

NGHIÊN CỨU PHÂN TÍCH TẦN SỐ TỰ NHIÊN VÀ CÁC DẠNG DAO ĐỘNG TƯƠNG ỨNG CỦA ỐNG PHỎNG THPB-6000

RESEARCH ON THE ANALYSIS OF NATURAL FREQUENCIES AND CORRESPONDING VIBRATION MODES OF THE THPB-6000 LAUNCH TUBE

TS. Nguyễn Quang Mạnh

Viện Công nghệ, Tổng cục Công nghiệp quốc phòng

Email: manhmin@gmail.com

TÓM TẮT

Bài báo này trình bày nghiên cứu xác định tần số riêng và các dạng dao động riêng của ống phóng THPB-6000 bằng phương pháp phần tử hữu hạn (PTHH). Trong quá trình vận chuyển trên đất liền, khi ở trên biển, khi nạp bom và trong quá trình bắn, ống phóng chịu tác động của nhiều tải trọng khác nhau (rung xóc khi vận chuyển bằng các phương tiện, động cơ tàu, sóng biển, luồng phụt và phản lực từ bom phản lực), những tải trọng này tạo ra các kích thích động lực học phức tạp. Việc xác định chính xác các đặc trưng động lực học bản thân của ống phóng là yêu cầu bắt buộc để đánh giá phản ứng của kết cấu trước các kích thích của tải trọng, từ đó giảm nguy cơ cộng hưởng có hại, đảm bảo tuổi thọ ống phóng và sự chính xác của phát bắn. Khác với các phương pháp giải tích truyền thống thường đơn giản hóa kết cấu thành bài toán dầm 1D hoặc 2D, nghiên cứu này xây dựng mô hình 3D của ống phóng và tiến hành phân tích trên mô đun Modal của phần mềm ANSYS Mechanical. Kết quả của nghiên cứu không những cung cấp thông tin quan trọng về động lực học cho các kỹ sư về thiết kế hiện tại mà còn làm cơ sở cung cấp dữ liệu đầu vào bắt buộc cho các bài toán tối ưu hóa và phân tích động lực học thoáng qua (transient) tiếp theo.

Từ khóa: Tần số riêng; Dao động tự do; Phần tử hữu hạn; Mô hình 3D.

ABSTRACT

This paper presents a study on determining the natural frequencies and corresponding mode shapes of the THPB-6000 launch tube using the Finite Element Method (FEM). During land transportation, maritime operation, bomb loading, and firing processes, the launch tube is subjected to various types of loads, including transportation-induced vibrations and shocks, ship engine excitations, sea-wave effects, exhaust jet flow, and the reaction forces generated by rocket-assisted bombs. These loads produce complex dynamic excitations acting on the structure. Therefore, the accurate determination of the launch tube's inherent dynamic characteristics is an essential prerequisite for evaluating its structural response to external excitations, reducing the risk of harmful resonance, ensuring structural durability, and maintaining firing accuracy. Unlike conventional analytical approaches, which often simplify the structure into one-dimensional or two-dimensional beam models, this study develops a detailed three-dimensional (3D) model of the launch tube and performs modal analysis using the ANSYS Mechanical software package. The results provide valuable dynamic characteristics for current engineering design and serve as mandatory input data for subsequent structural optimization studies and transient dynamic analyses.

Keywords: Natural frequency; Free vibration; Finite element; 3D Model.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Các hệ thống phản lực phóng loạt đóng vai trò hỏa lực chế áp quan trọng trong tác chiến hiện đại. Trong đó, ống phóng là chi tiết cốt lõi, vừa đóng vai trò dẫn hướng tĩnh vừa phải chịu các tải trọng động lực học cực lớn trong khoảng thời gian rất ngắn khi đạn hoạt động. Sự tương tác phức tạp giữa áp suất khí thuốc, ma sát, nhiệt độ luồng phụt và phản lực đẩy làm cho ống phóng dao động mạnh. Nếu tần số kích thích của quá trình này trùng hoặc gần với các tần số tự nhiên của ống phóng, hiện tượng cộng hưởng sẽ xảy ra. Điều này không chỉ gây ra sai lệch lớn về góc tầm và góc hướng ở thời điểm đạn ra khỏi ống phóng (làm giảm độ chụm) mà còn có thể gây phá hủy mối hoặc biến dạng vĩnh viễn kết cấu. Do đó, bài toán phân tích dao động riêng nhằm tìm ra tần số tự nhiên và hình dáng dao động là bước kiểm nghiệm bắt buộc trong quy trình thiết kế.

Về mặt tổng quan, bài toán dao động nòng pháo và ống phóng đã thu hút nhiều sự quan tâm của giới nghiên cứu khoa học quân sự. Các nghiên cứu truyền thống thường tiếp cận ống phóng dưới dạng mô hình dầm Euler-Bernoulli hoặc Timoshenko chịu tải trọng di động (moving load) [4]. Tuy nhiên, cách tiếp cận giải tích bộc lộ nhiều hạn chế khi kết cấu thực tế có hình dáng phức tạp (có rãnh xoắn, độ dày thành ống thay đổi, hoặc các điểm ngàm kẹp không đối xứng,...).

Để khắc phục, phương pháp phần tử hữu hạn (FEM) đã được áp dụng rộng rãi. Tại Việt Nam, nhiều công trình nghiên cứu đã ứng dụng FEM để tính toán động lực học cơ cấu phóng. Mặc dù vậy, nhiều nghiên cứu vẫn đang giới hạn ở việc mô phỏng 2D đơn giản hóa hoặc gán các điều kiện biên lý tưởng. Việc bỏ qua các chi tiết hình học 3D hoặc không xét đến đặc thù ngàm kẹp thực tế của ống phóng dẫn đến sai số lớn so với thực nghiệm.

Nhằm giải quyết khoảng trống này, bài báo tập trung vào việc mô phỏng toàn diện kết cấu ống phóng dạng 3D. Sử dụng mô đun Modal/ANSYS Mechanical, nghiên cứu tiến hành giải bài toán trị riêng để xác định chính xác phổ tần số tự nhiên và các dạng dao động đặc trưng. Phương pháp tiếp cận 3D cho phép đánh giá chi tiết biến dạng cục bộ tại các vị trí ngàm kẹp, điều mà mô hình 1D hay 2D không thể hiện được, qua đó tạo cơ sở vững chắc cho việc cải tiến thiết kế và các phân tích động lực học tiếp theo.

2. TẦN SỐ RIÊNG VÀ DAO ĐỘNG RIÊNG CỦA ỐNG PHÓNG

2.1. Cơ sở lý thuyết của bài toán dao động riêng

Để đánh giá chính xác các đặc trưng động lực học của kết cấu ống phóng có hình dáng thực tế phức tạp, phương pháp phần tử hữu hạn mô hình hóa 3D được áp dụng. Phương trình vi phân chuyển động tổng quát của một hệ cơ học nhiều bậc tự do được biểu diễn qua phương trình ma trận sau:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = F(t) \quad (1)$$

Trong đó:

$[M]$, $[C]$, $[K]$ lần lượt là ma trận khối lượng, ma trận giảm chấn và ma trận độ cứng tổng thể của hệ.

$\{\ddot{u}\}$, $\{\dot{u}\}$, $\{u\}$ lần lượt là véc-tơ gia tốc, vận tốc và chuyển vị nút trong không gian 3D, với mỗi nút bao gồm các thành phần chuyển vị tịnh tiến (u_x , u_y , u_z).

$\{F(t)\}$ là véc-tơ tải trọng kích thích theo thời gian.

Mục tiêu của phân tích Modal là tìm ra các tần số tự nhiên và hình dáng dao động kết cấu. Do đó, bài toán được xét trong điều kiện

dao động tự do không chịu tác dụng của ngoại lực ($\{F(t)\} = 0$) và bỏ qua ảnh hưởng của giảm chấn ($[C] = 0$). Do lực cản trong các kết cấu thép hợp kim có giá trị rất nhỏ và không làm thay đổi đáng kể giá trị tần số tự nhiên, việc bỏ qua ma trận giảm chấn là hợp lý và tiêu chuẩn trong phân tích trị riêng. Khi đó, phương trình vi phân chuyển động rút gọn thành:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad (2)$$

Giả sử nghiệm của hệ phương trình tuyến tính này là một dao động điều hòa có dạng:

$$\{u\} = \{\phi\} \cdot \sin(\omega t + \theta) \quad (3)$$

Thay các biểu thức của $\{u\}$ và $\{\ddot{u}\}$ vào phương trình (2), ta nhận được phương trình đặc trưng (bài toán trị riêng):

$$([K] - \omega^2[M])\{\phi\} = 0 \quad (4)$$

Để phương trình trên có nghiệm không tầm thường ($\{\phi\} \neq 0$), định thức của ma trận hệ số phải bằng không:

$$\det([K] - \omega^2[M]) = 0 \quad (5)$$

Giải phương trình định thức bậc n (5) (n là số bậc tự do của hệ thống), ta được n nghiệm ω_i^2 , trong đó ω_i là các tần số góc tự nhiên của ống phóng (rad/s).

Tần số tự nhiên theo đơn vị Hertz (Hz) được xác định bằng biểu thức:

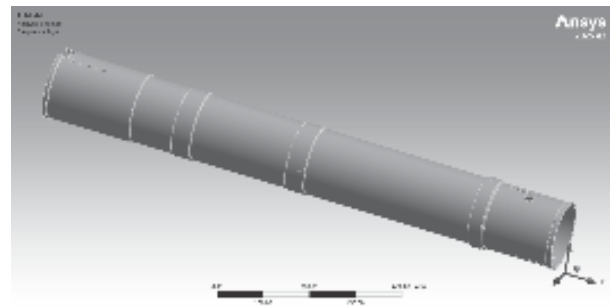
$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (6)$$

Với mỗi giá trị tần số ω_i thay vào bài toán trị riêng, ta xác định được một véc-tơ đặc trưng ϕ_i tương ứng. Véc-tơ này mô tả dạng dao

động riêng, thể hiện hình dáng biến dạng không gian 3D của kết cấu ống phóng tại tần số f_i .

2.2. Đặc trưng hình học và vật liệu

Khác với mô hình dầm 1D, kết cấu ống phóng THPB-6000 được xây dựng hoàn chỉnh trong môi trường CAD 3D là một ống trụ có thành mỏng có chiều dài $L = 1830\text{mm}$, đường kính trong $D = 213\text{mm}$, chiều dày thành ống phần mỏng nhất là 4mm (Hình 1).



Hình 1. Mô hình 3D ống phóng bom phản lực.

Vật liệu chế tạo ống phóng là thép 40X ГОСТ 4543-16 có cơ lý tính được cho trong bảng 1. Để đảm bảo tính chính xác của bài toán phân tích Modal, vật liệu được giả thiết là đàn hồi tuyến tính, đẳng hướng và đồng nhất.

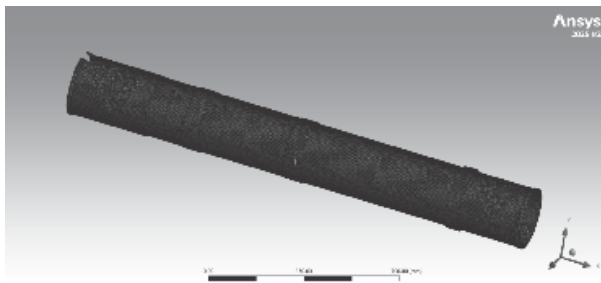
Bảng 1. Cơ lý tính thép 40X ГОСТ 4543-16.

Mác thép	Cơ lý tính			
	Giới hạn chảy, MPa	Mật độ, kg/m ³	Mô-đun đàn hồi, Mpa	Hệ số Poisson
40X	785	7820	$2 \cdot 10^{11}$	0,3

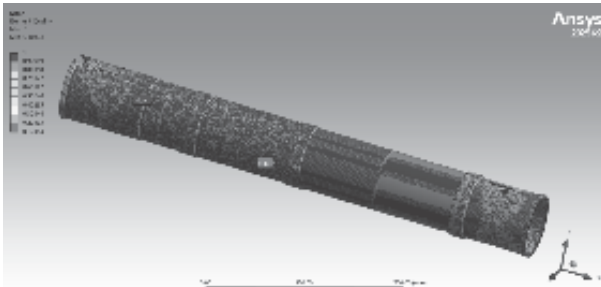
2.3. Thiết lập mô hình Phần tử hữu hạn và Điều kiện biên

Chia lưới (Meshing): Ta thiết lập Body Sizing với kích thước phần tử 5mm , với phần

tử yêu cầu là Quadratic với 819202 nút và 441561 phần tử (Hình 2). Chất lượng lưới được kiểm tra bằng chất lượng phần tử. Với mức 1 là tốt nhất và 0 là kém nhất. Đối với bài toán Modal yêu cầu chất lượng thấp nhất là 0.05. Đối với mô hình của chúng ta, chất lượng thấp nhất là 0,104. Chất lượng lưới như vậy là đảm bảo (Hình 3).



Hình 2. Chia lưới mô hình

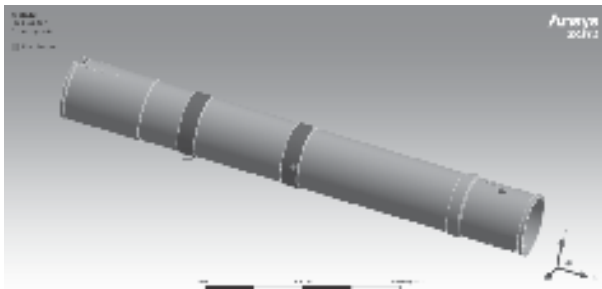


Hình 3. Chất lượng phần tử lưới

Để đảm bảo độ tin cậy của bài báo, một khảo sát hội tụ lưới (Mesh Convergence Study) được thực hiện. Tần số tự nhiên ở Mode 1 được theo dõi khi tăng dần số lượng phần tử. Kết quả cho thấy khi số lượng phần tử vượt qua ngưỡng 700.000 phần tử, sự thay đổi của tần số Mode 1 nhỏ hơn 1%, khẳng định nghiệm lưới đã hội tụ và không còn phụ thuộc vào kích thước rời rạc hóa.

Thiết lập điều kiện biên: Các đặc trưng dao động phụ thuộc rất lớn vào cách thức ngàm kẹp. Ống phóng thực tế được liên kết bằng vòng đỡ ống phóng. Trong mô hình phần tử hữu hạn,

ta cài đặt ràng buộc Fixed supports như hình 4.



Hình 4. Thiết lập điều kiện biên của mô hình

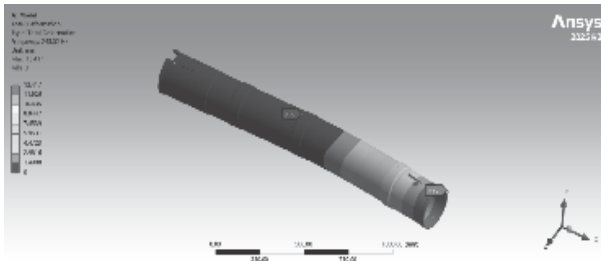
3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

Mười tần số riêng và dạng dao động đầu tiên của ống phóng và tỉ lệ khối lượng hiệu dụng của kết cấu tham gia vào dao động tương ứng theo các phương được trích xuất trong bảng 2:

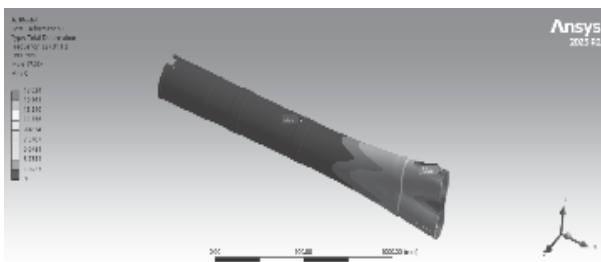
Bảng 2. Kết quả tần số tự nhiên và khối lượng hiệu dụng theo các phương x, y, z của ống phóng ở 10 mode đầu.

Mode	Tần số tự nhiên (Hz)	Phương X (Đọc trực) (%)	Phương Y (Hướng kính) (%)	Phương Z (Hướng kính) (%)
1	245.0	0.00	0.12	27.73
2	245.3	0.00	27.78	0.12
3	327.3	0.00	0.00	0.00
4	328.1	0.00	0.00	0.00
5	481.8	0.00	0.00	0.05
6	484.2	0.00	0.18	0.00
7	554.6	0.00	0.00	0.00
8	557.3	0.00	0.00	0.00
9	625.0	0.00	0.00	24.30
10	626.2	0.00	24.20	0.00
Tổng cộng		0.00	52.28	52.21

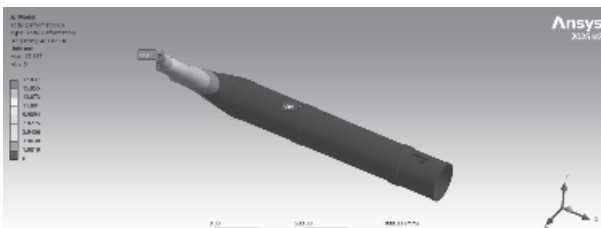
Để phân tích rõ hơn ứng xử của kết cấu trước kích thích, ta xét các chế độ đại diện cho các cặp lặp (Hình 5, 6, 7, 8, 9).



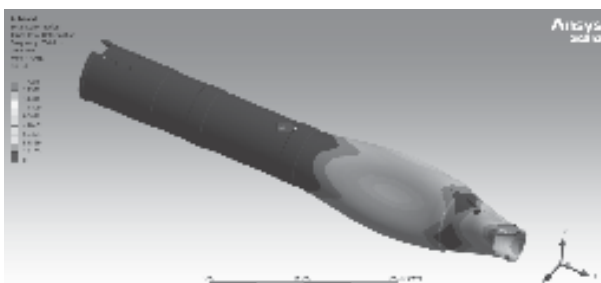
Hình 5. Biến dạng của ống phóng ở chế độ 1 ứng với tần số riêng 1.



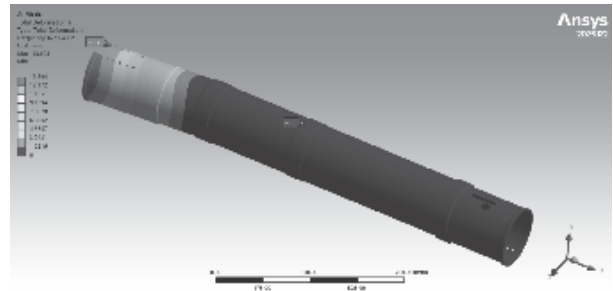
Hình 6. Biến dạng của ống phóng ở chế độ 3 ứng với tần số riêng 3.



Hình 7. Biến dạng của ống phóng ở chế độ 5 ứng với tần số riêng 5.



Hình 8. Biến dạng của ống phóng ở chế độ 7 ứng với tần số riêng 7.



Hình 9. Biến dạng của ống phóng ở chế độ 9 ứng với tần số riêng 9.

* Nhận xét:

- Các tần số tự nhiên của ống phóng là khá cao, thấp nhất $f_1 = 245,03$ Hz, nằm cách biệt rất xa dải tần số kích thích nguy hiểm mang năng lượng lớn của động cơ đạn bom phản lực (thường < 50 Hz) qua đó giúp loại trừ được nguy cơ xảy ra hiện tượng cộng hưởng tổng thể.

- Xuất hiện hiện tượng lặp chế độ (Mode 1 và 2, Mode 3 và 4, Mode 5 và 6, Mode 7 và 8, Mode 9 và 10). Điều này phản ánh tính đối xứng trục (trục X) của ống phóng. Tuy nhiên, giữa các cặp Mode lặp này có sự khác biệt do một số lỗ, cắt làm mất tính đối xứng toàn phần.

- Khối lượng tham gia tịnh tiến chủ yếu tập trung vào các mode dao động uốn. Cụ thể, cặp dao động uốn bậc 1 (Mode 1 và 2) có khối lượng hiệu dụng xấp xỉ 28% tổng khối lượng hiệu dụng cho mỗi phương (Y và Z). Tương tự, cặp dao động uốn bậc 2 (Mode 9 và 10) huy động khoảng 24% khối lượng. Tổng cộng, chỉ với 4 mode này, hơn 52% khối lượng hệ thống đã tham gia vào dao động hướng kính. Điều này chứng minh kết cấu rất nhạy cảm với các lực kích thích theo phương ngang (chẳng hạn như lực va đập của đạn vào thành nòng do sai số chế tạo, hoặc lực cản gió ngang).

- Tại các Mode từ 3 đến 8 (thuộc dải tần )

327 Hz đến 557 Hz), tỷ lệ khối lượng tham gia theo cả 3 phương X, Y, Z đều xấp xỉ 0.00%. Kết quả này hoàn toàn phù hợp với lý thuyết đàn hồi: Đây là các dạng dao động móp méo cục bộ trên thành ống (biến dạng tiết diện, nếp gấp). Tại các mode này, sự phình ra ở một phía của thành ống được triệt tiêu hoàn toàn bởi sự xẹp vào ở phía đối diện, dẫn đến trọng tâm của toàn bộ cụm ống phóng không bị dịch chuyển tịnh tiến.

- Tỷ lệ tham gia khối lượng theo phương X ở cả 10 mode đầu tiên đều bằng 0.00%. Trong điều kiện làm việc thực tế, nguồn kích động mang năng lượng lớn nhất là lực đẩy phản lực của động cơ đạn, tác dụng hoàn toàn theo phương X. Việc khối lượng tham gia phương X bằng 0 ở dải tần số thấp (10 tần số đầu) đồng nghĩa với việc lực đẩy khổng lồ của động cơ sẽ ít gây ra dao động dọc trục ống phóng.

- Sự phân tách độc lập giữa phương của lực kích thích chính (phương dọc trục X) và phương dao động nhạy cảm nhất của kết cấu (phương hướng kính Y, Z) cho thấy tính an toàn của thiết kế. Lực đẩy dọc trục của đạn sẽ không thể kích hoạt trực tiếp các dao động uốn hay phình xẹp tại miệng ống, giúp loại trừ phần lớn nguy cơ cộng hưởng tổng thể trong quá trình gia tốc, qua đó đảm bảo sự ổn định cho quỹ đạo đạn.

4. KẾT LUẬN

Nghiên cứu đã thực hiện tính toán và phân tích chuyên sâu đặc trưng động lực học riêng của kết cấu ống phóng THPB-6000 bằng phương pháp phân tử hữu hạn không gian 3D trên nền tảng phần mềm ANSYS Mechanical.

Một số kết quả chính đạt được của nghiên cứu:

- Về phương pháp luận: Việc chuyển đổi từ mô hình dầm giản lược 1D truyền thống

sang mô hình khối không gian 3D bám sát thực tế ngàm kẹp đã mang lại độ chính xác cao. Phương pháp này cho phép nhận diện toàn diện không chỉ các dao động uốn vĩ mô mà cả các dạng dao động vỏ đặc thù (phình elip tiết diện ở dải tần > 327 Hz, uốn nếp nhiều thùy ở dải tần > 481 Hz) vốn ảnh hưởng trực tiếp đến khe hở động học giữa đạn và nòng.

- Về đặc trưng dao động bản thân: Kết cấu có tần số tự nhiên bậc thấp nhất là 245,03 Hz. Đặc tính đối xứng trục hình học của ống phóng được phản ánh chính xác thông qua sự xuất hiện của các cặp mode dao động lặp dính sát nhau. Biên độ biến dạng tổng tổng hợp đạt giá trị cực đại tập trung tại mặt miệng đuôi ống phóng, giảm dần và triệt tiêu tại vùng đầu ống nhờ cơ cấu vòng đỡ ống phóng.

- Về tính an toàn động lực học và độ cứng vững: Phân tích hệ số tham gia khối lượng hiệu dụng đã chứng minh kết cấu có khả năng triệt tiêu kích động dọc trục tham gia khối lượng ở cả 10 mode đầu. Lực đẩy dọc nòng của động cơ đạn phản lực không thể kích hoạt các mode uốn ngang nguy hiểm. Kết hợp với việc tần số cơ bản 245,03 Hz nằm ngoài dải tần kích thích năng lượng cao của quá trình bắn, thiết kế kết cấu sử dụng vật liệu thép hợp kim 40X đạt độ cứng vững và đảm bảo độ an toàn chống hiện tượng cộng hưởng.

Toàn bộ dữ liệu về ma trận độ cứng, ma trận khối lượng và phổ tần số riêng được thiết lập trong nghiên cứu này là cơ sở đầu vào bắt buộc và tin cậy để nghiên cứu các bài toán động lực học thoáng qua (Transient Structural Analysis). Bước tiếp theo có thể tập trung tính toán mô phỏng quá trình tương tác thực tế giữa lực ma sát của bom, áp suất luồng phụt biến thiên theo thời gian trong thời gian đạn di chuyển trong ống phóng nhằm tối ưu hóa khối lượng kết cấu ống phóng và chế độ bắn. ❖

Ngày nhận bài: 08/6/2026

Ngày phản biện: 17/6/2026

Tài liệu tham khảo:

- [1]. Nguyễn Thái Dũng, “*Thiết kế hệ thống pháo phản lực bắn loạt*”. NXB. Quân đội nhân dân, Hà Nội, 2019.
- [2]. Phạm Huy Chương, “*Động lực học vũ khí tự động*”. Học viện Kỹ thuật quân sự, Hà Nội, 2022.
- [3]. Đào Văn Đoan, Mai Văn An, “*Nghiên cứu bài toán dao động nóng súng pháo chịu tác động của đầu đạn chuyển động trong nòng*”. Tạp chí Khoa học và Công nghệ Trường Đại học Công nghiệp Hà Nội, Tập 60, số 11, Hà Nội, 2024.
- [4]. Đào Duy Việt “*Nghiên cứu thiết kế, chế tạo tổ hợp phóng bom chống ngầm có tính năng tương đương tổ hợp RBU-6000 của Liên bang Nga*”. Thuyết minh đề tài cấp Nhà nước, Hà Nội, 2024.
- [5]. Đỗ Thành Trung, “*ANSYS – Phân tích ứng suất và biến dạng*”. NXB. Đại học Quốc gia TP. Hồ Chí Minh, TP. Hồ Chí Minh, 2013.