

Nghiên cứu giải pháp tách tầng thiết bị bay bằng thuốc hỏa thuật

Hoàng Thế Dũng, Nguyễn Khánh Chính, Bùi Đình Tân*

Viện Tên lửa, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, Số 17 Hoàng Sâm, Cầu Giấy, Hà Nội, Việt Nam.

*Email: buidingtantb@gmail.com

Nhận bài: 15/7/2024; Hoàn thiện: 16/9/2024; Chấp nhận đăng: 18/9/2024; Xuất bản: 14/10/2024.

DOI: <https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.IPE.2024.197-203>

TÓM TẮT

Trong nghiên cứu này, nhóm tác giả đã tiến hành tính toán và thử nghiệm một phương án tách tầng động cơ phóng và bung dù thu hồi khoang thiết bị trên thiết bị bay tốc độ cao bằng phương pháp sử dụng thuốc hỏa thuật. Kết quả tính toán đã lựa chọn được khối lượng thuốc hỏa thuật cần thiết và cơ chế tách bằng cách cắt đứt các chốt giữ dưới tác dụng của lực áp suất khí thuốc. Nhóm tác giả đã tiến hành thử nghiệm mô hình mẫu trên mặt đất và trên thiết bị drone, thử nghiệm cơ cấu tách tầng - bung dù trên thiết bị bay thực tế. Kết quả thử nghiệm cho thấy, giải pháp tách tầng bằng thuốc hỏa thuật là tin cậy và có thể ứng dụng được vào thực tế.

Từ khóa: Thuốc hỏa thuật; Tách tầng; Thiết bị bay.

1. MỞ ĐẦU

Trong thiết kế và phát triển các hệ thống tên lửa tầm ngắn và thiết bị bay cỡ nhỏ (sau đây viết tắt là TBB), việc tối ưu hóa khả năng vận hành và độ chính xác của TBB là yếu tố rất quan trọng. Trong quá trình TBB bay, động cơ phóng được tách ra khỏi thân TBB sau khi hoàn thành nhiệm vụ phóng ban đầu. Động cơ phóng giúp TBB đạt được tốc độ và hướng đi cần thiết trước khi chuyển sang giai đoạn bay thụ động hoặc kích hoạt động cơ hành trình. Tuy nhiên, nếu không được tách rời đúng cách, động cơ phóng có thể làm ảnh hưởng đến hiệu suất bay và độ ổn định của TBB [2].

Trong số các phương pháp tách tầng hiện nay, phương pháp sử dụng thuốc hỏa thuật (pyrotechnics) đã chứng minh được tính hiệu quả cao nhờ khả năng thực hiện quá trình tách tầng nhanh và tin cậy mà không cần các cơ cấu cơ khí phức tạp, ngoài ra, cơ cấu tách hỏa thuật có thể được tích hợp dễ dàng vào các thiết kế TBB nhỏ gọn. Điều này đặc biệt có lợi trong các hệ thống TBB cỡ nhỏ, nơi không gian hạn chế và yêu cầu giảm thiểu số lượng các chi tiết là ưu tiên hàng đầu. Thuốc hỏa thuật có khả năng sinh khí nhanh, tạo ra áp suất cao trong thời gian ngắn, phá vỡ các kết nối cơ học giữa các tầng TBB hoặc giữa động cơ phóng với thân TBB, giúp giảm thiểu độ trễ và đảm bảo quá trình tách diễn ra chính xác và nhanh chóng. Tuy nhiên, việc ứng dụng thuốc hỏa thuật trong tách tầng đòi hỏi sự nghiên cứu kỹ lưỡng về đặc tính cháy, mức độ an toàn và khả năng tích hợp vào hệ thống tổng thể của TBB [3, 5].

Bài báo này sẽ tập trung nghiên cứu về giải pháp tách động cơ phóng khỏi khoang thiết bị (Payload) của TBB sau khi thuốc phóng động cơ cháy hết. TBB có tốc độ tối đa khoảng 750 m/s, độ cao lớn nhất khoảng 10 km.

Để giải quyết được vấn đề nêu trên, nhóm tác giả cần thực hiện các nội dung sau:

- Xây dựng cơ sở khoa học để tính toán khối lượng thuốc hỏa thuật, áp suất và thời gian tác dụng của áp lực cắt đứt kết nối cơ học giữa động cơ phóng và khoang thiết bị.
- Thực nghiệm kiểm tra đánh giá hiệu quả tách động cơ phóng bằng thuốc hỏa thuật.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Mô hình cơ cấu tách tầng

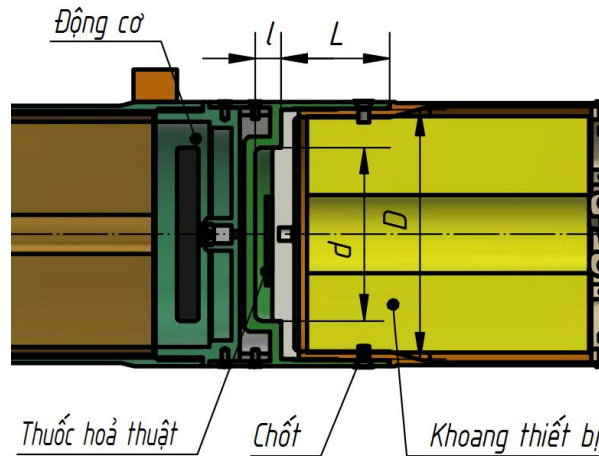
Các giả thiết sau đây được sử dụng để xây dựng mô hình tính toán:

- TBB được phóng ở góc phóng từ 80° đến 85° nhằm đảm bảo thuận tiện cho công tác thu hồi và

phù hợp với các trường bắn có kích thước nhỏ ở Việt Nam khi thử nghiệm. Với cấu hình phóng này, giả thiết rằng trong quá trình bay tốc độ cao, phương trọng lực của TBB trùng với trục dọc của nó.

- TBB hoạt động ổn định, không quay quanh trục hoặc quay quanh trục với tốc độ thấp.
- Lực đẩy của động cơ không tác dụng lên chốt cơ học kết nối động cơ với khoang thiết bị.
- Liên kết giữa động cơ và khoang thiết bị là liên kết tuyệt đối cứng.
- Quá trình tách động cơ phóng được thực hiện trong giai đoạn bay thụ động của TBB.
- Quá trình cắt đứt các chốt cơ học là tức thời, đồng thời.
- Các hạt thuốc hoá thuật cháy đồng thời, hoàn toàn.
- Buồng tạo áp được coi như tuyệt đối kín.
- Gia tốc trọng trường ở vị trí phóng TBB, lấy bằng $g = 9,807 \text{ m/s}^2$.

Với các giả thiết đã nêu trên, mô hình cơ cấu tách tầng sử dụng thuốc hoá thuật được xây dựng là mô hình 3D ứng dụng cho TBB thử nghiệm tốc độ cao được thể hiện trên hình 1.



Hình 1. Mô hình cơ cấu tách tầng bằng thuốc hoá thuật.

Khi thuốc hoá thuật cháy, sinh ra khí thuốc điền đầy buồng tạo áp (là không gian được giới hạn bởi đường kính d và chiều cao l ở thời điểm ban đầu - hình 1), áp suất trong buồng tăng dần tạo ra áp lực lên đáy khoang thiết bị. Khi áp lực tăng đến giá trị nhất định, cắt đứt các chốt giữ được chế tạo từ hợp kim nhôm. Khối thiết bị chuyển động tách rời khỏi động cơ theo hướng dọc trục, duy trì được hướng chuyển động ban đầu do không xuất hiện lực ngang.

2.2. Thiết lập các điều kiện tách động cơ phóng

Lực tối thiểu cắt đứt các chốt giữ [1]:

$$F_c^{\min} = \frac{n\pi d_c^2}{4} [\tau], \quad (1)$$

trong đó: n - Số lượng chốt; d_c - Đường kính chốt, m; $[\tau]$ - Độ bền cắt của vật liệu chế tạo chốt, Pa.

Áp lực tối thiểu để tách động cơ:

$$F_{tach}^{\min} = F_c^{\min} + q \cdot g, \quad (2)$$

trong đó: q - Khối lượng khoang thiết bị, kg.

Áp suất tối thiểu sinh ra bởi sản phẩm cháy (SPC) thuốc hoá thuật để tách động cơ:

$$P_{spc}^{\min} = \frac{F_{tach}^{\min}}{\pi d^2}, \quad (3)$$

ở đây, d - Đường kính ban đầu của đáy buồng tạo áp, m.

2.3. Xác định khối lượng thuốc hoá thuật cần thiết

Tổng diện tích bề mặt cháy của thuốc hoá thuật:

$$S = \frac{\omega}{e_1 \cdot \rho}, \quad (4)$$

Trong đó: ω - Khối lượng thuốc hoá thuật, kg; e_1 - Bề dày vòm cháy của hạt thuốc, m; ρ - Khối lượng riêng của thuốc hoá thuật, kg/m³.

Diện tích bề mặt xung quanh bên trong của buồng tạo áp [6]:

$$F_b = \frac{4W_0}{d}, \quad (5)$$

Trong đó: W_0 - Thể tích buồng tạo áp, m³; d - Đường kính buồng tạo áp, m.

Thể tích tự do ban đầu của buồng tạo áp:

$$W_b = W_0 - \frac{\omega}{\rho}. \quad (6)$$

Khối lượng thuốc hoá thuật cần thiết để cắt đứt các chốt giữ [6]:

$$\omega_c = \frac{\omega \cdot u_1}{e_1} \cdot \frac{P_{spc}^{\min} - P_a}{\alpha_1}, \quad (7)$$

Trong đó: p_a - Áp suất ban đầu trong buồng tạo áp, lấy bằng áp suất khí quyển; u_1 - Vận tốc của thuốc hoá thuật phụ thuộc vào áp suất, m/s.Pa; α_1 - Hệ số đặc trưng cho quá trình cháy thuốc hoá thuật, được xác định bằng công thức [2]:

$$\alpha_1 = \frac{k-1}{W_b} \cdot Q \frac{\omega u_1}{e_1} \left(1 - \frac{v \cdot \sigma}{R \cdot Q} \cdot \frac{e_1}{\omega u_1} F_b \right), \quad (8)$$

Trong đó: k - Chỉ số đoạn nhiệt quá trình cháy thuốc; Q - Nhiệt lượng riêng của thuốc hoá thuật, J/kg; v - Hệ số có tính đến sự chênh lệch giữa nhiệt độ SPC thuốc hoá thuật và nhiệt độ thành buồng; R - Hằng số khí SPC thuốc, J/kg.K; σ - Hệ số truyền nhiệt, J.m/kg.K.s.

Vì khối lượng thuốc cần để cắt đứt các chốt luôn luôn nhỏ hơn khối lượng thuốc hoá thuật ban đầu, nghĩa là $\omega_c \leq \omega$, nên từ (7) có thể rút ra điều kiện sau:

$$\alpha_1 \geq \frac{u_1}{e_1} \cdot (P_{spc}^{\min} - p_a). \quad (9)$$

Từ (8) và (9) xác định được khối lượng thuốc hoá thuật tối thiểu để cắt đứt các chốt giữ như sau:

$$\omega_{\min} = \frac{W_b e_1}{(k-1) Q u_1} \cdot \left[\frac{u_1}{e_1} \cdot (P_{spc}^{\min} - p_a) + \frac{k-1}{W_b} \cdot \frac{v \cdot \sigma}{R} \cdot F_b \right], \quad (10)$$

Phương trình áp suất sinh ra bởi sản phẩm cháy thuốc hoá thuật được xác định theo [2]:

$$p(t) = p_a \cdot e^{\alpha_1 t}, \quad (11)$$

Tại thời điểm cắt đứt các chốt giữ, vì một lượng thuốc đã cháy nên thể tích tự do của buồng tạo áp tăng lên và bằng:

$$W_1 = W_b + \frac{\omega_c}{\rho}. \quad (12)$$

2.4. Xác định vận tốc khối thiết bị sau khi tách rời khỏi động cơ

Từ hình 1 thấy rằng, sau khi các chốt được cắt đứt, khoang thiết bị sẽ bị đẩy về phía trước do áp lực của khí SPC một khoảng L trước khi tách hoàn toàn khỏi động cơ. Áp suất trung bình ở cuối đoạn tách được xác định như sau [4]:

$$P_{th} = \frac{S_1 \cdot e_1^2}{2 \cdot \varphi \cdot u_1^2 \cdot q \cdot L}, \quad (13)$$

Trong đó: S_1 - Diện tích mặt đáy khoang thiết bị sau khi cắt chốt, m^2 ; q - Khối lượng khoang thiết bị, kg ; L - Độ dài đoạn trượt của khoang thiết bị, m ; $\varphi = K + \frac{\omega}{3q}$ - Hệ số khối lượng có tính đến tổn thất nhiệt, trong đó $K = 1,02...1,05$ là hệ số phụ thuộc vào kích thước và tốc độ ban đầu của khoang thiết bị.

Vận tốc khoang thiết bị (v_1) và vận tốc động cơ (v_2) sau khi tách rời là nghiệm của phương trình đặc trưng [4] có dạng:

$$v_1 = c_1 + \sqrt{c_1^2 + c_2}; \quad v_2 = -\frac{c_2}{v_1}. \quad (14)$$

Các hệ số trong các nghiệm (14) được xác định như sau:

$$c = 2 \frac{Q \cdot \omega \cdot u_1}{S_1 \cdot e_1}; \quad c_1 = 0,5c - (1 - \alpha_1 \cdot \rho) \frac{P_{th} \cdot \omega \cdot u_1}{\rho S_1 \cdot e_1}; \quad c_2 = \frac{2p_0 \cdot W_1}{(k-1)\varphi \cdot q}. \quad (15)$$

3. KẾT QUẢ VÀ THẢO LUẬN

3.1. Số liệu đầu vào

Lựa chọn loại thuốc hoá thuật là thuốc đen hạt nhỏ có kích thước từ 1 mm đến 1,5 mm. Các thông số đặc trưng của thuốc hoá thuật [6] và mô hình cơ cấu tách tầng (hình 1) được liệt kê như trong bảng 1.

Bảng 1. Các thông số đầu vào cho tính toán cơ cấu tách tầng.

TT	Thông số	Đơn vị	Giá trị
1	Khối lượng khoang thiết bị	kg	7
2	Đường kính x chiều cao buồng tạo áp (d x l)	mm	80 x 80
3	Đường kính x độ dài đoạn trượt (D x L)	mm	115 x 50
4	Đường kính x số lượng chốt giữ	mm	4 x 6
5	Độ bền cắt của vật liệu chế tạo chốt	MPa	207
6	Áp suất ban đầu trong buồng tạo áp (p_a)	MPa	0,1
7	Chỉ số đoạn nhiệt quá trình cháy thuốc hoá thuật (k)	-	1,25
8	Bề dày vòm cháy của hạt thuốc đen (e_1)	mm	0,68
9	Nhiệt lượng riêng của thuốc hoá thuật (Q)	kJ/kg	3726
10	Mật độ thuốc hoá thuật (ρ)	kg/m ³	1600
11	Hằng số khí sản phẩm cháy (R)	J/kgK	358,4
12	Tốc độ cháy thuốc (u_1)	m/(MPa.s)	1,5
13	Hệ số truyền nhiệt (σ)	J.m/(kg.K.s)	418,7
14	Hệ số chênh lệch nhiệt độ, ν	-	0,9

3.2. Kết quả tính toán

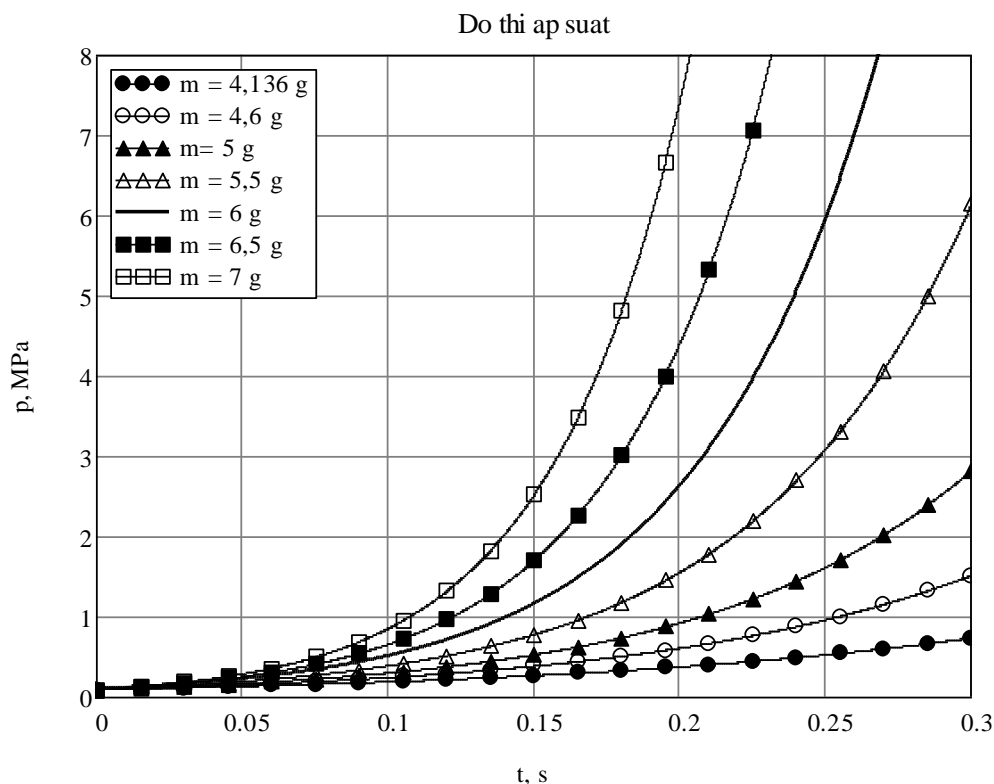
Từ (3), xác định áp suất tối thiểu để cắt đứt các chốt là 3,12 MPa. Từ công thức (10) xác định được khối lượng thuốc hoá thuật tối thiểu để cắt đứt các chốt giữ là 4,136 g.

Tiến hành khảo sát đối với một số trường hợp khối lượng thuốc khác nhau, kết quả tính toán được cho trong bảng 2. Ở đây, thời điểm cắt đứt chốt là thời điểm khi áp suất trong buồng tạo áp $p(t)$ tăng đến bằng giá trị áp suất tối thiểu p_{spc}^{min} .

Bảng 2. Kết quả tính toán với các trường hợp cụ thể.

TT	Thông số	Đơn vị	Khối lượng thuốc hoá thuật, g						
			4,136	4,6	5	5,5	6	6,5	7
1	Thời điểm cắt đứt chốt	s	0,515	0,379	0,309	0,250	0,211	0,182	0,160
2	Vận tốc tách rời của thiết bị	m/s	41,70	42,20	42,64	43,21	43,78	44,36	44,95
3	Vận tốc tách rời của động cơ	m/s	33,20	32,75	32,37	31,91	31,45	31,01	30,57

Theo tính toán thiết kế hệ thống đạn đạo TBB, tại thời điểm tách động cơ phóng, TBB có tốc độ khoảng 50 m/s, do vậy, việc tách động cơ phóng vừa phải đảm bảo độ tin cậy cao, vừa phải đảm bảo ít ảnh hưởng đến quỹ đạo bay tiếp theo của khoang thiết bị. Từ phương trình (11) xây dựng được đồ thị áp suất trong buồng tạo áp theo thời gian như trên hình 2.



Hình 2. Đồ thị áp suất trong buồng tạo áp cho các trường hợp khảo sát.

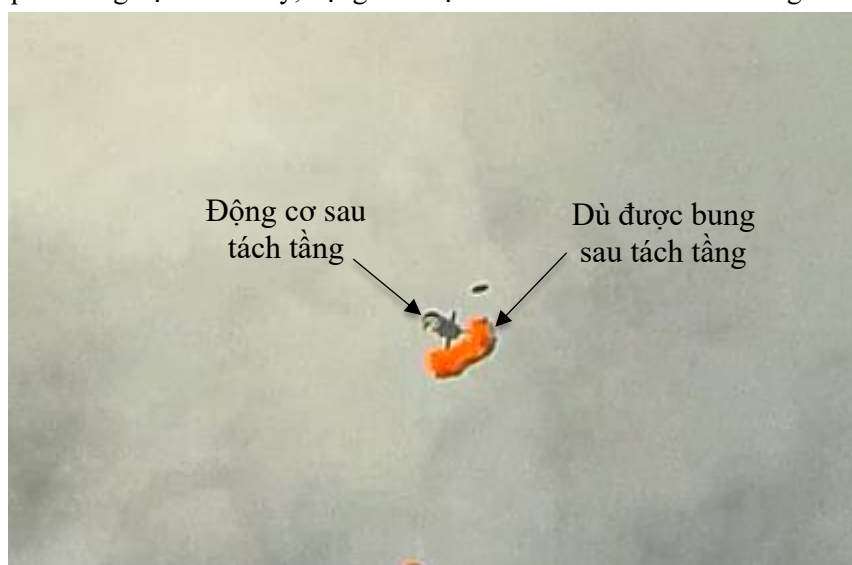
3.3. Kết quả thử nghiệm

Tiến hành thử nghiệm tĩnh trên mặt đất khả năng tách tầng của cơ cấu trên giá nằm ngang đối với các trường hợp sử dụng khối lượng thuốc hoá thuật 5 g, 6 g và 7 g. Các gói thuốc hoá thuật được kích hoạt bởi 02 hạt lửa điện MB-2N. Trong mô hình thử nghiệm, động cơ và khoang thiết bị được thiết kế dạng mẫu mô phỏng có khối lượng 14,5 kg (động cơ mô phỏng thời điểm cháy hết thuốc phóng) và 7 kg (khoang thiết bị mô phỏng); động cơ mô phỏng được liên kết với khoang thiết bị mô phỏng bằng 6 chốt giữ đường kính 4 mm được chế tạo từ nhôm 6061; buồng tạo áp được làm kín bởi các gioăng cao su. Kết quả thử nghiệm cho thấy, động cơ mô phỏng được tách hoàn toàn ra khỏi khoang thiết bị mô phỏng, khoảng cách nhỏ nhất đo được (từ vị trí giá thử đến

điểm rơi trên mặt đất của khoang thiết bị) là 2,5 m. Do mối ghép giữa động cơ và khoang thiết bị có phần trụ định hướng dài ($\sim L = 50$ mm), nên sau khi tách ra khỏi động cơ, khoang thiết bị chuyển động thẳng dọc theo trục ban đầu.

Để mô phỏng trạng thái tách tầng sát với thực tế, tiến hành thử nghiệm mô hình trên thiết bị bay không người lái Drone. Mô hình thử nghiệm được Drone nâng lên độ cao khoảng 300 m, sau đó được thả rơi tự do ở tư thế thẳng đứng theo trục dọc của mô hình. Theo tính toán, khi mô hình thử nghiệm đạt tốc độ rơi 50 m/s (ở độ cao 170 m) tương đương tốc độ bay của TBB ở thời điểm tách động cơ phóng, thuốc hoá thuật được kích hoạt để tách động cơ mô phỏng ra khỏi khoang thiết bị mô phỏng. Kết quả cho thấy, cơ cấu tách tầng hoá thuật làm việc theo đúng nguyên lý.

Và cuối cùng, cơ cấu tách tầng động cơ phóng được tích hợp bản thử nghiệm trên TBB thực tế. Thời điểm kích hoạt tách tầng là 34 s tính từ thời điểm phóng TBB, khi đó, TBB đạt độ cao khoảng 10 km. Kết quả thử nghiệm cho thấy, động cơ được tách hoàn toàn khỏi khoang thiết bị (hình 3).



Hình 3. Thử nghiệm khả năng làm việc của cơ cấu tách tầng trên TBB.

4. KẾT LUẬN

Tóm lại, việc ứng dụng thuốc hóa thuật trong tách tầng TBB đã chứng minh là một giải pháp hiệu quả và đáng tin cậy, đặc biệt đối với các phương tiện mang tốc độ cao. Bằng cách sử dụng các cơ chế cháy-nổ, quá trình tách tầng có thể được thực hiện nhanh chóng và chính xác. Điều này đảm bảo rằng các khối lượng không cần thiết, chẳng hạn như các động cơ đã cháy hết, được loại bỏ một cách hiệu quả, cho phép TBB duy trì quỹ đạo và hoạt động như mong muốn. Ngoài ra, phương pháp tách tầng bằng thuốc hóa thuật đã thể hiện khả năng thực hiện các chức năng quan trọng như triển khai vật mang vào quỹ đạo, kích hoạt các bộ phận (ví dụ bung dù - hình 3), mà không làm ảnh hưởng đến độ bền cấu trúc hoặc chức năng của các tầng TBB còn lại (trong thử nghiệm là khoang thiết bị). Nghiên cứu này khẳng định rằng các giải pháp dựa trên thuốc hóa thuật mang lại nhiều ưu điểm trong việc tách tầng, góp phần vào sự thành công và độ tin cậy tổng thể của hệ thống TBB.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Nguyễn Đình Đức, Đào Như Mai, “Sức bền vật liệu và kết cấu”. Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội, (2011).
- [2]. K. R. Suresh, R. S. Gholap, “Development of Pyrotechnic Devices for Aerospace Applications”, Defence Science Journal, Volume: 55, Issue 4, pp. 461-470 (2005).

- [3]. L. Mueller, H. Fritsch, "*Design and Testing of Separation Systems for Aerospace Vehicles*", Acta Astronautica, Volume: 68, Issue 7, pp. 1223-1231, (2010).
- [4]. O.V. Evans, M.C. Smith, "*Aerospace Separation Systems: Mechanisms and Analysis*", Journal of Aerospace Engineering, Volume: 22, Issue 6, pp. 307-315, (2008).
- [5]. И.В. Глухов, "*Применение пиротехнических систем в аэрокосмических аппаратах*", Космическая техника и технологии, Том: 30, Выпуск 2, Страницы: 14-21, (2012).
- [6]. Б. В. Орлов, "*Термодинамические и баллистические основы проектирования РДТТ*", Издательство Машиностроение, Москва, (1968).

ABSTRACT

Research on pyrotechnic-based stage separation solutions for flight vehicles

In this study, the authors conducted calculations and experiments on a stage separation method for the booster engine and the parachute deployment system to recover the equipment bay of a high-speed flight vehicle using pyrotechnics. The calculations determined the required amount of pyrotechnic charge and the separation mechanism by severing the retaining pins under the pressure force generated by the pyrotechnic gases. The authors carried out prototype tests on the ground and with drones, followed by full-scale tests of the separation and parachute deployment mechanisms on actual flight vehicles. The experimental results indicate that the pyrotechnic-based stage separation method is reliable and feasible for practical application.

Keywords: Pyrotechnic; Stage separation; Flight vehicle.