

MỞ ĐẦU

Tính cấp thiết của luận án: Để hiện thực hóa việc thiết kế chế tạo các tên lửa có điều khiển trong điều kiện công nghiệp sản xuất nhiên liệu rắn tên lửa của chúng ta còn hạn chế, cần nghiên cứu những sơ đồ kết cấu khác nhau của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn cho khả năng chương trình hóa lực đẩy của động cơ trong phạm vi đủ rộng. Động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp có khả năng tạo ra một hoặc hai xung lực đẩy có chế độ khác nhau tác dụng trong thời gian dài, đáp ứng được yêu cầu của các nhiệm vụ của kỹ thuật tên lửa đặt ra từ thực tiễn hiện nay.

Mục đích nghiên cứu của luận án: Thiết lập cơ sở lý thuyết ban đầu cho việc nghiên cứu loại động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp ở nước ta, thông qua việc thực hiện bằng phương pháp phân tích định lượng các nội dung nghiên cứu về tương quan giữa đặc trưng kết cấu với đặc trưng làm việc và các chế độ hoạt động khả dĩ ứng dụng trong thực tế của loại động cơ này.

Đối tượng và phạm vi nghiên cứu của luận án: Đối tượng nghiên cứu của luận án là động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp sử dụng thuốc phóng keo, làm việc ở các chế độ ổn định. Phạm vi nghiên cứu của luận án là toàn bộ quá trình làm việc của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp, trong đó tập trung vào khả năng chương trình hóa lực đẩy của động cơ.

Phương pháp nghiên cứu: Sử dụng phương pháp nghiên cứu lý thuyết kết hợp với phương pháp nghiên cứu thực nghiệm.

Ý nghĩa khoa học và thực tiễn: Góp phần làm sáng tỏ cơ sở lý thuyết về động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp phục vụ cho thiết kế chế tạo và công tác nghiên cứu, giảng dạy; Đưa ra phương án chế tạo động cơ phóng và động cơ hành trình có thời gian làm việc dài khi sử dụng thuốc phóng keo sản xuất trong nước.

Nội dung chính trong luận án: Nghiên cứu tổng quan về động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp; Xây dựng mô hình toán xác định các đặc trưng làm việc của động cơ; Nghiên cứu thực nghiệm kiểm chứng trên động cơ mẫu; Khảo sát ảnh hưởng của một số yếu tố đến chế độ làm việc của động cơ;

Bố cục của luận án: Gồm phần mở đầu và bốn chương nội dung, phần kết luận, danh mục các công trình liên quan đến luận án đã công bố, danh mục các tài liệu tham khảo và phần phụ lục.

Chương 1. TỔNG QUAN

1.1. Đặc trưng chung của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn

Động cơ tên lửa nhiên liệu rắn (ĐTR) được ứng dụng rất rộng rãi trong các lĩnh vực kỹ thuật khác nhau. Đặc trưng của loại động cơ này bao gồm:

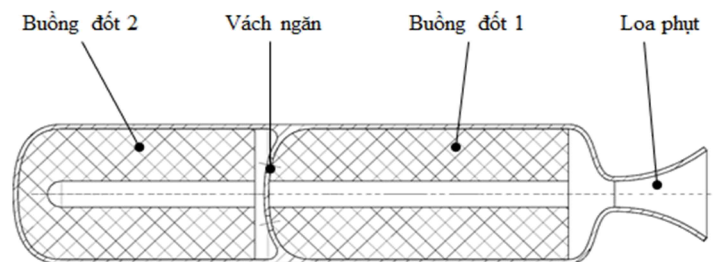
- Kết cấu nhỏ gọn, cấu tạo đơn giản, ít bộ phận hợp thành;
- Độ tin cậy hoạt động cao, duy trì được trạng thái sẵn sàng kích hoạt, đáp ứng các yêu cầu cao về mức độ sẵn sàng chiến đấu của trang bị tên lửa;
- Cường độ làm việc rất cao của buồng đốt và loa phụt: Áp suất trong buồng đốt có thể đạt tới $150-200 \cdot 10^5$ Pa, nhiệt độ sản phẩm cháy xấp xỉ 2000-3000 K.

1.2. Các động cơ tên lửa nhiên liệu rắn điển hình của tên lửa có điều khiển

Hệ thống động lực của tên lửa có điều khiển thường bao gồm động cơ phóng và động cơ hành trình. Động cơ phóng có nhiệm vụ phóng tên lửa lên quỹ đạo và cấp cho nó vận tốc đủ lớn cần thiết để chuyển sang chế độ bay hành trình. Động cơ hành trình là nguồn động lực bảo đảm các thông số quỹ đạo của tên lửa trên hành trình bay có điều khiển đến mục tiêu. Động cơ phóng của hầu hết các tên lửa có điều khiển đều là động cơ nhiên liệu rắn có xung lực đẩy đơn giản tác dụng trong thời gian ngắn. Động cơ hành trình nhiên liệu rắn của các tên lửa có điều khiển có thời gian hoạt động dài, tạo ra xung lực đẩy có độ dài xung lớn với những chế độ lực đẩy khác nhau, phù hợp yêu cầu các tham số bay của tên lửa.

1.3. Động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp

Động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt (ĐTRHBĐ) liên hợp là loại động cơ có buồng đốt với nhiên liệu và thiết bị môi được tách làm hai đơn nguyên độc lập về kết cấu nhưng tích hợp trong một quá trình làm việc thống nhất trên cùng một khối loa phụt. Các buồng đốt thành phần (các đơn nguyên) được ngăn cách bằng vách ngăn. Sơ đồ nguyên lý của ĐTRHBĐ liên hợp được trình bày trên hình 1.7



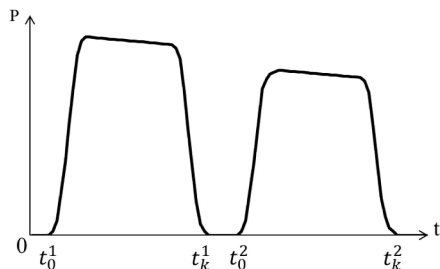
Hình 1.7. Sơ đồ nguyên lý ĐTRHBĐ liên hợp

Quá trình làm việc của động cơ bắt đầu bằng việc kích hoạt buồng đốt 1. Khi đó,

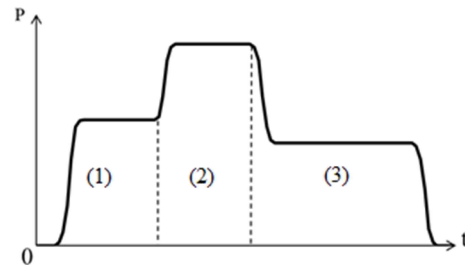
vách ngăn cách ly hoàn toàn buồng đốt 2 và hoạt động của động cơ như một động cơ tên lửa nhiên liệu rắn thông thường. Đến một thời điểm đã định trước theo yêu cầu của chương trình lực đẩy của tên lửa, buồng đốt 2 được kích hoạt, phá bỏ vách ngăn, làm liên thông hai buồng đốt cùng với các quá trình cháy, tạo khí và lưu chuyển sản phẩm cháy trong toàn bộ không gian động cơ.

Phụ thuộc vào thời điểm kích hoạt buồng đốt 2, động cơ có thể có các chế độ làm việc như sau:

Trường hợp 1: Buồng đốt 2 được kích hoạt sau một khoảng thời gian giữ chậm Δt tính từ thời điểm buồng đốt 1 kết thúc hoạt động. Kết quả làm việc của động cơ trong trường hợp này tạo ra hai xung lực đẩy khác nhau với giãn cách thời gian Δt (hình 1.8). Đây là trường hợp điển hình được ứng dụng trong thực tế.



Hình 1.8. Đặc trưng lực đẩy hai xung của ĐTRHBD liên hợp



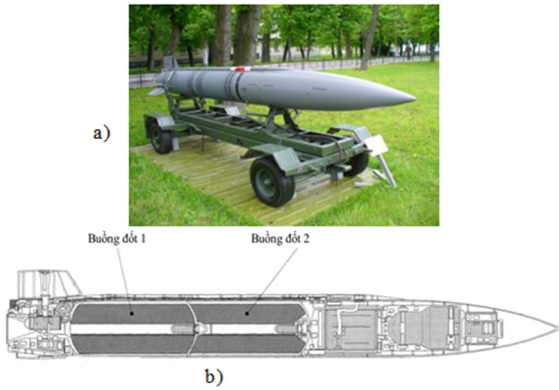
Hình 1.9. Đặc trưng lực đẩy đơn xung của ĐTRHBD liên hợp

Trường hợp 2: Buồng đốt 2 được kích hoạt khi buồng đốt 1 còn đang hoạt động. Kết quả làm việc của động cơ tạo ra một xung lực đẩy với các chế độ có thể khác nhau của lực đẩy tương ứng với các giai đoạn cháy của hai liệu nhiên liệu trong hai buồng đốt (hình 1.9). Giai đoạn cháy riêng lẻ của liệu nhiên liệu trong buồng đốt 1 - (1), giai đoạn cháy đồng thời của cả hai liệu nhiên liệu trong hai buồng đốt - (2) và giai đoạn cháy riêng lẻ của liệu nhiên liệu trong buồng đốt 2 - (3).

1.4. Tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước về động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp

1.4.1. Ngoài nước

ĐTRHBD liên hợp đã được nghiên cứu và ứng dụng ở nhiều nước có nền công nghiệp tên lửa phát triển như Nga, Mỹ, Trung Quốc [43], [44], [45], [46], [66], [67], [68]. Nga đã thiết kế, chế tạo, sản xuất và đưa vào trang bị các tên lửa lớp siêu thanh không đối hạm Kh-15 và không đối đất Kh-15S sử dụng động cơ hai xung ĐTR-160, đạt tốc độ $M=5$ khi tiếp cận mục tiêu ở cự ly 300 km. (Hình 1.10).



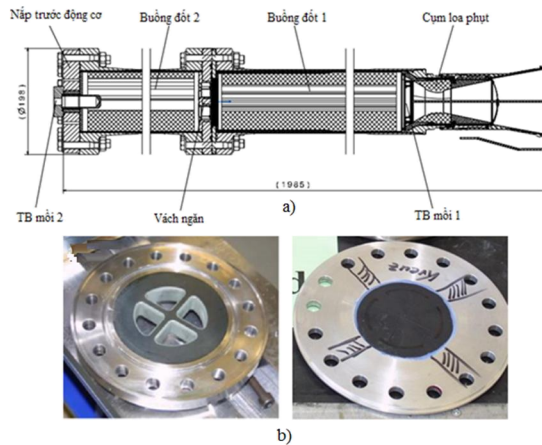
Hình 1.10. Tên lửa siêu thanh Kh-15



Hình 1.11. Tên lửa AGM-69 SRAM

Hãng Boeing đã phát triển loại tên lửa siêu thanh AGM-69 SRAM cho quân đội Mỹ dùng động cơ hai xung SR75-LP-1, tốc độ $M=3$, tầm bắn 200 km (Hình 1.11).

Viện nghiên cứu Bayer-Chemie, tập đoàn MBDA có trụ sở ở Đức có nhiều công trình nghiên cứu về ĐTRHBD liên hợp trong chương trình phát triển tên lửa siêu thanh thế hệ mới bắt đầu triển khai từ những năm 1990 [32], [33], [34], [35], [36]. Các tài liệu này trình bày các nghiên cứu về thử nghiệm kết cấu vách ngăn giữa hai buồng đốt, thử nghiệm hoạt động của động cơ trên động cơ mẫu và thử nghiệm đánh giá hiệu quả bắn bay của tên lửa dùng động cơ hai xung. Trên hình 1.15 trình bày sơ đồ kết cấu động cơ mẫu với vách ngăn dạng phá hủy dùng màng nhôm.



Hình 1.15. ĐTRHBD liên hợp sử dụng vách ngăn phá hủy

a-Sơ đồ kết cấu động cơ mẫu với vách ngăn phá hủy

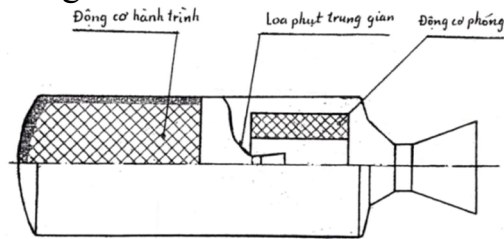
b-Cấu tạo vách ngăn phá hủy bằng màng nhôm

1.4.2. Trong nước

Ở Việt nam, động cơ ĐTRHBD liên hợp còn chưa được nghiên cứu nhiều và do đó, rất ít công trình liên quan đến loại động cơ này được công bố.

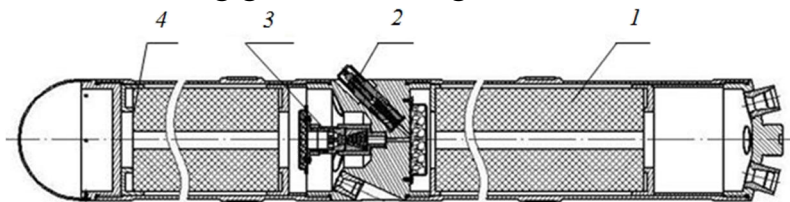
Trong tài liệu [23], trình bày ý tưởng về một loại động cơ hai buồng đốt liên hợp lập thành từ việc ghép nối động cơ hành trình với động cơ phóng, trong đó loa phụt

động cơ hành trình nằm trong buồng đốt động cơ phóng (hình 1.18). Tuy nhiên, đây mới chỉ ở dạng đề xuất ý tưởng.



Hình 1.18. ĐTRHBD liên hợp bằng cách ghép nối ĐC hành trình với ĐC phóng

Viện Tên lửa, Viện KH-CN QS, đã công bố một số công trình nghiên cứu liên quan đến động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt [3], [4], [6], [8], [13], [21]. Đó là kết quả nghiên cứu thiết kế chế tạo lớp vũ khí phá vật cản dạng tên lửa kéo chuỗi nổ mềm liên tục như FR, MCT, FMV-08 và FMV-B. Tổ hợp động cơ của các loại vũ khí này đều có cùng một kiểu sơ đồ kết cấu dựa trên ghép nối tiếp động cơ phóng với động cơ hành trình (hình 1.19) tạo ra xung lực đẩy một hoặc hai chế độ tùy theo điều kiện nhồi cụ thể. Tuy nhiên, quá trình làm việc của động cơ được khảo sát một cách độc lập, không có sự liên thông giữa các buồng đốt.



Hình 1.19. Sơ đồ kết cấu tổ hợp động cơ vũ khí phá vật cản
1- Buồng đốt 1; 2- Điểm hòa cơ khí; 3- Cụm giữ chậm; 4- Buồng đốt 2.

1.5. Luận giải về việc lựa chọn đề tài nghiên cứu của luận án

Trong những điều kiện hạn chế về công nghệ chế tạo thuốc phóng trong nước, ĐTRHBD liên hợp có thể cho khả năng thực tế tạo ra những động cơ hành trình có xung lực đẩy lớn, tác dụng trong thời gian đủ dài. Điều này có thể đáp ứng được yêu cầu hiện nay trong việc phát triển công nghệ tên lửa có điều khiển trong Quân đội cũng như thiết kế chế tạo các mẫu tên lửa TV-01 và TV-02 theo nhiệm vụ của chương trình quốc gia về công nghệ vũ trụ. Vì vậy, đối tượng nghiên cứu mà đề tài luận án hướng đến là loại động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp với các liệu nhiên liệu là thuốc phóng keo sản xuất trong nước.

1.6. Kết luận chương 1

1. Động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp có khả năng tạo được một hoặc hai xung lực đẩy có chế độ khác nhau tác dụng trong thời gian dài. Vì vậy,

dạng động cơ này có khả năng đáp ứng yêu cầu chương trình hóa lực đẩy của tên lửa có điều khiển.

2. Các nước phát triển trên thế giới đã có nhiều nghiên cứu và ứng dụng ĐTRHBĐ liên hợp cho việc phát triển các tên lửa siêu thanh có điều khiển. Một số nước đã đưa vào trang bị Quân đội các vũ khí tên lửa sử dụng ĐTRHBĐ liên hợp, như Nga, Mỹ, Trung Quốc. Tuy nhiên, các tài liệu liên quan còn ở chế độ mật, chỉ công bố sơ lược các kết cấu và thử nghiệm, chưa có tài liệu về lý thuyết và mô hình toán.

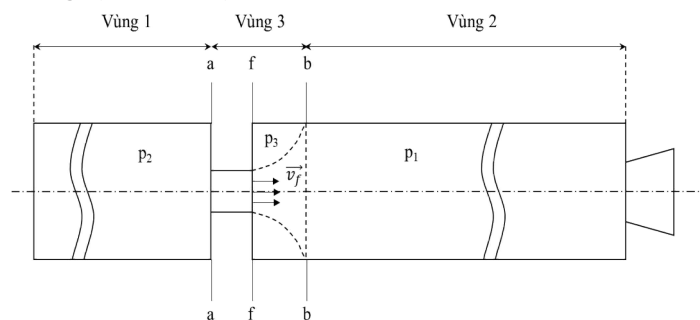
3. Trong nước ta đã có một số công trình nghiên cứu về ĐTRHBĐ, tuy nhiên các nghiên cứu về ĐTRHBĐ liên hợp mới chỉ trình bày ở dạng sơ đồ nguyên lý, cho đến nay chưa có công trình khoa học đầy đủ nào về dạng động cơ này được công bố.

4. Đề tài luận án có tính mới và có tính ứng dụng cao trong thực tiễn.

Chương 2. MÔ HÌNH TOÁN XÁC ĐỊNH CÁC ĐẶC TRƯNG LÀM VIỆC CỦA ĐỘNG CƠ TÊN LỬA NHIÊN LIỆU RẮN HAI BUỒNG ĐỐT LIÊN HỢP

2.1. Đặc điểm của các quá trình bên trong các buồng đốt khi động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp hoạt động

Quá trình làm việc của ĐTRHBĐ liên hợp có thể chia ra làm hai giai đoạn sau: Giai đoạn 1 bắt đầu từ khi kích hoạt thiết bị mồi của buồng đốt 1 đến thời điểm kích hoạt thiết bị mồi của buồng đốt 2. Giai đoạn 2 bắt đầu từ khi kích hoạt thiết bị mồi của buồng đốt 2 đến khi động cơ kết thúc hoạt động. Tại mỗi thời điểm của quá trình làm việc ổn định của động cơ, sản phẩm cháy trong các buồng đốt có thể phân định thành ba vùng đặc trưng (hình 2.2).



Hình 2.2. Các vùng đặc trưng trong ĐTRHBĐ liên hợp

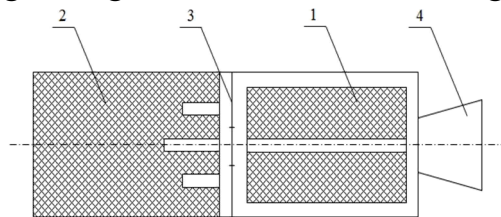
Vùng 1 là toàn bộ thể tích tự do của buồng đốt 2, nơi có áp suất cao p_2 . Vùng 2 là thể tích tự do của buồng đốt 1 từ tiết diện b-b đến cửa vào loa phụt, có áp suất thấp hơn p_1 ($p_1 < p_2$). Vùng 3 là vùng giữa các tiết diện a-a (cửa vào của lỗ trên vách ngăn) và tiết diện b-b. Trong các vùng 1 và 2, sản phẩm cháy gần như ở trạng thái tĩnh.

Vùng 3 có cấu trúc phức tạp. Độ rộng và mức độ phức tạp trong cấu trúc của vùng này phụ thuộc vào độ lớn của tốc độ lưu thông khí qua vách ngăn v_f . Với các giá trị nhỏ của v_f , vùng 3 được thu hẹp. Theo mức độ tăng lên của v_f , vùng 3 càng mở rộng. Khi tốc độ v_f vượt tốc độ âm thanh cục bộ của khí thuốc, trong vùng 3 sẽ xuất hiện các bước nhảy nén, có thể phá hủy trạng thái làm việc ổn định của động cơ.

2.2. Sơ đồ tính toán với các quan niệm và giả thiết cơ bản

Mô hình lý thuyết của động cơ được xây dựng dựa trên sơ đồ tính toán với các quan niệm và giả thiết cơ bản như sau:

Động cơ có hai buồng đốt ngăn cách nhau bởi vách ngăn mỏng (hình 2.3).



Hình 2.3. Sơ đồ tính toán của ĐTRHBD liên hợp
1-Buồng đốt 1, 2-Buồng đốt 2, 3-Vách ngăn, 4-Loa phụt

Các giả thiết cơ bản sau:

1. Các bề mặt tự do của mỗi liều nhiên liệu rắn được môi cháy đồng thời và tức thời tại thời điểm thuốc môi cháy hết và loa phụt được mở thông (với buồng đốt 1) hoặc thuốc môi cháy hết và cửa sổ trên vách ngăn được mở thông (với buồng đốt 2).

2. Vùng sản phẩm cháy bị nhiễu động do lưu động của khí thuốc qua cửa sổ trên vách ngăn chiếm tỷ trọng nhỏ, có thể bỏ qua so với thể tích tự do của các buồng đốt.

3. Các điều kiện nhồi trong hai buồng đốt đều bảo đảm không xuất hiện hoặc xuất hiện với cường độ nhỏ của hiệu ứng cháy xói mòn, sản phẩm cháy trong các buồng đốt gần như có trạng thái tĩnh, có thể áp dụng các thông số trạng thái lấy trung bình theo thể tích tự do của mỗi buồng đốt.

4. Các đặc trưng nhiệt động c_v , c_p và R của khí thuốc trong cả hai buồng đốt là như nhau.

5. Sản phẩm cháy trong các buồng đốt và loa phụt của động cơ không chứa các hạt rắn hoặc lỏng, đã thực hiện xong hoàn toàn các phản ứng cháy, có thể xem sản phẩm cháy như là loại khí hoàn thiện có các thuộc tính của khí lý tưởng.

6. Các quá trình nhiệt động xảy ra trong các buồng đốt và loa phụt đều là đẳng entropi và tựa dừng, chuyển động của sản phẩm cháy trong loa phụt tuân theo các tương quan khí động của dòng một chiều.

2.3. Các phương trình mô tả quá trình làm việc của động cơ

Các quá trình hóa lý trong các buồng đốt của động cơ tuân theo các phương trình sau:

- Các phương trình cháy và tạo khí;
- Phương trình bảo toàn khối lượng của sản phẩm cháy trong động cơ;
- Phương trình bảo toàn năng lượng của sản phẩm cháy trong động cơ;
- Phương trình trạng thái.

2.4. Hệ phương trình thuật phóng trong của động cơ với các điều kiện đơn trị và phương pháp giải

2.4.1. Hệ phương trình với các điều kiện đơn trị

Từ các phương trình nêu trên, thiết lập hệ phương trình như sau:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{de_{c1}}{dt} = \delta_1 u_{lp1} = \delta_1 u_{11} \cdot p_1^{v_1} \cdot \varepsilon_1(w) \cdot \eta_h(T_0) \\
 \frac{dm_1^+}{dt} = \delta_1 S_1 u_{lp1} \cdot \rho_{T1} = \delta_1 \cdot \rho_{T1} \cdot S_1(e) \cdot u_{11} \cdot p_1^{v_1} \cdot \varepsilon_1(w) \cdot \eta_h(T_0) \\
 \frac{dp_1}{dt} = \frac{1}{V_1} \left[RT_{g,1} (\dot{m}_1^+ - \dot{m}_1^- + \delta_3 \dot{m}_{r,d}) - \delta_1 p_1 S_1 u_{lp1} + \frac{p_1 V_1}{T_{g,1}} \frac{dT_{g,1}}{dt} \right] \\
 \frac{dm_1^-}{dt} = \frac{\varphi_2 K_0(k) F_{th} p_1}{\sqrt{RT_{g,1}}} \\
 \frac{dm_{r,d}}{dt} = \dot{m}_{r,d} \\
 \frac{dT_{g,1}}{dt} = \frac{1}{\dot{m}_1^+ - \dot{m}_1^- + \delta_3 \dot{m}_{r,d}} \left[\dot{m}_1^+ T_{1,1} - \dot{m}_1^- k T_{g,1} - (\dot{m}_1^+ - \dot{m}_1^- + \delta_3 \dot{m}_{r,d}) T_{g,1} + \delta_3 \frac{(k-1)}{R} \frac{dI_{r,d}}{dt} - \frac{(k-1)}{R} \frac{dQ_{nh1}}{dt} \right] \\
 \frac{dQ_{nh1}}{dt} = \sum F_{xq1} \alpha_1 (T_{g,1} - T_{K,1}) \\
 \frac{de_{c2}}{dt} = \delta_2 u_{lp2} = \delta_2 u_{12} \cdot p_2^{v_2} \cdot \varepsilon_2(w) \cdot \eta_h(T_0) \\
 \frac{dm_2^+}{dt} = \delta_2 S_2 u_{lp2} \cdot \rho_{T2} = \delta_2 \cdot \rho_{T2} \cdot S_2(e) \cdot u_{12} \cdot p_2^{v_2} \cdot \varepsilon_2(w) \cdot \eta_h(T_0) \\
 \frac{dp_2}{dt} = \frac{1}{V_2} \left[RT_{g,2} (\dot{m}_2^+ - \delta_3 \dot{m}_{r,d}) - \delta_2 p_2 S_2 u_{lp2} + \frac{p_2 V_2}{T_{g,2}} \frac{dT_{g,2}}{dt} \right] \\
 \frac{dT_{g,2}}{dt} = \frac{1}{\dot{m}_2^+ - \delta_3 \dot{m}_{r,d}} \left[\dot{m}_2^+ T_{1,2} - (\dot{m}_2^+ - \delta_3 \dot{m}_{r,d}) T_{g,2} - \delta_3 \frac{(k-1)}{R} \frac{dI_{r,d}}{dt} - \frac{(k-1)}{R} \frac{dQ_{nh2}}{dt} \right] \\
 \frac{dQ_{nh2}}{dt} = \sum F_{xq2} \alpha_2 (T_{g,2} - T_{K,2})
 \end{array} \right. \quad (2.60)$$

Với các phương trình bổ sung:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_1^+ - \dot{m}_1^- + \delta_3 \dot{m}_{tr.d}$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_2^+ - \delta_3 \dot{m}_{tr.d}$$

$$\dot{m}_{tr.d} = \begin{cases} \frac{\varphi_2 F_{lt} p_2}{\sqrt{RT_{g.2}}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, & \text{khi } 1 < \frac{p_2}{p_1} < \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \frac{\varphi_2 \cdot K_0(k) \cdot F_{lt} p_2}{\sqrt{RT_{g.2}}}, & \text{khi } \frac{p_2}{p_1} \geq \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \frac{\varphi_2 F_{lt} p_1}{\sqrt{RT_{g.1}}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, & \text{khi } 1 < \frac{p_1}{p_2} < \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \frac{\varphi_2 \cdot K_0(k) \cdot F_{lt} p_1}{\sqrt{RT_{g.1}}}, & \text{khi } \frac{p_1}{p_2} \geq \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases}$$

$$dI_{tr.d} = \begin{cases} \dot{m}_{tr.d} \cdot c_p \cdot T_{g.2} \cdot dt, & \text{khi } p_2 > p_1 \\ \dot{m}_{tr.d} \cdot c_p \cdot T_{g.1} \cdot dt, & \text{khi } p_2 < p_1 \\ 0, & \text{khi } p_2 = p_1 \end{cases}$$

Các hệ số $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ được xác định như sau:

$$\delta_1 = \begin{cases} 1, & \text{khi } 0 \leq (e)_{LP1} < e_{11} \\ 0, & \text{khi } (e)_{LP1} \geq e_{11} \end{cases} \quad \delta_2 = \begin{cases} 1, & \text{khi } 0 \leq (e)_{LP2} < e_{12} \\ 0, & \text{khi } (e)_{LP2} \geq e_{12} \end{cases} \quad \delta_3 = \begin{cases} 1, & \text{khi } p_2 > p_1 \\ -1, & \text{khi } p_2 < p_1 \\ 0, & \text{khi } p_2 = p_1 \end{cases}$$

Các điều kiện ban đầu khi $t=0$

$$\begin{cases} (e)_{LP1} = (e)_{LP10} \\ m_1^+ = m_{10}^+ \\ p_1 = p_{moi}, p_2 = p_0 \\ T_{g.1} = T_{1.1}, T_{g.2} = T_0 \\ Q_{nh.1} = 0 \\ V_1 = V_{1.0} \end{cases}$$

Các điều kiện khi $t=t_{mlt}$

$$\begin{cases} (e)_{LP2} = (e)_{LP20} \\ m_2^+ = m_{20}^+ \\ p_2 = p_{moi} \\ T_{g.2} = T_{1.2} \\ Q_{nh.2} = 0; \\ V_2 = V_{2.0} \end{cases}$$

2.4.2. Phương pháp giải hệ phương trình và sơ đồ thuật toán

Hệ phương trình (2.60) được giải bằng phương pháp số để thu được các tham số nhiệt động của sản phẩm cháy bằng cách sử dụng phương pháp Runge-Kutta bậc 4. Sơ đồ thuật toán giải hệ phương trình bài toán thuật phóng trong của ĐTRHBD liên hợp được thể hiện ở hình 2.4.

Hình 2.4. Sơ đồ thuật toán giải hệ PTVP tính toán thuật phóng trong

2.5. Tính toán lực đẩy của động cơ

- Trong giai đoạn buồng đốt 1 làm việc độc lập, lực đẩy của động cơ được xác định như trong một động cơ tên lửa nhiên liệu rắn thông thường. Khi đó, theo lý thuyết động cơ tên lửa [19] [24] [47], lực đẩy của động cơ được xác định như sau:

$$P = C_p \cdot p_1 \cdot F_{th} \quad (2.61)$$

- Trong giai đoạn 2, khi buồng đốt 2 được kích hoạt, lỗ thông trên vách ngăn được mở, lực đẩy của động cơ được xác định như sau:

$$P = C_p \cdot p_1 \cdot F_{th} + (p_2 - p_1) \cdot F_{lt} \quad (2.64)$$

2.6. Áp dụng mô hình toán xác định các đặc trưng làm việc của động cơ mẫu thử nghiệm

Giải hệ phương trình (2.60) với các thông số của động cơ mẫu (được trình bày trong chương 3). Các số liệu đầu vào được trình bày trong các bảng 2.1, 2.2 và 2.4.

Bảng 2.1. Các thông số chính của động cơ mẫu

Tham số	Buồng đốt 1	Buồng đốt 2
Chiều dài buồng đốt, [m]	0,292	0,292
Đường kính trong của buồng đốt, [m]	0,114	0,114
Chiều dài của vòi thuốc phóng, [m]	0,2	0,2
Đường kính ngoài của liều phóng, [m]	0,104	0,104
Đường kính trong của liều phóng, [m]	0,018	0,018
Mác của thuốc phóng	RSI-12M	RSI-12M
Đường kính tới hạn loa phụt, [m]	0,018	

-Thông số của liều thuốc phóng trong vách ngăn được trình bày trong bảng 2.2.

Bảng 2.2. Các thông số chính của liều thuốc phóng trong vách ngăn

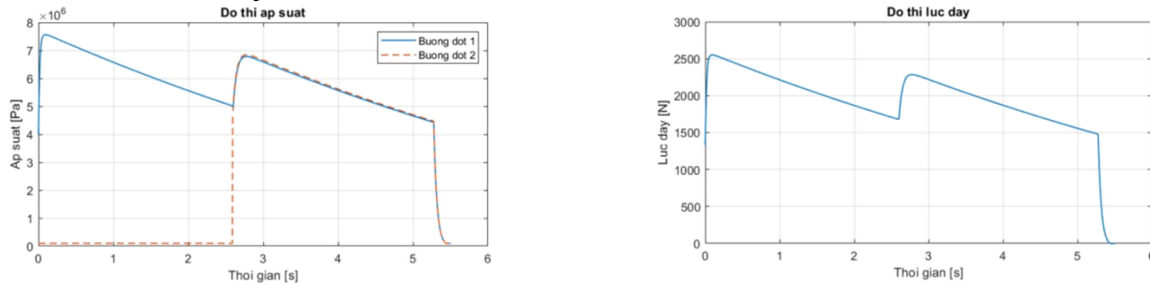
Tham số	Giá trị
Phân kim loại	
Số lượng lỗ thông	16
Đường kính lỗ, [m]	0,01
Liều thuốc phóng	
Đường kính trong, [m]	0,018
Đường kính ngoài đỉnh côn, [m]	0,097
Đường kính ngoài đáy côn, [m]	0,1022
Bề dày cháy, [m]	0,025
Mác của thuốc phóng	RSI-12M

Bảng 2.4. Các thông số đặc trưng của nhiên liệu

TT	Tên gọi	Ký hiệu	Giá trị	Đơn vị
1	Nhiệt độ cháy của thuốc phóng	$T_{l.1}, T_{l.2}$	2731	K
2	Chỉ số mũ đoạn nhiệt	k	1,25	
3	Hằng số khí của sản phẩm cháy	R	362	$J/kg.K$
4	Hệ số tốc độ cháy	u_l	$43,44 \cdot 10^{-6}$	m/s
5	Số mũ tốc độ cháy	ν	0,3456	
6	Hệ số ảnh hưởng của nhiệt độ	K_T	0,0034	
7	Mật độ của nhiên liệu	ρ_T	1570	kg/m^3

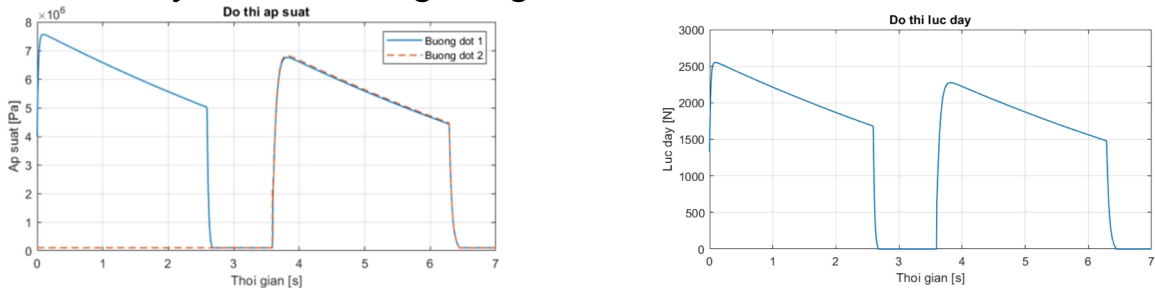
Kết quả tính toán cho như sau:

Trường hợp 1: Buồng đốt 2 được kích hoạt ngay sau khi liều phóng trong buồng đốt 1 hoàn toàn cháy hết



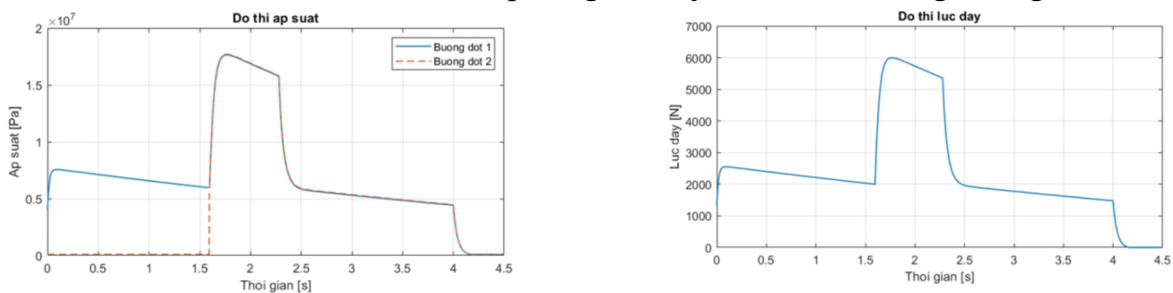
Hình 2.7. Kết quả tính toán lý thuyết trường hợp 1

Trường hợp 2: Buồng đốt 2 được kích hoạt sau khi liều phóng trong buồng đốt 1 hoàn toàn cháy hết một khoảng thời gian $\Delta t = 1$ s



Hình 2.8. Kết quả tính toán lý thuyết trường hợp 2

Trường hợp 3: Buồng 2 được kích hoạt khi buồng 1 đang làm việc. Buồng đốt 2 được kích hoạt trước thời điểm liều phóng 1 cháy hết một khoảng thời gian $\Delta t = 1$ s.



Hình 2.8. Kết quả tính toán lý thuyết trường hợp 3

2.7. Kết luận chương 2

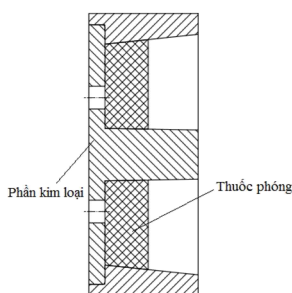
1. Để xây dựng mô hình toán, đã tiến hành phân tích các quá trình xảy ra trong các buồng đốt của động cơ. Trên cơ sở đó, đã áp dụng những quan niệm và giả thiết phù hợp làm đơn giản hóa việc mô tả quá trình làm việc của động cơ bằng các mối tương quan định lượng trong một hệ phương trình khép kín. Hệ phương trình này với các điều kiện đơn trị từ các thông số kết cấu và các điều kiện nhồi của động cơ, được giải bằng phương pháp Runge-Kutta bậc 4 với sự trợ giúp của phần mềm Matlab.

2. Mô hình toán đã xây dựng được áp dụng để xác định các đặc trưng làm việc của động cơ mẫu thử nghiệm. Về mặt định tính, các kết quả tính toán phù hợp với lý thuyết và cần được kiểm chứng độ tin cậy bằng các nghiên cứu thực nghiệm.

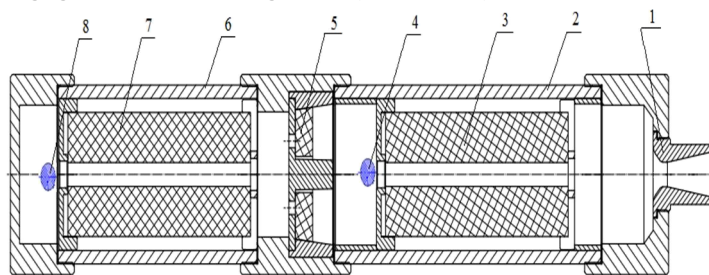
Chương 3. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM

3.1. Xây dựng động cơ mẫu thử nghiệm

Khó khăn trong xác định kết cấu của động cơ mẫu tập trung chủ yếu ở cụm vách ngăn. Theo các tài liệu có thể tiếp cận, ở nước ngoài, người ta đã sử dụng vách ngăn dạng van một chiều, vách ngăn phá hủy và vách ngăn đàn hồi. Các kết cấu vách ngăn này đều có yêu cầu cao cả về vật liệu và công nghệ do phải đảm bảo việc đóng kín và mở thông các buồng đốt theo đúng chế độ, đồng thời phải đảm bảo loa phụt không bị tác động không mong muốn do các dị vật có thể xuất hiện khi mở thông vách ngăn tạo ra. Căn cứ vào điều kiện thực tế, đối với động cơ mẫu được xây dựng, có thể kết cấu cụm vách ngăn dựa trên một đĩa mỏng làm bằng thép chịu nhiệt (phần kim loại), trên đó có các lỗ tạo sự liên thông giữa các buồng đốt (hình 3.1).



Hình 3.1. Cấu tạo cụm vách ngăn



Hình 3.2. Sơ đồ kết cấu động cơ mẫu thử nghiệm

1-Loa phụt; 2-Buồng đốt 1; 3-Liên nhiên liệu 1; 4-Thiết bị môi 1; 5-Vách ngăn; 6-Buồng đốt 2; 7-Liên nhiên liệu 2; 8-Thiết bị môi 2.

Các lỗ này được bịt kín bằng khối thuốc phóng cùng loại với thuốc phóng của nhiên liệu trong buồng 1 và cháy cùng với quá trình cháy của nhiên liệu này. Tại thời điểm kích hoạt buồng đốt 2, khối thuốc phóng bịt kín các lỗ thông sẽ còn khá mỏng,

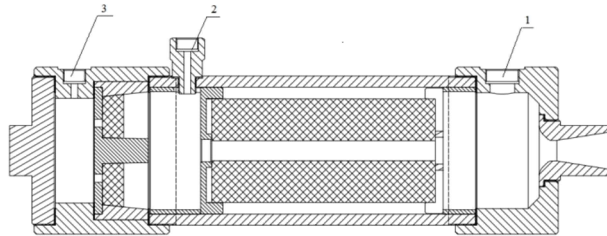
để dàng bị thổi bay, giải phóng các lỗ thông hai buồng đốt. Với kết cấu vách ngăn như này, có thể loại trừ về cơ bản các dị vật xuất hiện khi mở thông các buồng đốt.

Sơ đồ kết cấu động cơ mẫu được trình bày trên hình 3.2. Các thông số cơ bản của động cơ mẫu thử nghiệm được trình bày trong bảng 2.1 và 2.2.

3.2. Nghiên cứu thực nghiệm kết cấu vách ngăn

3.2.1. Thực nghiệm xác định bề dày của thuốc phóng trong vách ngăn

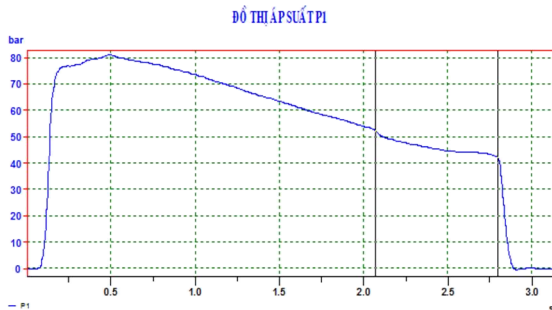
Động cơ mẫu thử nghiệm kết cấu vách ngăn có cấu tạo như trên hình 3.6, gồm: buồng đốt 1, khối vách ngăn và khối loa phụt. Tiến hành thí nghiệm sự hoạt động của động cơ mẫu với các bề dày cháy khác nhau của liều phóng trong vách ngăn, đo áp suất trong buồng đốt và tại vị trí sau vách ngăn (buồng trung gian).



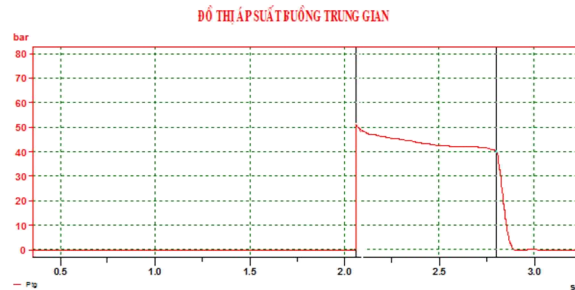
Hình 3.6. Động cơ mẫu thử nghiệm kết cấu vách ngăn

1- Vị trí lắp van an toàn, 2,3- Vị trí lắp cảm biến áp suất

* Phương án 1: Bề dày cháy của liều phóng trong vách ngăn $h=23$ mm



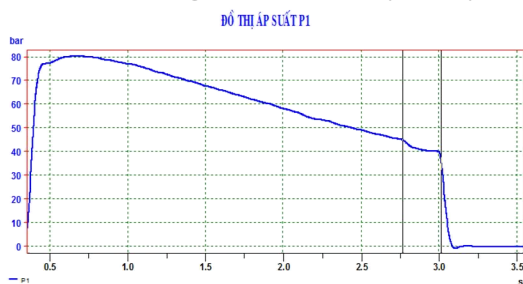
Hình 3.13. Đồ thị áp suất buồng đốt 1



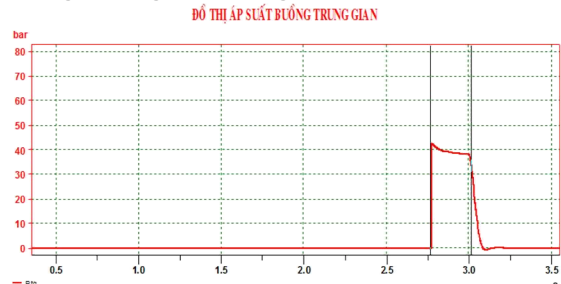
Hình 3.14. Đồ thị áp suất buồng trung gian

Nhận xét: Vách ngăn không đảm bảo bịt kín khi buồng đốt 1 làm việc, mà bị đánh thủng trước khi động cơ kết thúc quá trình làm việc một khoảng thời gian $\Delta t=0,73$ s.

* Phương án 2: Bề dày cháy của liều phóng trong vách ngăn $h=24$ mm



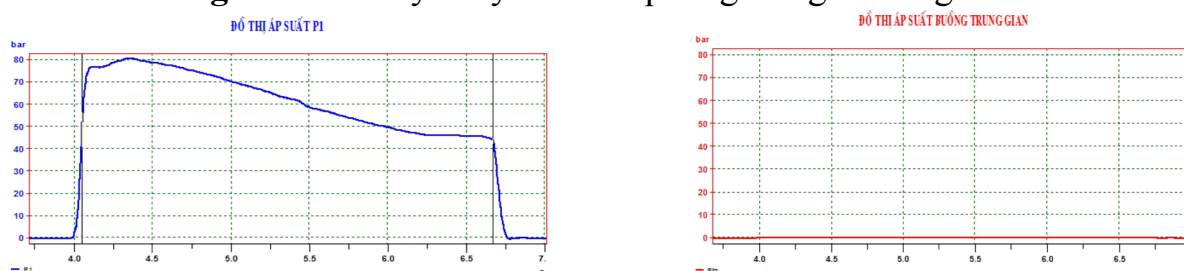
Hình 3.15. Đồ thị áp suất buồng đốt 1



Hình 3.16. Đồ thị áp suất buồng trung gian

Nhận xét: Vách ngăn không đảm bảo bịt kín khi buồng đốt 1 làm việc, mà bị đánh thủng trước khi động cơ kết thúc quá trình làm việc một khoảng thời gian $\Delta t=0,24$ s.

* **Phương án 3:** Bề dày cháy của liệu phóng trong vách ngăn $h=25$ mm

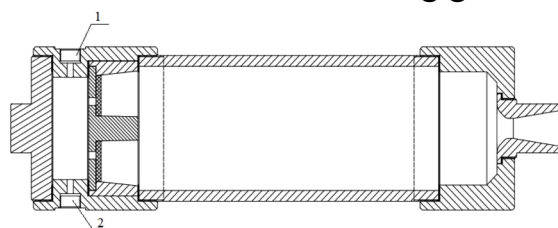


Hình 3.17. Đồ thị áp suất buồng đốt 1 Hình 3.18. Đồ thị áp suất buồng trung gian

Nhận xét: Không ghi nhận sự tăng áp suất trong buồng trung gian sau vách ngăn. Vách ngăn đảm bảo chức năng bịt kín trong toàn bộ quá trình làm việc của động cơ.

3.2.2. Thử nghiệm xác định áp suất mở thông vách ngăn

Động cơ mẫu gồm: Buồng đốt 1 không có liệu nhiên liệu 1, liệu phóng trong vách ngăn có bề dày 3,5 mm được nối với khối trung gian sau vách ngăn (Hình 3.19).



Hình 3.19. Sơ đồ thử nghiệm xác định áp suất mở thông vách ngăn
1- Vị trí bơm khí nén, 2- Vị trí đo áp suất

Bảng 3.5. Kết quả thử nghiệm xác định áp suất mở thông vách ngăn

Tham số/Lần thử nghiệm	Thử nghiệm lần 1	Thử nghiệm lần 2	Thử nghiệm lần 3
Áp suất mở thông vách ngăn, $10^5 Pa$	38,5	39,5	38
Áp suất trung bình, $10^5 Pa$	38,66		

Nhận xét: Với liệu phóng trong vách ngăn có bề dày 3,5 mm, áp suất mở thông vách ngăn trung bình là $38,66 \cdot 10^5 Pa$, tương đương với áp suất môi của động cơ ($40 \cdot 10^5 Pa$).

3.3. Nghiên cứu thực nghiệm đo áp suất, lực đẩy của động cơ mẫu thử nghiệm

Nghiên cứu thực nghiệm mô tả trường hợp 2 trong tính toán lý thuyết (đã trình bày trong mục 2.6, chương 2), khi buồng đốt 2 được kích hoạt sau khi thuốc phóng trong buồng đốt 1 đã cháy hết 1s.

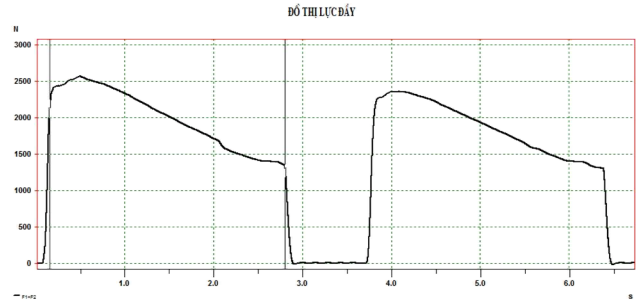
3.3.3. Kết quả thực nghiệm

Tiến hành thử nghiệm động cơ mẫu trên giá thử nghiệm cố định với 02 phát bắn.

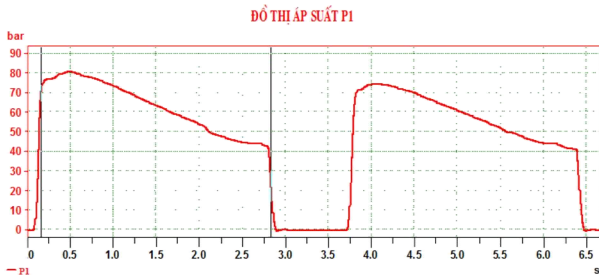
Kết quả thử nghiệm được thể hiện trên các hình 3.24, 3.25, 3.26 và 3.27.



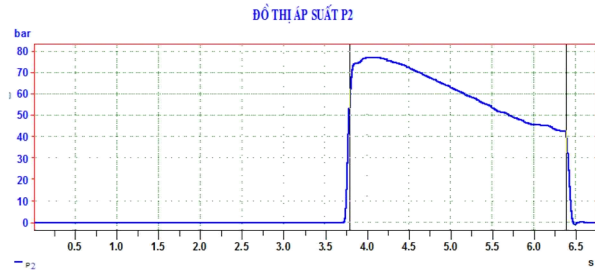
Hình 3.24. Động cơ mẫu hoạt động trong quá trình thử nghiệm



Hình 3.25. Đồ thị lực đẩy của động cơ mẫu



Hình 3.26. Đồ thị áp suất trong buồng đốt 1 động cơ mẫu



Hình 3.27. Đồ thị áp suất trong buồng đốt 2 động cơ mẫu

3.3.4 Phân tích và đánh giá kết quả thực nghiệm

Tổng hợp kết quả thử nghiệm của 02 phát bắn và so sánh với kết quả tính toán lý thuyết để xác định sai lệch giữa lý thuyết và thực nghiệm. Kết quả được trình bày trên bảng 3.7 và 3.8.

Bảng 3.7. So sánh kết quả đo áp suất và tính toán lý thuyết

Loại	Giai đoạn 1			Giai đoạn 2				
	P_{11max} (MPa)	P_{11tb} (MPa)	t_1 (s)	P_{12max} (MPa)	P_{12tb} (MPa)	P_{22max} (MPa)	P_{22tb} (MPa)	t_2 (s)
Phát 1	8,07	6,38	2,67	7,41	5,93	7,69	6,18	2,60
Phát 2	8,01	6,41	2,61	7,37	5,79	7,49	5,88	2,63
TB	8,04	6,40	2,64	7,39	5,86	7,59	6,03	2,62
TT	7,56	6,75	2,59	6,75	5,62	6,84	5,67	2,70
SL(%)	6,97	5,47	1,89	8,66	4,10	9,88	5,97	3,05

Bảng 3.8. So sánh kết quả đo lực đẩy và tính toán lý thuyết

Loại	Giai đoạn 1			Giai đoạn 2		
	P_{1max} (N)	P_{1tb} (N)	$I_{\Sigma 1}$ (Ns)	P_{2max} (N)	P_{2tb} (N)	$I_{\Sigma 2}$ (Ns)
Phát 1	2561	2031	5278	2353	1892	4845
Phát 2	2643	2113	5391	2433	1909	4928
TB	2602	2072	5334,5	2393	1900,5	4886,5
TT	2551	2109	5469	2284	1888	5068
SL(%)	1,96	1,79	2,52	4,55	0,66	3,71

Sau khi xử lý số liệu và lấy kết quả trung bình (hàng TB) so sánh với kết quả tính toán (hàng TT) cho thấy sai lệch (hàng SL) giữa kết quả tính toán và kết quả thử nghiệm ở mức độ hợp lý. Sai lệch áp suất giữa thực nghiệm và tính toán lý thuyết trong khoảng từ 1,89 đến 9,88. Sai lệch lực đẩy của động cơ giữa thực nghiệm và tính toán lý thuyết trong khoảng từ 0,66 đến 4,55. Điều này khẳng định độ tin cậy của mô hình toán đã được xây dựng.

3.4. Kết luận chương 3

1. Chương 3 đã xây dựng kết cấu động cơ mẫu thử nghiệm và xác định được các kích thước cơ bản của động cơ mẫu.

2. Thử nghiệm kiểm tra hoạt động của vách ngăn để xác định bề dày cháy của liệu phóng trong vách ngăn và thử nghiệm xác định áp suất mở thông vách ngăn khi kích hoạt buồng đốt 2. Qua đó xác định với kết cấu động cơ mẫu đã lựa chọn, bề dày của liệu phóng trong vách ngăn là 25 mm đảm bảo cho động cơ làm việc ổn định và áp suất mở thông vách ngăn trung bình là $38,6 \cdot 10^5 \text{Pa}$.

3. Đã thử nghiệm 02 phát bắn với động cơ mẫu được thiết kế, chế tạo. Kết quả thử nghiệm trên động cơ mẫu cho thấy, sai số giữa kết quả đo áp suất, lực đẩy với lý thuyết có giá trị tương đối nhỏ (dưới 10%). Điều này khẳng định mô hình toán được xây dựng có độ tin cậy cao, làm cơ sở cho những nghiên cứu tiếp theo đối với mẫu động cơ đã lựa chọn.

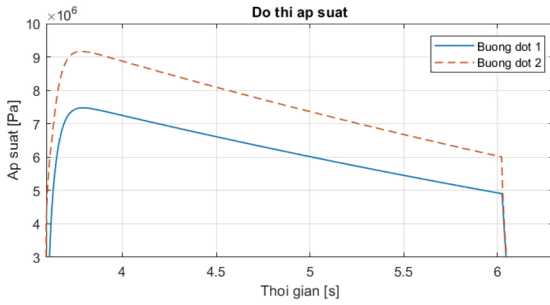
CHƯƠNG 4. NGHIÊN CỨU ẢNH HƯỞNG CỦA MỘT SỐ YẾU TỐ ĐẾN CHẾ ĐỘ LÀM VIỆC CỦA ĐỘNG CƠ TÊN LỬA NHIÊN LIỆU RẮN HAI BUỒNG ĐỐT LIÊN HỢP

4.1. Nghiên cứu ảnh hưởng của diện tích lưu thông giữa hai buồng đốt

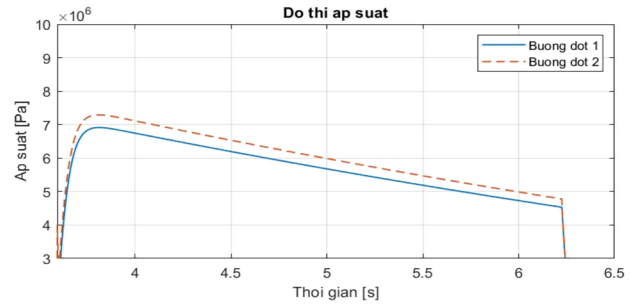
Hiệu ứng lưu thông khí thuộc giữa các buồng đốt phụ thuộc vào diện tích lưu thông F_{lt} trên cơ cấu vách ngăn và độ chênh áp suất giữa hai buồng đốt. Hiệu ứng này có thể đặc trưng bởi đại lượng $k_s = F_{lt}/F_{th}$ – tỷ lệ giữa diện tích tiết diện lưu thông với diện tích tiết diện tới hạn của loa phụt.

4.1.1. Xác định giá trị tới hạn k_s^*

Tiến hành giải hệ phương trình (2.60) với các điều kiện đơn trị của động cơ mẫu đã xây dựng. Khi đó, giá trị F_{lt} xác định qua tham số $k_s = F_{lt}/F_{th}$ được lựa chọn theo từng phương án tính toán với các giá trị cụ thể $k_s = 1; 2; 3; 4; 5; 6$.



Hình 4.1. Đồ thị áp suất trong giai đoạn 2 của động cơ, khi $k_s = 1$



Hình 4.2. Đồ thị áp suất trong giai đoạn 2 của động cơ, khi $k_s = 2$

Bảng 4.1. Áp suất trong các buồng đốt với các giá trị khác nhau của k_s

Tỷ số k_s	Áp suất p_{12max} , MPa	Áp suất p_{22max} , MPa	Độ chênh áp $p_{22max} - p_{12max}$, MPa	Độ chênh áp, %
1	7.84	9.16	1.32	14.41%
2	6.91	7.29	0.38	5.21%
3	6.81	6.97	0.16	2.30%
4	6.77	6.85	0.08	1.17%
5	6.75	6.81	0.06	0.88%
6	6.74	6.78	0.04	0.59%

Khi $k_s=5$, độ chênh lệch áp suất giữa hai buồng đốt là 0.88% ($< 1\%$). Do vậy, có thể xem như $k_s^* = 5$, nghĩa là khi $k_s > 5$, sự khác biệt áp suất giữa hai buồng đốt không đáng kể, động cơ hoạt động như động cơ một buồng đốt thông thường.

4.1.2. Xác định giá trị tới hạn k_s^{\min}

Giải hệ phương trình (2.60) tương tự như trong trường hợp xác định k_s^* với các giá trị $k_s < 1$. Để xác định giá trị giới hạn k_s^{\min} cần tính toán được tốc độ dòng khí lưu thông giữa hai buồng đốt.

Bảng 4.2. Tốc độ của dòng khí tại cửa vào buồng đốt 1

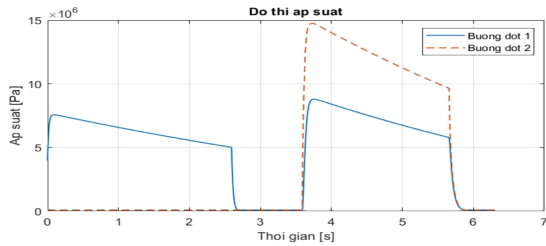
Tỷ số k_s	Vận tốc w_1 , m/s	Tốc độ âm thanh a_1 , m/s	Số Mach
0,5	1124	999	1.125
0,56	1001	1000	1.001
0,6	936	998	0.937
0,7	800	997	0.802
0,8	696	995	0.699
0,9	619	994	0.622

Khi $k_s = 0,56$ tương ứng với $M \approx 1$. Nếu $k_s < 0,56$ dòng khí có tốc độ $M > 1$, điều này dẫn đến sự xuất hiện hệ thống các bước nhảy nén trong buồng đốt 1. Vì vậy, có thể xem như $k_s^{\min} = 0,56$.

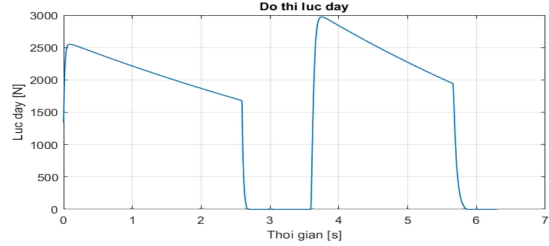
4.1.3. Khảo sát các chế độ làm việc của động cơ hai buồng đốt liên hợp trong vùng

$$k_s^{\min} < k_s < k_s^*$$

Khi $0,56 < k_s < 5$, lựa chọn các giá trị sau của tỷ số k_s để khảo sát: 0,6; 0,8, 1; 1,5; 3. Giải hệ phương trình (2.60) cho động cơ mẫu đã xây dựng với các trường hợp khác nhau của k_s , trong trường hợp buồng đốt 2 được kích hoạt sau khi buồng đốt cháy hết một khoảng thời gian 1s.



Hình 4.4. Đồ thị áp suất trong các buồng đốt của động cơ, khi $k_s = 0,6$



Hình 4.5. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $k_s = 0,6$

Bảng 4.3. Các tham số đặc trưng của động cơ trong giai đoạn 2 với các tỷ số k_s

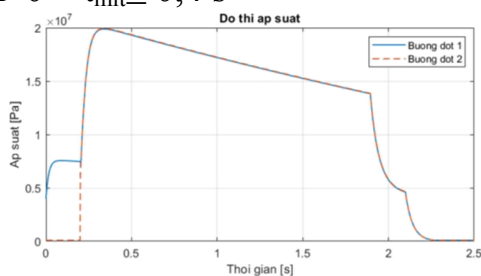
Tỷ số k_s	Áp suất p_{12tb} , MPa	Áp suất p_{12max} , MPa	Áp suất p_{22tb} , MPa	Áp suất p_{22max} , MPa	Lực đẩy P_{2tb} , N	Thời gian, s
0,6	7,20	8,79	12,159	14,75	2428	2,06
0,8	6,49	7,893	8,9	10,75	2186	2,3
1	6,15	7,475	7,58	9,159	2070	2,43
1,5	5,81	7,056	6,40	7,752	1953	2,58
3	5,64	6,804	5,75	6,972	1892	2,66

Nhận xét: Khi giảm k_s từ 3 đến 0,6, lực đẩy trung bình của động cơ tăng từ 1892 N đến 2428 N (tương ứng 22,08 %) và thời gian làm việc giai đoạn 2 của động cơ giảm từ 2,66 s đến 2,06 s (tương ứng với 29,13 %).

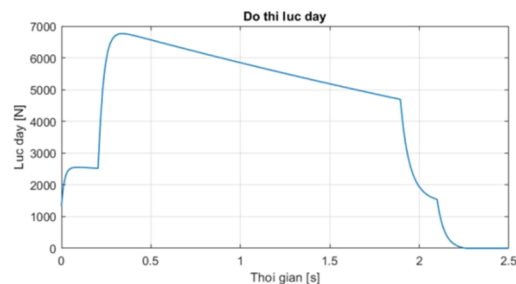
4.2. Ảnh hưởng của thời điểm kích hoạt buồng đốt 2

Thực hiện khảo sát quá trình làm việc của động cơ với các giá trị khác nhau của thời điểm kích hoạt buồng đốt 2 - giá trị t_{mlt} . Kết quả thu được như sau:

* Khi $0 < t_{mlt} \leq 0,4$ s

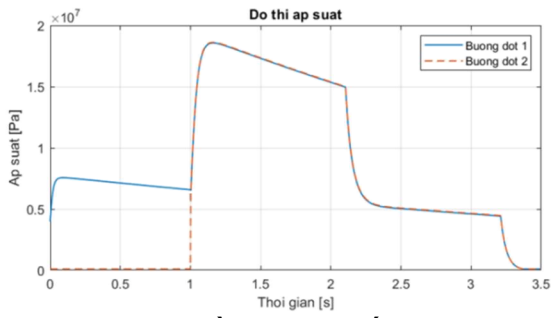


Hình 4.14. Đồ thị áp suất của động cơ, khi $t_{mlt} = 0,2$ s

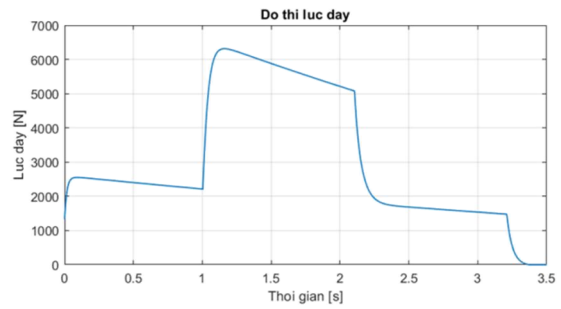


Hình 4.15. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $t_{mlt} = 0,2$ s

* Khi $0,4 < t_{mlt} < 2,3$ s

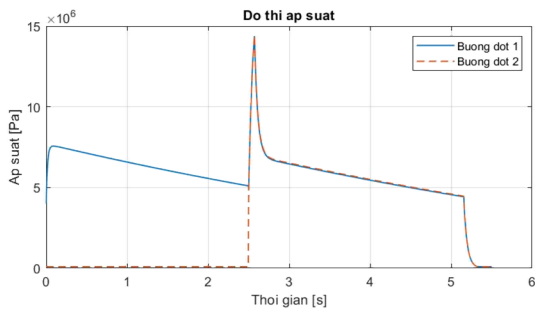


Hình 4.20. Đồ thị áp suất trong các buồng đốt của động cơ, khi $t_{mlt} = 1$ s

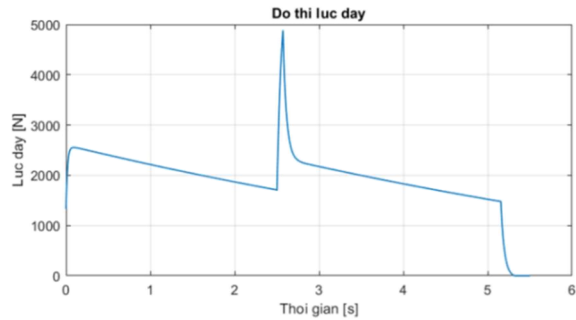


Hình 4.21. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $t_{mlt} = 1$ s

* Khi $2,3 \leq t_{mlt} < 2,59$ s

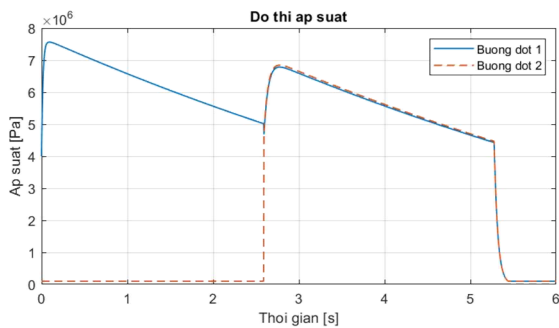


Hình 4.26. Đồ thị áp suất trong các buồng đốt của động cơ, khi $t_{mlt} = 2,5$ s

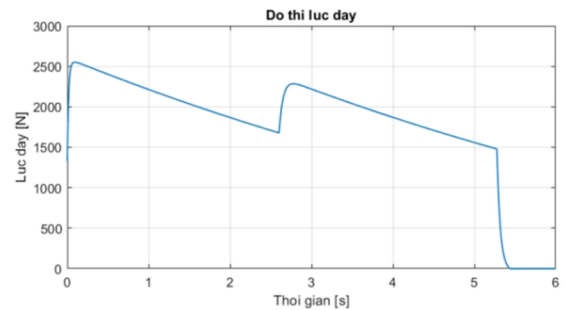


Hình 4.27. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $t_{mlt} = 2,5$ s

* Khi $2,59 \leq t_{mlt} < 2,68$ s

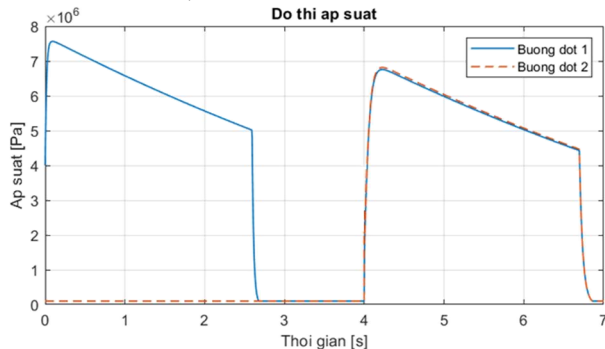


Hình 4.28. Đồ thị áp suất trong các buồng đốt của động cơ, khi $t_{mlt} = 2,59$ s

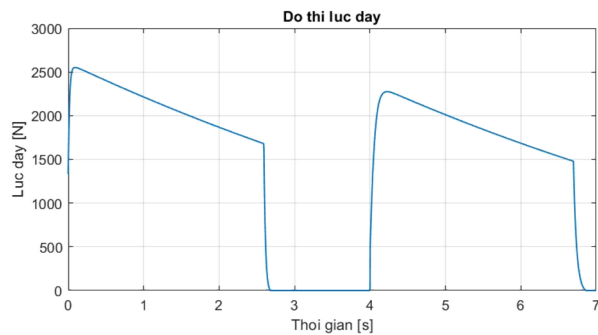


Hình 4.29. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $t_{mlt} = 2,59$ s

* Khi $t_{mlt} \geq 2,68$



Hình 4.36. Đồ thị áp suất trong các buồng đốt của động cơ, khi $t_{mlt} = 4$ s



Hình 4.37. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $t_{mlt} = 4$ s

Đối với động cơ mẫu đã được xây dựng, có thể rút ra một số nhận xét như sau về thời điểm kích hoạt buồng đốt 2:

+ Khi $0 < t_{mlt} \leq 0,4$: Động cơ có chế độ đơn xung với ba chế độ lực đẩy khác nhau, tuy nhiên áp suất trong giai đoạn 2 của động cơ tăng cao, xấp xỉ 20 MPa, có thể phá hủy thuốc phóng và kết cấu động cơ;

+ Khi $0,4 < t_{mlt} < 2,3$: Động cơ có chế độ đơn xung với ba chế độ lực đẩy khác nhau;

+ Khi $2,3 \leq t_{mlt} < 2,59$: Động cơ có pick áp suất cao;

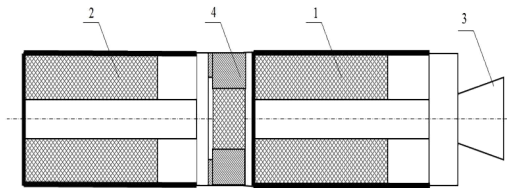
+ Khi $2,59 \leq t_{mlt} < 2,68$: Động cơ có chế độ đơn xung với hai chế độ khác nhau;

+ Khi $t_{mlt} \geq 2,68$: Động cơ có chế độ hai xung gián đoạn.

4.3. Khả năng ứng dụng một số chế độ làm việc của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp trong điều kiện hiện nay của nước ta

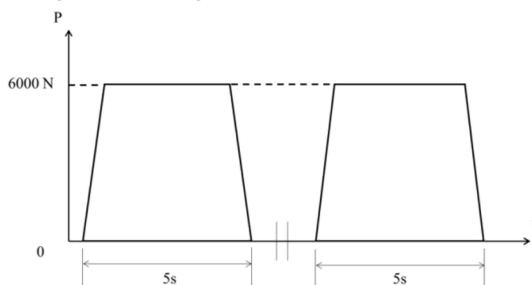
4.3.1. Ứng dụng chế độ lực đẩy hai xung tạo ra động cơ có hai xung cho tên lửa siêu thanh

Sử dụng liệu nhiên liệu dạng khe, kẹp chặt vỏ buồng đốt từ thuốc phóng RSI-12M đường kính 104mm với các độ dài khác nhau, dài nhất có thể lên đến $L=1300\text{mm}$ theo sơ đồ trên hình 4.38.

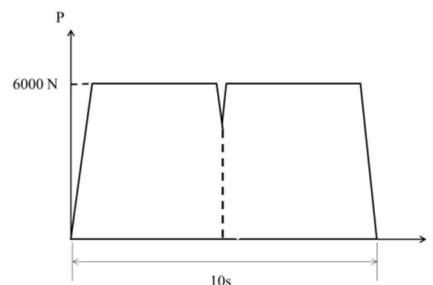


Hình 4.38. Sơ đồ ĐTRHBD liên hợp với các liệu dạng khe
1-Liệu dạng khe của buồng đốt 1, 2-Liệu dạng khe của buồng đốt 2
3-Loa phụt, 4-Vách ngăn

Động cơ được phác thảo có thể chứa đến 30kg thuốc phóng, tỷ số khối lượng nhiên liệu trên khối lượng chung toàn bộ động cơ có thể đạt đến 0,6. Lựa chọn diện tích lỗ thông trên vách ngăn trong vùng $k_s \geq k_s^*$ và thời điểm kích hoạt buồng đốt 2 sau thời điểm buồng đốt 1 kết thúc làm việc, nhận được đặc trưng lực đẩy của động cơ dạng hai xung như trên hình 4.39.



Hình 4.39. Đồ thị lực đẩy dạng hai xung của động cơ



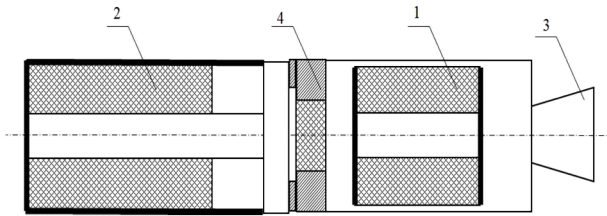
Hình 4.40. Đồ thị lực đẩy dạng đơn xung của động cơ

4.3.2. Ứng dụng chế độ lực đẩy đơn xung tạo ra động cơ lực đẩy lớn tác dụng trong thời gian dài

Với phương án động cơ như đã trình bày trên hình 4.38, bằng cách lựa chọn thời điểm kích hoạt buồng đốt 2 trong vùng kết thúc hoạt động của buồng đốt 1, có thể tạo ra động cơ đơn xung như trên hình 4.40.

4.3.3. Ứng dụng chế độ lực đẩy đơn xung tạo ra động cơ hành trình có hai chế độ lực đẩy

Động cơ có sơ đồ như trên hình 4.41, trong đó liệu nhiên liệu của buồng đốt 1 cháy đẳng diện, hạn chế cháy hai bề mặt đầu. Liệu nhiên liệu của buồng đốt 2 là liệu dạng hình khe, tương tự như trong mục 4.3.1.



Hình 4.41. Sơ đồ ĐTRHBD liên hợp với các liệu dạng khe và ống

1-Liệu dạng ống của buồng đốt 1, 2-Liệu dạng khe của buồng đốt 2, 3-Loa phụt, 4-Vách ngăn

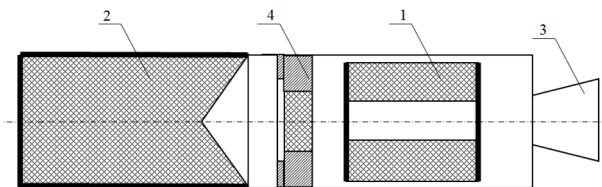


Hình 4.42. Đồ thị lực đẩy dạng đơn xung của động cơ hành trình

Bằng cách lựa chọn hệ số $k_s \geq k_s^*$ và thời điểm kích hoạt buồng đốt 2 trong vùng kết thúc làm việc của buồng đốt 1, nhận được hệ độ lực đẩy đơn xung như trên hình 4.42.

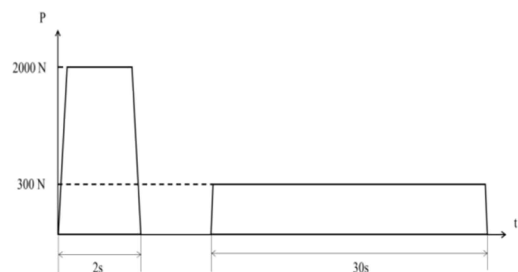
4.3.4. Ứng dụng chế độ lực đẩy hai xung tạo ra động cơ phóng và động cơ hành trình trong một động cơ hai buồng đốt liên hợp.

Động cơ có sơ đồ như trên hình 4.43, trong đó liệu nhiên liệu của buồng đốt 1 cháy đẳng diện, hạn chế cháy hai mặt đầu. Liệu nhiên liệu của buồng đốt 2 cháy đẳng diện từ một mặt đầu theo biên dạng như trên hình 4.43.



Hình 4.43. Sơ đồ ĐTRHBD liên hợp với các liệu dạng ống và trụ đặc

1-Liệu dạng ống của buồng đốt 1, 2-Liệu dạng trụ đặc của buồng đốt 2, 3-Loa phụt, 4-Vách ngăn



Hình 4.44. Đồ thị lực đẩy hai xung ĐTRHBD tích hợp ĐC phóng và hành trình

Bằng cách lựa chọn tỷ số k_s phù hợp trong khoảng $k_s^{\min} < k_s < k_s^*$ và thời điểm kích hoạt buồng đốt 2 sau khi buồng đốt 1 kết thúc làm việc, nhận được động cơ hai xung như trên hình 4.44.

4.4. Kết luận chương 4

1. Bằng cách thay đổi tỷ lệ diện tích lỗ thông trên vách ngăn so với diện tích tiết diện tới hạn của loa phụt động cơ, có thể thay đổi giá trị trung bình lực đẩy của động cơ trong giai đoạn 2 và thời gian làm việc tổng thể của động cơ.

2. Bằng việc thay đổi thời điểm kích hoạt buồng đốt 2 trong động cơ có thể điều chỉnh được chế độ làm việc của động cơ một cách đa dạng (chế độ đơn xung, hai xung gián đoạn) và khi đó thay đổi giá trị lực đẩy và thời gian làm việc của động cơ.

3. Với điều kiện hạn chế về công nghệ sản xuất thuốc phóng trong nước, sơ đồ ĐTRHBD liên hợp là một giải pháp cho chế độ lực đẩy đa dạng, có thể đáp ứng được các yêu cầu khác nhau của việc chương trình hóa lực đẩy.

KẾT LUẬN CHUNG VÀ KIẾN NGHỊ

I. Kết luận

1. Động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp có kết cấu gọn nhẹ, cấu tạo đơn giản, độ tin cậy làm việc và mức độ sẵn sàng chiến đấu cao, cho khả năng tạo được một hoặc hai xung lực đẩy có chế độ khác nhau tác dụng trong thời gian dài. Vì vậy, dạng động cơ này có khả năng đáp ứng yêu cầu chương trình hóa lực đẩy của tên lửa có điều khiển. Việc nghiên cứu làm chủ lý thuyết và công nghệ về động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp có ý nghĩa quan trọng trong, mở ra hướng thiết kế, chế tạo hệ thống động cơ có thời gian làm việc dài và lực đẩy đủ lớn.

2. Mô hình toán xác định các đặc trưng làm việc của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp được xây dựng trên cơ sở phân tích các quá trình bên trong các buồng đốt và các giả thiết cơ bản. Độ tin cậy của mô hình toán được kiểm chứng qua tính toán các tham số của động cơ mẫu và so sánh với kết quả đo khi nghiên cứu thực nghiệm.

3. Giải pháp vách ngăn được đề xuất cho động cơ mẫu thử nghiệm phù hợp công nghệ chế tạo trong nước, phục vụ cho việc thiết kế và chế tạo động cơ cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp.

4. Bằng cách thay đổi diện tích lưu thông khí trên vách ngăn của động cơ trong giới hạn nhất định có thể điều chỉnh được giá trị lực đẩy và thời gian làm việc của động cơ.

5. Thời điểm kích hoạt buồng đốt 2 trong động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp quyết định chế độ làm việc của động cơ: đơn xung hay hai xung.

6. Một số chế độ lực đẩy khả dụng của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp với thuốc phóng keo sản xuất trong nước có thể đáp ứng được yêu cầu chương trình hóa lực đẩy của tên lửa có điều khiển.

II. Những đóng góp mới của luận án

1. Xây dựng mô hình lý thuyết xác định các đặc trưng làm việc của động cơ nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp;

2. Xây dựng động cơ mẫu thử nghiệm với một giải pháp kỹ thuật kết cấu vách ngăn phù hợp với điều kiện công nghệ trong nước và tiến hành các nghiên cứu thực nghiệm trên động cơ mẫu;

3. Nghiên cứu ảnh hưởng của diện tích thông khí giữa hai buồng đốt và thời điểm kích hoạt buồng đốt 2 đến các chế độ làm việc ổn định của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp.

III. Kiến nghị về những vấn đề nghiên cứu tiếp theo

Cần tiếp tục nghiên cứu và giải quyết ở những công trình, luận án tiếp theo như:

1. Nghiên cứu hoàn thiện mô hình toán của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp có tính đến các hiện tượng, đặc điểm khác, như: liềm thuốc phóng trong các buồng đốt khác nhau, hiện tượng cháy xói mòn, hiệu ứng cháy hai pha,...

2. Nghiên cứu thực nghiệm các trường hợp khác nhau khi thay đổi diện tích thông khí và thời điểm kích hoạt buồng đốt 2;

3. Nghiên cứu thử nghiệm bắn bay tên lửa khi sử dụng động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp và so sánh hiệu quả với phương án sử dụng các động cơ một buồng đốt thông thường.

DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ

1. Nguyễn Thế Dũng, Phạm Thành Đồng, Trịnh Văn Khang. Mô phỏng chuyển động của dòng sản phẩm cháy trong buồng đốt 2 của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai chế độ lực đẩy, Tuyển tập công trình hội nghị khoa học cơ học thủy khí toàn quốc lần thứ 18, năm 2015.
2. Phạm Thành Đồng, Trịnh Văn Khang, Phạm Cao Thời, Nguyễn Thế Dũng. Mô phỏng dòng chảy của chất khí qua loa phụt động cơ tên lửa, Tuyển tập công trình hội nghị khoa học cơ học thủy khí toàn quốc lần thứ 18, năm 2015.
3. Nguyễn Thế Dũng, Nguyễn Ngọc Du và Đặng Ngọc Thanh. Nghiên cứu ảnh hưởng của diện tích cơ cấu nối thông các buồng đốt trong động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp, Tuyển tập công trình hội nghị khoa học cơ học thủy khí toàn quốc lần thứ 19, năm 2016.
4. Nguyễn Thế Dũng, Đặng Ngọc Thanh và Nguyễn Ngọc Du. Ảnh hưởng của thời điểm kích hoạt buồng đốt 2 đến quá trình làm việc của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp, Tạp chí Khoa Học và Kỹ thuật, Học viện KTQS số 187, 12/2017.
5. Nguyen The Dung, Dang Ngoc Thanh and Nguyen Ngoc Du. Interior ballistics calculations of the solid rocket engine with two combustion chambers, Journal of Science and Technique - Le Quy Don Technical University (Accepted)