### 4.3. Khảo sát tỷ trọng của các thành phần lực cản chính diện tác dụng lên đầu đạn M855 cải tiến

Như đã nhận xét ở trên, trong số các thành phần lực cản chính diện thì thành phần lực cản sóng và thành phần lực cản đáy chiếm tỷ trọng lớn nhất. Do đó, để giảm tổng lực cản chính diện tác dụng lên đầu đạn, sẽ tiến hành cải tiến đầu đạn M855 tiêu chuẩn để làm giảm thành phần lực cản sóng hoặc thành phần lực cản đáy. Theo [1], lực cản sóng giảm khi tăng chiều dài phần mũi đầu đạn, còn lực cản đáy giảm khi tăng chiều dài và thay đổi góc vát phần đuôi đạn. Tuy nhiên, việc tăng chiều dài phần mũi đạn và đuôi đạn vẫn phải đáp ứng điều kiện là phần thân đạn hình trụ có chiều dài ít nhất là 1D (D là đường kính phần trụ, đối với đầu đạn M855 thì  $D = 5,69\text{mm}$ ) để đảm bảo đầu đạn chuyển động ổn định trong nòng súng [13]. Trong trường hợp đầu đạn M855 tiêu chuẩn, phần thân hình trụ có chiều dài là 6,83mm, do đó, vẫn có thể tăng chiều dài phần mũi đạn hoặc phần đuôi đạn để giảm thành phần lực cản sóng hoặc thành phần lực cản đáy tương ứng. Trong bài báo này sẽ khảo sát các thành phần lực cản chính diện tác dụng lên đầu đạn M855 với hai phương án cải tiến: phương án thứ nhất là tăng chiều dài phần mũi đạn nhưng vẫn đảm bảo chiều dài phần trụ là 1D, chiều dài phần đuôi đạn và các tham số khác của đầu đạn giữ nguyên không đổi (PA1); phương án thứ hai là tăng chiều dài phần đuôi đạn nhưng vẫn đảm bảo chiều dài phần trụ là 1D, chiều dài phần mũi đạn và các tham số khác của đầu đạn giữ nguyên không đổi (PA2). Tiến hành mô phỏng theo trình tự các bước đã được trình bày và kiểm chứng ở các phần trước với số Mach là 2,23. Kết quả mô phỏng và tỷ trọng các thành phần lực cản chính diện tác dụng lên các phương án đầu đạn M855 được trình bày trong Bảng 5 và Bảng 6.

**Bảng 5.** Các thành phần lực cản chính diện tác dụng lên các phương án đầu đạn M855 ở số Mach 2,23

TT	Đầu đạn M855	Lực cản sóng (N)	Lực cản ma sát (N)	Lực cản đáy (N)	Tổng lực cản (N)
1	Tiêu chuẩn	1,327	0,296	1,058	2,681
2	PA1	1,118	0,295	1,059	2,472
3	PA2	1,367	0,290	0,892	2,549

**Bảng 6.** Tỷ trọng các thành phần lực cản chính diện tác dụng lên các phương án đầu đạn M855 ở số Mach 2,23

TT	Đầu đạn M855	Lực cản sóng (%)	Lực cản ma sát (%)	Lực cản đáy (%)
1	Tiêu chuẩn	49,49	11,04	39,46
2	PA1	45,23	11,93	42,84
3	PA2	53,63	11,38	34,99

Có thể thấy, đối với PA1 (tăng chiều dài phần mũi đạn, giữ nguyên chiều dài đuôi đạn), so với đầu đạn tiêu chuẩn thì lực cản ma sát và lực cản đáy hầu như không thay đổi (tương ứng là 0,295N so với 0,296N và 1,059N so với 1,058N), tuy nhiên, lực cản sóng giảm đáng kể (từ 1,327N xuống 1,118N, nghĩa là giảm 15,75%). Kết quả là tỷ trọng của lực cản sóng giảm từ 49,49% xuống 45,23%, tỷ trọng của lực cản ma sát và lực cản đáy đều tăng, tuy nhiên, tỷ trọng của lực cản ma sát tăng không đáng kể (từ 11,04% lên 11,93%). Với PA1, tổng lực cản chính diện giảm từ 2,681N xuống 2,472N (giảm 7,8%).

Đối với PA2 (tăng chiều dài phần đuôi đạn, giữ nguyên chiều dài phần mũi đạn), so với đầu đạn tiêu chuẩn thì lực cản ma sát cũng không thay đổi đáng kể (0,290N so với 0,296N), lực cản sóng tăng từ 1,327N tới 1,367N (tăng 3,01%), lực cản đáy giảm đáng kể từ 1,058N xuống 0,892N (giảm 15,68%). Kết quả là tỷ trọng của lực cản ma sát tăng không đáng kể từ 11,04% lên 11,38%, lực cản sóng tăng từ 49,49% lên 53,63% còn lực cản đáy giảm từ 39,46% xuống 34,99%. Với PA2 thì tổng lực cản chính diện giảm từ 2,681N xuống 2,549N (giảm 4,9%).

Từ kết quả khảo sát các thành phần lực cản chính diện tác dụng lên hai phương án cải tiến đầu đạn M855 có thể rút ra nhận xét rằng, thành phần lực cản ma sát thay đổi không đáng kể trong cả hai phương án cải tiến đầu đạn. Khi tăng chiều dài phần mũi đạn (PA1) thì thành phần lực cản sóng thay đổi đáng kể (15,75%) trong khi thành phần lực cản đáy hầu như không thay đổi, tổng lực cản chính diện giảm 7,8%. Còn trong trường hợp tăng chiều dài phần đuôi đạn (PA2) thì lực cản đáy cũng giảm đáng kể (15,68%) nhưng lực cản sóng lại tăng lên 3,01%, hệ quả là tổng lực cản chính diện chỉ giảm 4,9%. Ngoài ra, việc tăng chiều dài phần đuôi đạn có thể ảnh hưởng tiêu cực tới ổn định của đầu đạn trên đường bay [1]. Do đó, để giảm tổng lực cản chính diện tác dụng lên đầu đạn M855 thì việc sử dụng phương án tăng chiều dài phần mũi đạn là hợp lý hơn cả.

## 5. Kết luận

Bài báo đã trình bày phương pháp nghiên cứu các thành phần lực cản chính diện tác dụng lên đầu đạn súng bộ binh bằng phương pháp mô phỏng số CFD trên phần mềm Ansys Fluent với mô hình chảy rối k-ε. Mô hình mô phỏng được kiểm chứng bằng cách so sánh hệ số lực cản chính diện nhận được bằng phương pháp mô phỏng với hệ số lực cản chính diện nhận được bằng đo đạc thực nghiệm. Kết quả so sánh cho thấy, chênh lệch giữa các hệ số lực cản chính diện nhận được bằng hai phương pháp chỉ là 1,56%. Khảo sát tỷ trọng các thành phần cho thấy lực cản sóng và lực cản đáy chiếm phần lớn tổng giá trị lực cản chính diện. Lực cản sóng chiếm khoảng 50%, lực cản đáy chiếm khoảng 35% tới 45% và lực cản ma sát chiếm khoảng 10% tới 15% tổng lực cản chính diện. Để tăng tầm bắn của đầu đạn thì cần đặc biệt chú ý áp dụng các biện pháp nhằm giảm các thành phần lực cản sóng và lực cản đáy. Đối với đầu đạn M855, phương án giảm thành phần lực cản sóng bằng cách tăng chiều dài phần mũi đạn có thể giảm tổng lực cản chính diện khoảng 7,8%, trong khi đó phương án

giảm thành phần lực cản đáy bằng cách tăng chiều dài phần đuôi đạn có thể giảm tổng lực cản chính diện khoảng 4,9% ở số Mach 2,23. Phương án giảm thành phần lực cản sóng là hợp lý hơn cả để giảm tổng lực cản chính diện của đầu đạn M855. Phương pháp và các kết quả nghiên cứu được trình bày trong bài báo có thể được áp dụng trong quá trình cải tiến tăng tầm bắn cho đầu đạn M855 nói riêng cũng như trong quá trình thiết kế, chế tạo và cải tiến các loại đầu đạn khác có hình dạng tương tự nói chung.

### TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] R. McCoy, *Modern Exterior Ballistics: The Launch and Flight Dynamics of Symmetric Projectiles*, 2nd edition. Schiffer Military History, 2009.
- [2] V. Briey, “*Small-Caliber Exterior Ballistics: Aerodynamic Coefficients Determination by CFD*”, PhD Dissertation, Royal Military Academy, 2021.
- [3] H. Demir, M. Cimen, O. Yilman, and E. Tekin, “Computational fluid dynamics analysis of drag reduction in bullet via geometric modifications”, *Bayburt University Journal of Science*, vol. 7, no. 1, pp. 47-56, 2024. <https://doi.org/10.55117/bufbd.1493857>.
- [4] B. Hao, Q. Jiang, C. Xu, and L. Liu, “Aerodynamic characterization of bullet heads with different arcuate curves”, *Journal of Applied Fluid Mechanics*, vol. 17, no. 5, pp. 1015-1026, 2024. <https://doi.org/10.47176/jafm.17.05.2333>
- [5] A. Khan, I. Shah, S. Aziz, M. Waqas, U. Zaman, and D. Jung, “Numerical and experimental analysis of drag and lift forces on a bullet head”, *Aerospace*, vol. 9, no. 12, pp. 1-16, 2022. <https://doi.org/10.3390/aerospace9120816>.
- [6] E. Ntantis *et al.*, “Numerical study on a supersonic flow around a bullet”, *WSEAS transactions on fluid mechanics*, vol. 18, 2023. DOI: 10.37394/232013.2023.18.1
- [7] V. M. Do, T. H. Tran, and V. T. Pham, “*Study of the aerodynamic damping characteristics of a spike-nosed projectile using numerical simulation method*”, Selected Papers of Young Researchers’ Conference – 2021, Le Quy Don Technical University, 2021.
- [8] ANSYS, *ANSYS FLUENT 12.1 in Workbench User’s Guide*, ANSYS, Inc., 2009.
- [9] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, 2nd edition*. Pearson Education Limited, 2007.
- [10] B. Launder and D. Spalding, “The numerical computation of turbulent flows”, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, vol. 3, no. 2, pp. 269-289, 1974.
- [11] S. Sifton and B. Howell, “*Aerodynamic and flight dynamic characteristics of 5.56-mm ammunition: M855*”, Army Research Laboratory, USA, Technical Report, 2010.
- [12] S. Salunke, S. Shinde, T. Gholap, and D. Sahoo, “Comparative computational analysis of NATO 5.56mm, APM2 7.62mm and AK-47 7.82mm bullet moving at Mach 2.0 in close vicinity to the wall”, *FME Transactions*, vol. 51, pp. 81-89, 2023. <https://doi.org/10.5937/fme2301081s>.
- [13] G. A. Danilin, V. P. Ogorodnikov, and A. B. Davolosin, *Fundamentals of Designing Small Arms Cartridges*, Baltic State Technical University, Saint Petersburg, 2005.