

**LỜI CAM ĐOAN**

Tôi xin cam đoan đây là công trình nghiên cứu của riêng tôi, các số liệu và kết quả nêu trong luận án là trung thực và chưa từng được ai công bố ở bất kỳ công trình nào khác, các tài liệu tham khảo được trích dẫn đầy đủ.

*Hà Nội, ngày 12 tháng 5 năm 2021*

**Tác giả luận án**

**Nguyễn Thế Dũng**

## MỤC LỤC

	<i>Trang</i>
DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT .....	vi
DANH MỤC CÁC BẢNG.....	viii
DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ.....	ix
MỞ ĐẦU .....	1
Chương 1. TỔNG QUAN .....	5
1.1. Đặc trưng chung của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn .....	5
1.2. Các động cơ tên lửa nhiên liệu rắn điển hình của tên lửa có điều khiển .....	6
1.3. Động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp – đối tượng nghiên cứu của đề tài.....	10
1.4. Tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước về động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp.....	13
1.4.1. Ngoài nước .....	13
1.4.2. Trong nước .....	21
1.5. Luận giải về việc lựa chọn đề tài nghiên cứu của luận án .....	23
1.6. Kết luận chương 1 .....	25
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.....	26
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.....	27
2.2. Sơ đồ tính toán với các quan niệm và giả thiết cơ bản .....	31
2.3. Các phương trình mô tả quá trình làm việc của động cơ.....	33
2.3.1. Các phương trình cháy và tạo khí .....	33

2.3.2. Phương trình bảo toàn khối lượng của sản phẩm cháy trong động cơ.....	36
2.3.3. Phương trình bảo toàn năng lượng của sản phẩm cháy trong động cơ.....	38
2.4. Hệ phương trình thuật phóng trong của động cơ với các điều kiện đơn trị và phương pháp giải .....	44
2.4.1. Hệ phương trình với các điều kiện đơn trị.....	44
2.4.2. Phương pháp giải hệ phương trình và sơ đồ thuật toán .....	48
2.5. Tính toán lực đẩy của động cơ.....	50
2.6. Áp dụng mô hình toán xác định các đặc trưng làm việc của động cơ mẫu thử nghiệm.....	51
2.6.1. Sơ đồ cấu tạo và các tham số chính của động cơ.....	51
2.6.2. Kết quả tính toán .....	54
2.7 Kết luận chương 2 .....	59
Chương 3. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM.....	60
3.1. Xây dựng động cơ mẫu thử nghiệm.....	60
3.1.1. Xác định kết cấu động cơ mẫu.....	60
3.1.2. Xác định các thông số cơ bản của động cơ mẫu.....	63
3.2. Nghiên cứu thực nghiệm kết cấu vách ngăn.....	71
3.2.1. Thực nghiệm xác định bề dày của thuốc phóng trong vách ngăn .....	71
3.2.2. Thực nghiệm xác định áp suất mở thông vách ngăn .....	80
3.3. Nghiên cứu thực nghiệm đo áp suất, lực đẩy của động cơ mẫu thử nghiệm.....	81
3.3.1. Sơ đồ thực nghiệm .....	81
3.3.2. Hệ thống thiết bị đo.....	83
3.3.3. Kết quả thực nghiệm .....	84
3.3.4 Phân tích và đánh giá kết quả thực nghiệm .....	85

3.4. Kết luận chương 3 .....	87
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 .....	88
4.1. Nghiên cứu ảnh hưởng của diện tích lưu thông giữa hai buồng đốt.....	88
4.1.1. Xác định giá trị tới hạn $k_s^*$ .....	89
4.1.2. Xác định giá trị tới hạn $k_s^{\min}$ .....	91
4.1.3. Khảo sát các chế độ làm việc của động cơ hai buồng đốt liên hợp trong vùng $k_s^{\min} < k_s < k_s^*$ .....	92
4.2. Ảnh hưởng của thời điểm kích hoạt buồng đốt 2.....	97
4.2.1. Phương pháp khảo sát .....	97
4.2.2 Kết quả khảo sát ảnh hưởng của thời điểm kích hoạt buồng đốt 2	98
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.....	109
4.3.1. Ứng dụng chế độ lực đẩy hai xung tạo ra động cơ có hai xung cho tên lửa siêu thanh .....	109
4.3.2. Ứng dụng chế độ lực đẩy đơn xung tạo ra động cơ lực đẩy lớn tác dụng trong thời gian dài .....	110
4.3.3. Ứng dụng chế độ lực đẩy đơn xung tạo ra động cơ hành trình có hai chế độ lực đẩy .....	111
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.....	112
4.4. Kết luận chương 4 .....	114
KẾT LUẬN CHUNG VÀ KIẾN NGHỊ .....	116
DANH MỤC CÁC CÔNG TRÌNH ĐÃ CÔNG BỐ .....	118
TÀI LIỆU THAM KHẢO .....	119

PHỤ LỤC .....	1
Phụ lục 1: TÍNH TOÁN CÁC ĐẶC TRƯNG NHIỆT ĐỘNG HỌC THUỐC PHÓNG BẰNG PHẦN MỀM ASTRA .....	2
Phụ lục 2: CHƯƠNG TRÌNH TÍNH TOÁN CÁC ĐẶC TRƯNG LÀM VIỆC CỦA ĐỘNG CƠ HAI BUỒNG ĐỐT LIÊN HỢP .....	3
Phụ lục 3: KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM XÁC ĐỊNH BỀ DÀY LIỀU THUỐC PHÓNG TRONG VÁCH NGẮN .....	10
Phụ lục 4: KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM ĐO ÁP SUẤT, LỰC ĐẨY TRONG ĐỘNG CƠ MẪU.....	14

## DANH MỤC CÁC KÝ HIỆU, CÁC CHỮ VIẾT TẮT

$a$	- Tốc độ âm thanh [m/s].
$c_p$	- Nhiệt dung riêng đẳng áp [J/(kg.K)].
$c_v$	- Nhiệt dung riêng đẳng tích [J/(kg.K)].
$C_p$	- Hệ số lực đẩy của động cơ.
$d_{th}$	- Đường kính tiết diện tới hạn của loa phụt [m].
$F_{th}, F_a$	- Diện tích tiết diện tới hạn và tiết diện cửa ra của loa phụt [m <sup>2</sup> ].
$k$	- Chỉ số mũ đoạn nhiệt của sản phẩm cháy.
$K_0(k)$	- Hàm chỉ số mũ đoạn nhiệt.
$K_T$	- Hệ số phụ thuộc tốc độ cháy vào nhiệt độ ban đầu [1/K].
$\dot{m}_+, \dot{m}_-$	- Lưu lượng sinh khí của liều thuốc phóng và lưu lượng phụt khí qua loa phụt [kg/s].
$m_{trd}$	- Lưu lượng trao đổi khí giữa buồng đốt 1 và buồng đốt 2
$p$	- Áp suất trong buồng đốt, [Pa].
$p_{moi}$	- Áp suất môi [Pa].
$p_{mt}$	- Áp suất ban đầu [Pa].
$P$	- Lực đẩy của động cơ [N].
$P_1, P_2$	- Lực đẩy ở các giai đoạn 1, 2 [N].
$Q$	- Nhiệt lượng cháy của thuốc phóng [J/kg].
$R$	- Hằng số khí của sản phẩm cháy trong buồng đốt [J/(kg.K)].
$S_0, S_e$	- Diện tích bề mặt ban đầu, diện tích bề mặt cháy tại thời điểm cháy hết bề dày cháy $e$ của liều thuốc phóng [m <sup>2</sup> ].
$t_{dc}$	- Thời gian làm việc của động cơ và thời gian cháy [s].
$T_1$	- Nhiệt độ cháy của thuốc phóng [K].

$T_{g,1}, T_{g,2}$	- Nhiệt độ của sản phẩm cháy trong các buồng đốt [K].
$T_K$	- Nhiệt độ bề mặt trong vỏ buồng đốt [K].
$V$	- Thể tích của buồng đốt [m <sup>3</sup> ].
$u$	- Tốc độ cháy của thuốc phóng [m/s].
$u_1$	- Hệ số trong quy luật tốc độ cháy của thuốc phóng và của thuốc môi m/(s.Pa <sup>v</sup> )
$U$	- Nội năng của sản phẩm cháy [J/kg].
$\alpha_1, \alpha_2$	- Hệ số truyền nhiệt của hỗn hợp sản phẩm cháy tới bề mặt trong vỏ buồng đốt [W/(m <sup>2</sup> .K)].
$\alpha_{dl}, \alpha_{bx}$	- Hệ số truyền nhiệt đối lưu, hệ số truyền nhiệt bức xạ [W/(m <sup>2</sup> .K)].
$\lambda$	- Hệ số dẫn nhiệt của SPC [W/(m.K)].
$\nu$	- Số mũ trong quy luật tốc độ cháy của thuốc phóng
$\rho_T$	- Mật độ thuốc phóng [kg/m <sup>3</sup> ].
$\delta_1, \delta_2, \delta_3$	- Các chỉ số phụ xác định sự cháy của liều phóng 1, liều phóng 2 và sự trao đổi khí giữa 2 buồng đốt
ĐCTL	- Động cơ tên lửa.
ĐTR	- Động cơ tên lửa nhiên liệu rắn.
ĐTRHBD	- Động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt.
SPC	- Sản phẩm cháy.
CNQP	- Công nghiệp Quốc phòng

## DANH MỤC CÁC BẢNG

	<i>Trang</i>
Bảng 2.1. Các thông số chính của động cơ mẫu.....	52
Bảng 2.2. Các thông số chính của liều thuốc phóng trong vách ngăn.....	53
Bảng 2.3. Thành phần hóa học của thuốc phóng RSI-12M.....	53
Bảng 2.4. Các thông số đặc trưng của nhiên liệu.....	54
Bảng 3.1. Các tham số chính của vách ngăn.....	70
Bảng 3.2. Các tham số chính của động cơ mẫu thử nghiệm.....	71
Bảng 3.3. Các phương án kích thước liều phóng trong vách ngăn.....	73
Bảng 3.4. Các tham số cơ bản của cảm biến đo áp suất DA-10-08.....	75
Bảng 3.5. Kết quả thực nghiệm xác định áp suất mở thông vách ngăn.....	81
Bảng 3.6. Tính năng kỹ thuật của cảm biến đo lực.....	83
Bảng 3.7. So sánh kết quả đo áp suất và tính toán lý thuyết.....	85
Bảng 3.8. So sánh kết quả đo lực đẩy và tính toán lý thuyết.....	86
Bảng 4.1. Áp suất trong các buồng đốt với các giá trị khác nhau của $k_s$ .....	91
Bảng 4.2. Tốc độ của dòng khí tại cửa vào buồng đốt 1.....	92
Bảng 4.3. Các tham số đặc trưng của động cơ trong giai đoạn 2 với các tỷ số $k_s$ khác nhau.....	96
Bảng 4.4. Các tham số đặc trưng của động cơ khi $0 < t_{mlt} \leq 0,4$ s.....	100
Bảng 4.5. Các tham số đặc trưng của động cơ khi $0,4 < t_{mlt} < 2,3$ s.....	102
Bảng 4.6. Các tham số đặc trưng của động cơ khi $2,59 \leq t_{mlt} < 2,68$ s.....	106
Bảng 4.7. Các tham số đặc trưng của động cơ khi $t_{mlt} \geq 2,68$ s.....	108



## DANH MỤC CÁC HÌNH VẼ, ĐỒ THỊ

	<i>Trang</i>
Hình 1.1. Động cơ phóng của tên lửa Igla .....	7
Hình 1.2. Động cơ phóng của tên lửa đối hạm Kh-35 .....	7
Hình 1.3. Động cơ hành trình tên lửa chống tăng B72 .....	8
Hình 1.4. Đồ thị lực đẩy động cơ hành trình tên lửa chống tăng B72 .....	8
Hình 1.5. Sơ đồ kết cấu của động cơ hành trình tên lửa Igla.....	9
Hình 1.6. Đồ thị lực đẩy động cơ hành trình tên lửa Igla .....	9
Hình 1.7. Sơ đồ nguyên lý ĐTRHBD liên hợp.....	10
Hình 1.8. Đặc trưng lực đẩy hai xung của ĐTRHBD liên hợp.....	11
Hình 1.9. Đặc trưng lực đẩy đơn xung của ĐTRHBD liên hợp .....	12
Hình 1.10. Tên lửa siêu thanh Kh-15 .....	13
Hình 1.11. Tên lửa AGM-69 SRAM .....	14
Hình 1.12. Tên lửa PL-12 .....	15
Hình 1.13. ĐTRHBD liên hợp sử dụng vách ngăn bằng bột đá .....	16
Hình 1.14. ĐTRHBD liên hợp sử dụng vách ngăn dạng van một chiều .....	17
Hình 1.15. ĐTRHBD liên hợp sử dụng vách ngăn phá hủy .....	18
Hình 1.16. Sơ đồ ĐTRHBD liên hợp với vách ngăn đàn hồi .....	19
Hình 1.17. So sánh quan hệ vận tốc-quãng đường của tên lửa siêu thanh sử dụng ĐTRHBD liên hợp với ĐTR khởi động-hành trình .....	20
Hình 1.18. Sơ đồ ĐTRHBD liên hợp bằng cách ghép nối động cơ hành trình với động cơ phóng .....	21
Hình 1.19. Sơ đồ kết cấu tổ hợp động cơ vũ khí phá vật cản .....	22
Hình 1.20. Xung lực đẩy điển hình của tổ hợp động cơ vũ khí phá vật cản... ..	22
Hình 2.1. Sơ đồ nguyên lý cấu tạo ĐTRHBD liên hợp .....	27

Hình 2.2. Các vùng đặc trưng trong ĐTRHBĐ liên hợp.....	30
Hình 2.3. Sơ đồ tính toán của ĐTRHBĐ liên hợp.....	31
Hình 2.4. Sơ đồ thuật toán giải hệ PTVP tính toán thuật phóng trong.....	49
Hình 2.5. Sơ đồ tính toán lực đẩy của ĐTRHBĐ liên hợp.....	50
Hình 2.6. Sơ đồ kết cấu động cơ mẫu.....	52
Hình 2.7. Kết quả tính toán lý thuyết trường hợp 1.....	55
Hình 2.8. Kết quả tính toán lý thuyết trường hợp 2.....	56
Hình 2.9. Kết quả tính toán lý thuyết trường hợp 3.....	57
Hình 3.1. Cấu tạo cụm vách ngăn.....	62
Hình 3.2. Sơ đồ kết cấu động cơ mẫu thử nghiệm.....	63
Hình 3.3. Dòng sản phẩm cháy đi qua các lỗ thông trên vách ngăn.....	68
Hình 3.4. Kết cấu phần kim loại của vách ngăn giữa hai buồng đốt.....	69
Hình 3.5. Liều thuốc phóng trong vách ngăn.....	70
Hình 3.6. Động cơ mẫu thử nghiệm kết cấu vách ngăn.....	71
Hình 3.7. Các phương án vách ngăn với bề dày cháy khác nhau.....	73
Hình 3.8. Sơ đồ thử nghiệm động cơ.....	74
Hình 3.9. Cảm biến đo áp suất động cơ tên lửa DA-10-08.....	74
Hình 3.10. Hệ thống đo đa năng DEWE-4000.....	75
Hình 3.11. Hệ thống đo đa năng DEWE 4000 triển khai tại thực địa.....	75
Hình 3.12. Modul DAQN - BRIDGE.....	76
Hình 3.13. Đồ thị áp suất buồng đốt 1 khi $h=23$ mm.....	77
Hình 3.14. Đồ thị áp suất buồng trung gian khi $h=23$ mm.....	77
Hình 3.15. Đồ thị áp suất buồng đốt 1 khi $h=24$ mm.....	78
Hình 3.16. Đồ thị áp suất buồng trung gian khi $h=24$ mm.....	78
Hình 3.17. Đồ thị áp suất buồng đốt 1 khi $h=25$ mm.....	79
Hình 3.18. Đồ thị áp suất buồng trung gian khi $h=25$ mm.....	79
Hình 3.19. Sơ đồ thử nghiệm xác định áp suất mở thông vách ngăn.....	80

Hình 3.20. Động cơ mẫu thử nghiệm.....	82
Hình 3.21. Sơ đồ thử nghiệm động cơ mẫu trên giá đo .....	82
Hình 3.22. Cảm biến đo lực ĐL-20kN.....	83
Hình 3.23. Động cơ mẫu hoạt động trong quá trình thử nghiệm.....	84
Hình 3.24. Đồ thị lực đẩy của động cơ mẫu .....	84
Hình 3.25. Đồ thị áp suất trong buồng đốt 1 động cơ mẫu.....	84
Hình 3.26. Đồ thị áp suất trong buồng đốt 2 động cơ mẫu.....	85
Hình 4.1. Đồ thị áp suất giai đoạn 2 của động cơ, khi $k_s = 1$ .....	90
Hình 4.2. Đồ thị áp suất giai đoạn 2 của động cơ, khi $k_s = 2$ .....	90
Hình 4.3. Đồ thị áp suất giai đoạn 2 của động cơ, khi $k_s = 3$ .....	90
Hình 4.4. Đồ thị áp suất trong các buồng đốt của động cơ, khi $k_s = 0,6$ .....	93
Hình 4.5. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $k_s = 0,6$ .....	93
Hình 4.6. Đồ thị áp suất trong các buồng đốt của động cơ, khi $k_s = 0,8$ .....	93
Hình 4.7. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $k_s = 0,8$ .....	94
Hình 4.8. Đồ thị áp suất trong các buồng đốt của động cơ, khi $k_s = 1$ .....	94
Hình 4.9. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $k_s = 1$ .....	94
Hình 4.10. Đồ thị áp suất trong các buồng đốt của động cơ, khi $k_s = 1,5$ .....	95
Hình 4.11. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $k_s = 1,5$ .....	95
Hình 4.12. Đồ thị áp suất trong các buồng đốt của động cơ, khi $k_s = 3$ .....	95
Hình 4.13. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $k_s = 3$ .....	96
Hình 4.14. Đồ thị áp suất của động cơ, khi $t_{mlt} = 0,2s$ .....	98
Hình 4.15. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $t_{mlt} = 0,2s$ .....	99
Hình 4.16. Đồ thị áp suất của động cơ, khi $t_{mlt} = 0,3s$ .....	99
Hình 4.17. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $t_{mlt} = 0,3s$ .....	99
Hình 4.18. Đồ thị áp suất của động cơ, khi $t_{mlt} = 0,4s$ .....	100
Hình 4.19. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $t_{mlt} = 0,4s$ .....	100
Hình 4.20. Đồ thị áp suất của động cơ, khi $t_{mlt} = 1 s$ .....	101

Hình 4.21. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $t_{mlt} = 1s$ .....	101
Hình 4.22. Đồ thị áp suất của động cơ, khi $t_{mlt} = 2s$ .....	101
Hình 4.23. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $t_{mlt} = 2s$ .....	102
Hình 4.24. Đồ thị áp suất của động cơ, khi $t_{mlt} = 2,3s$ .....	103
Hình 4.25. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $t_{mlt} = 2,3s$ .....	103
Hình 4.26. Đồ thị áp suất của động cơ, khi $t_{mlt} = 2,5s$ .....	104
Hình 4.27. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $t_{mlt} = 2,5s$ .....	104
Hình 4.28. Đồ thị áp suất của động cơ, khi $t_{mlt} = 2,59s$ .....	104
Hình 4.29. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $t_{mlt} = 2,59s$ .....	105
Hình 4.30. Đồ thị áp suất của động cơ, khi $t_{mlt} = 2,6s$ .....	105
Hình 4.31. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $t_{mlt} = 2,6s$ .....	105
Hình 4.32. Đồ thị áp suất của động cơ, khi $t_{mlt} = 2,68s$ .....	106
Hình 4.33. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $t_{mlt} = 2,68 s$ .....	107
Hình 4.34. Đồ thị áp suất của động cơ, khi $t_{mlt} = 3 s$ .....	107
Hình 4.35. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $t_{mlt} = 3s$ .....	107
Hình 4.36. Đồ thị áp suất của động cơ, khi $t_{mlt} = 4 s$ .....	108
Hình 4.37. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi $t_{mlt} = 4s$ .....	108
Hình 4.38. Sơ đồ ĐTRHBD liên hợp với các liều dạng khe .....	109
Hình 4.39. Đồ thị lực đẩy dạng hai xung của động cơ .....	110
Hình 4.40. Đồ thị lực đẩy dạng đơn xung của động cơ .....	111
Hình 4.41. Sơ đồ ĐTRHBD liên hợp với các liều dạng khe và ống.....	111
Hình 4.42. Đồ thị lực đẩy dạng đơn xung của động cơ hành trình.....	112
Hình 4.43. Sơ đồ ĐTRHBD liên hợp với các liều dạng ống và trụ đặc .....	113
Hình 4.44. Đồ thị lực đẩy hai xung ĐTRHBD tích hợp ĐC phóng và hành trình .....	113

## MỞ ĐẦU

### 1. Tính cấp thiết của đề tài luận án

Xuất phát từ yêu cầu của nhiệm vụ bảo vệ tổ quốc và thực trạng vũ khí trang bị của lực lượng vũ trang hiện nay, Đảng và Nhà nước ta chủ trương xây dựng một nền công nghiệp quốc phòng có đủ năng lực từng bước tự chế tạo được các loại vũ khí trang bị cần thiết, trong đó thiết kế chế tạo tên lửa là một trong những nhiệm vụ hàng đầu. Chiến lược trang bị của Quân đội ta đã xác định một trong những nhiệm vụ trọng tâm của Công nghiệp Quốc phòng (CNQP) là: Từng bước phát triển ngành công nghiệp chế tạo tên lửa của đất nước, bắt đầu từ các bước lắp ráp tiến tới chế tạo các loại tên lửa phòng không tầm thấp mang vác, tên lửa chống tăng có độ chính xác cao, tầm bắn xa,... Tiếp theo sẽ phát triển khả năng chế tạo các loại tên lửa phòng không tầm trung, tên lửa đối hạm có tầm bắn và sức công phá trong phạm vi các công ước quốc tế mà Việt Nam tham gia.

So với các tên lửa không điều khiển, các tên lửa có điều khiển đặt ra những yêu cầu rất khác đối với hệ thống động cơ. Sự khác biệt lớn nhất là động cơ cho các tên lửa có điều khiển cần có khả năng làm việc theo các chế độ lực đẩy khác nhau và hoạt động trong thời gian đủ dài. Ngoài ra, trong nhiều trường hợp, động cơ cần có khả năng điều khiển véc tơ lực đẩy theo yêu cầu do động lực học bay của tên lửa đặt ra.

Hiện nay, CNQP nước ta chưa làm chủ được công nghệ sản xuất thuốc phóng hỗn hợp cho các loại nhiên liệu của động cơ. Loại nhiên liệu này duy nhất được Viện Thuốc phóng thuốc nổ nghiên cứu và chế tạo thử nghiệm liệu hành trình cho động cơ của tên lửa Iгла, chưa thể mở rộng áp dụng cho các loại tên lửa khác. Trên quy mô công nghiệp, CNQP mới chỉ chế tạo, sản

xuất thuốc phóng keo. Tuy nhiên, với công nghệ hiện tại của nhà máy Z195 Tổng cục CNQP, chỉ có thể tạo hình các thỏi thuốc phóng có kích thước không lớn (giới hạn đường kính ngoài đến 104mm, đường kính trong 18mm), chỉ cho khả năng tạo ra các động cơ có thời gian làm việc không vượt quá 2-2,5s với các sơ đồ liều phóng đặt tự do trong buồng đốt.

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 non yếu và nhiều hạn chế, cần phải nghiên cứu và áp dụng 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 sơ đồ kết cấu hai buồng đốt riêng biệt, liên kết với nhau bởi vách ngăn. Kết cấu động cơ này cho khả năng tạo ra động cơ có một hoặc hai xung lực đẩy có chế độ khác nhau tác dụng trong thời gian có thể gấp đôi so với động cơ tên lửa nhiên liệu rắn thông thường ở cùng một giới hạn về bề dày cháy của liều nhiên liệu. Hướng nghiên cứu này đã được giới thiệu trong một số tài liệu [32], [33], [34], [35], [36], [37], tuy nhiên mới chỉ đưa ra sơ đồ kết cấu và một số kết quả thử nghiệm, chưa có các nghiên cứu lý thuyết đầy đủ về sơ đồ động cơ này.

Việc nghiên cứu áp dụng sơ đồ động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp sẽ là giải pháp khả thi và hữu hiệu cho phép giải quyết một loạt các nhiệm vụ của kỹ thuật tên lửa đặt ra từ thực tiễn hiện nay. Do đó, động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp được lựa chọn là đối tượng nghiên cứu của luận án và đề tài “***Khảo sát chế độ làm việc ổn định của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn có sơ đồ liên hợp với liều phóng cơ bản làm từ thuốc phóng keo***” có tính cấp thiết, có ý nghĩa khoa học và ý nghĩa thực tiễn cao.

## **2. Mục tiêu 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.

## **3. Nội dung nghiên cứu của luận án**

Nội dung nghiên cứu chính của 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 tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp;
- 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 tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp;

## **4. Đối tượng và phạm vi nghiên cứu**

- 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.

## **5. Phương pháp nghiên cứu**

Sử dụng phương pháp nghiên cứu lý thuyết kết hợp với phương pháp nghiên cứu thực nghiệm;

- Nghiên cứu lý thuyết: Nghiên cứu các mô hình hiện có, vận dụng các phương pháp hiện đại cùng với sự trợ giúp của các phương tiện và phần mềm tính toán, mô phỏng nhằm đưa ra mô hình bài toán sát với thực tế;

- Phần thực nghiệm: Đo đạc, xử lý và kiểm tra độ tin cậy của kết quả lý thuyết bằng thực nghiệm.

## **6. Ý nghĩa khoa học và ý nghĩa thực tiễn**

• Ý nghĩa khoa học:

- Góp phần làm sáng tỏ cơ sở lý thuyết về động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp;

- Đưa ra phương pháp phân tích, khảo sát các yếu tố ảnh hưởng đến các chế độ làm việc của động cơ;

- Góp phần bổ sung, hoàn thiện lý thuyết về động cơ tên lửa và có thể sử dụng làm tài liệu tham khảo phục vụ cho công tác nghiên cứu, giảng dạy.

• Ý nghĩa thực tiễn:

- Góp phần xây dựng cơ sở lý thuyết phục vụ cho việc làm chủ thiết kế chế tạo động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp;

- 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.

## **7. Bố cục của luận án**

Ngoài phần mở đầu và kết luận, luận án gồm bốn chương, cụ thể các chương như sau:

Chương I: Tổng quan

Chương II: Mô hình toán xác định các đặc trưng làm việc của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp

Chương III: Nghiên cứu thực nghiệm

Chương IV: Khảo sát 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.



## **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. Chúng có mặt trong hầu hết các loại tên lửa và đang được phát triển để thay thế các loại động cơ tên lửa nhiên liệu lỏng (ĐTL) nhằm tạo ra các tổ hợp tên lửa mới, hiện đại trang bị cho quân đội. Chúng cũng được sử dụng làm các thiết bị động lực của các khí cụ bay khác nhau trong kỹ thuật hàng không vũ trụ.

Đặc điểm lớn nhất của loại động cơ này là kết cấu nhỏ gọn, cấu tạo đơn giản, ít bộ phận hợp thành, không cần đến các hệ thống cung cấp và phun nhiên liệu phức tạp như các loại động cơ phản lực khác dùng một hoặc vài thành phần nhiên liệu lỏng. Nhờ đặc điểm này, ĐTR có 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.

Tính chất nhỏ gọn trong kết cấu và đơn giản trong cấu tạo của động cơ ĐTR được quy định bởi sơ đồ phối trí của động cơ, theo đó, toàn bộ dữ trữ nhiên liệu của động cơ được bố trí dưới dạng liều nhiên liệu rắn nạp sẵn trong buồng đốt. Liều nhiên liệu có thể lập thành từ một hoặc vài đơn nguyên được tạo ra và nạp vào buồng đốt theo phương pháp phù hợp với tính chất của các liều nhiên liệu rắn được sử dụng. Với các nhiên liệu rắn đồng thể (thuốc phóng keo), liều nhiên liệu được tạo hình trước bằng công nghệ đùn ép rồi nạp vào buồng đốt. Đối với các loại nhiên liệu rắn dị thể (thuốc phóng hỗn hợp), liều nhiên liệu có thể tạo hình trước trong khuôn đúc rồi nạp vào buồng đốt hoặc có thể đúc rót trực tiếp vào buồng đốt.

Đặc trưng làm việc của ĐTR gắn liền với tính chất cháy của liều nhiên liệu. Do khả năng tự duy trì của các phản ứng cháy (không phụ thuộc vào

các yếu tố bên ngoài) và hiệu ứng bề mặt của sự cháy nhiên liệu rắn, ĐTR sau khi được kích hoạt sẽ tự hoạt động liên tục với các thông số làm việc chịu sự chi phối rất lớn của bản chất loại nhiên liệu rắn được sử dụng và quy luật thay đổi bề mặt của liềm nhiên liệu trong quá trình cháy. Tương ứng với điều đó, nói chung, ĐTR là loại động cơ đơn xung có thể được chương trình hóa bằng cách lựa chọn phù hợp loại nhiên liệu rắn và hình dạng kết cấu cụ thể của liềm nhiên liệu.

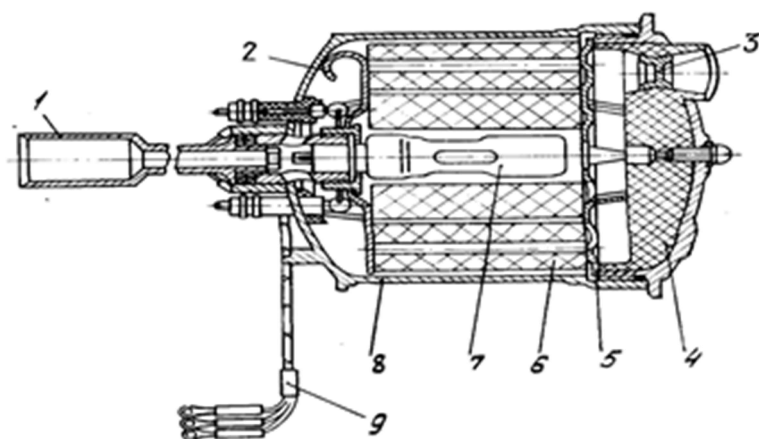
Một đặc điểm quan trọng của ĐTR là cường độ làm việc rất cao của buồng đốt và loa phụt. Áp suất trong buồng đốt của động cơ ĐTR thường không nhỏ hơn  $40 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  và có thể đạt tới  $150\text{-}200 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ . Nhiệt độ sản phẩm cháy trong buồng đốt xấp xỉ  $2000\text{-}3000 \text{ K}$ . Lưu chuyển của sản phẩm cháy qua loa phụt có tốc độ lên đến hàng nghìn  $m/s$  [19], [24]. Với cường độ làm việc như vậy, ĐTR có khả năng tạo ra lực đẩy rất lớn, có thể lên tới hàng chục và hàng trăm tấn, thỏa mãn những yêu cầu đặc biệt về gia tốc nhanh cho chuyển động của tên lửa hoặc khí cụ bay. Tuy nhiên, điều này cũng tạo ra những khó khăn không nhỏ trong việc lựa chọn các vật liệu kết cấu và các giải pháp bảo vệ nhiệt cho kết cấu khi thiết kế chế tạo động cơ.

## **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. Đặc điểm chung của các động cơ này là có xung lực đẩy đơn giản tác dụng trong thời gian rất ngắn, thường chỉ từ một đến vài giây. Các

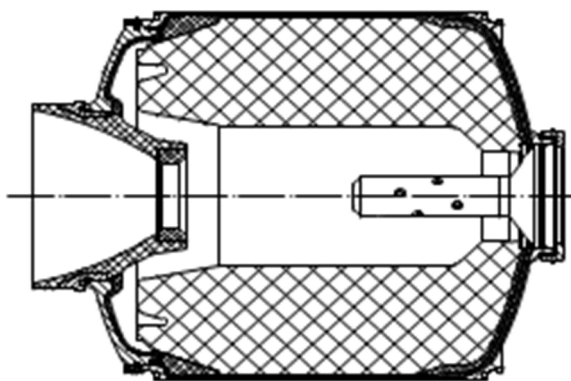
động cơ phóng nói chung cấu tạo theo sơ đồ liều đặt tự do trong buồng đốt, trong đó, liều nhiên liệu được lập thành bởi một hoặc nhiều ống trụ làm từ thuốc phóng keo. Trên hình 1.1 trình bày sơ đồ cấu tạo động cơ phóng của tên lửa phòng không tầm thấp Igla [11], [56].



Hình 1.1. Động cơ phóng của tên lửa Igla

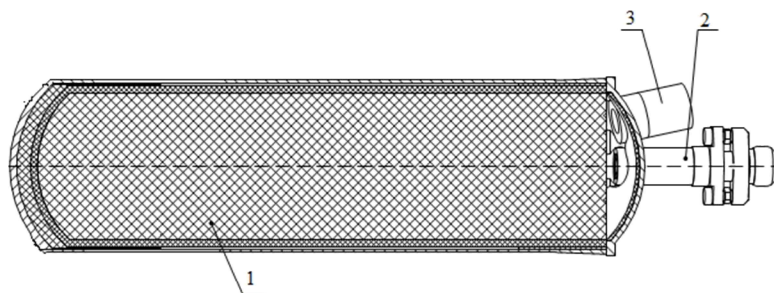
1-Ống dẫn khí; 2-Đĩa chắn trước; 3-Nắp bịt loa phụt; 4-Khối loa phụt; 5-Đĩa chắn sau; 6-Liều phóng; 7-Cơ cấu mồi; 8-Buồng đốt; 9-Cụm đầu nối điện

Trong những năm gần đây, nhiều loại tên lửa hiện đại như các tên lửa đối hạm K.310 (Yakhon) và Kh-35 (Urane) sử dụng động cơ phóng có liều nhiên liệu làm từ thuốc phóng hỗn hợp kẹp chặt vỏ buồng đốt (hình 1.2) cho phép đạt được hiệu quả cao hơn.

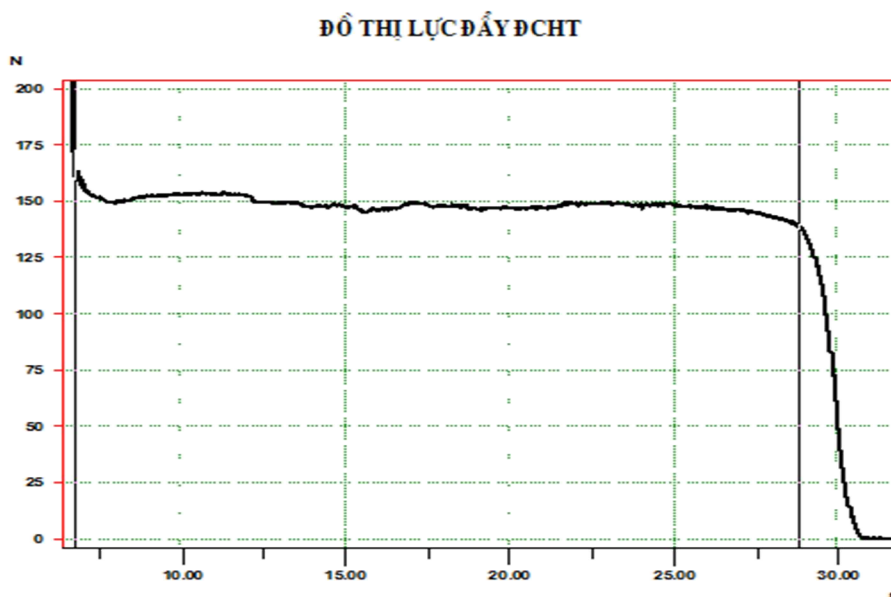


Hình 1.2. Động cơ phóng của tên lửa đối hạm Kh-35

Đối với động cơ hành trình nhiên liệu rắn của các tên lửa có điều khiển, đặc trưng chung nhất là thời gian hoạt động dài (có thể đến hàng chục giây và cao hơn), 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. Để tạo ra các chế độ lực đẩy khác nhau (thường là một hoặc hai chế độ) trong một xung lực đẩy có độ dài xung lớn, động cơ thường được cấu tạo theo sơ đồ kẹp chặt trong buồng đốt, trong đó sự cháy xảy ra trên một mặt đầu có dạng hình học phức tạp của liệu nhiên liệu. Hình 1.3 và hình 1.4 cho thấy cấu tạo và xung lực đẩy điển hình của động cơ hành trình của tên lửa chống tăng B72 [7].

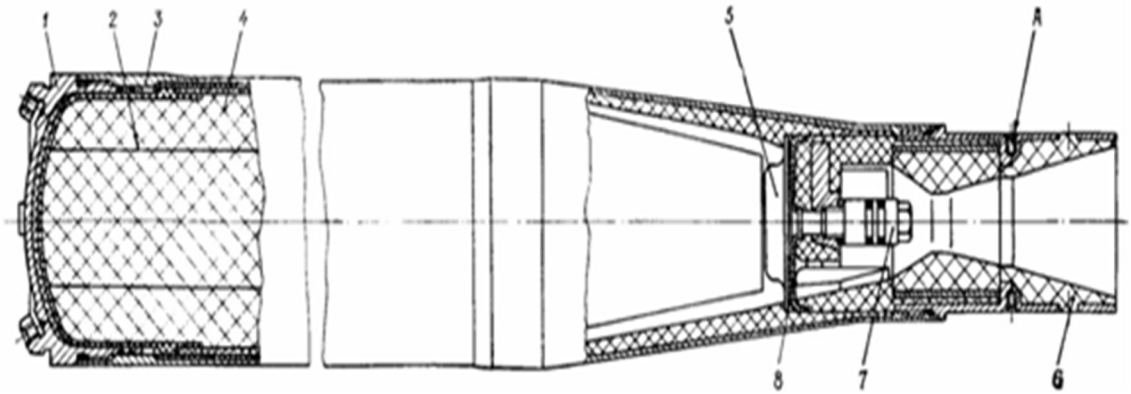


Hình 1.3. Động cơ hành trình tên lửa chống tăng B72  
1-Liệu nhiên liệu, 2-Loa phụt, 3-Thiết bị môi



Hình 1.4. Đồ thị lực đẩy động cơ hành trình tên lửa chống tăng B72

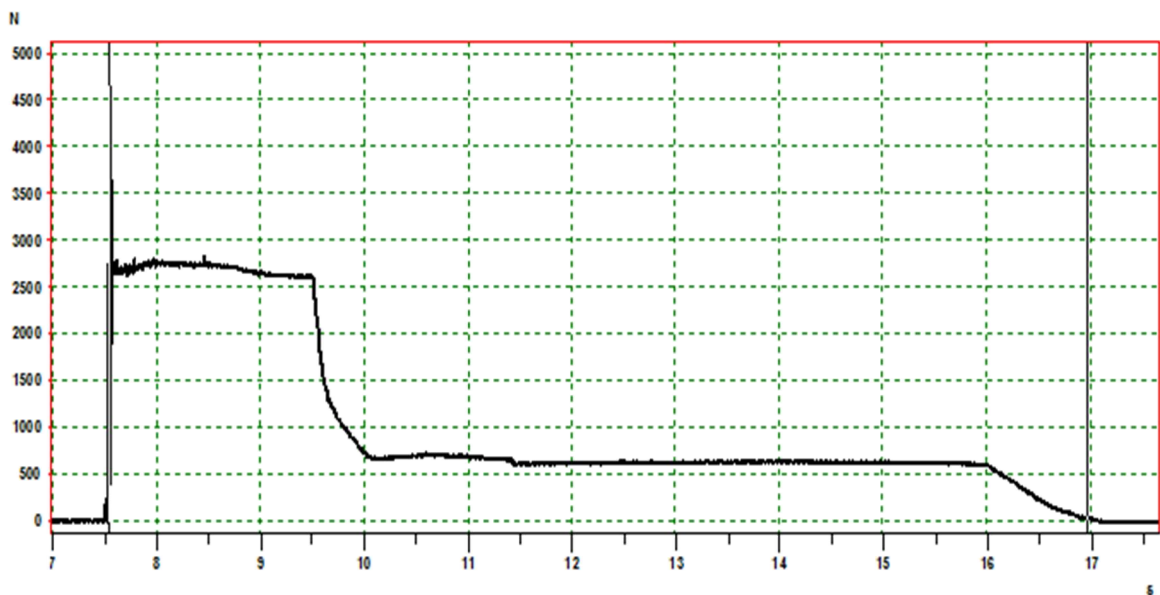
Trên hình 1.5 và 1.6, trình bày cấu tạo và xung lực đẩy điển hình của động cơ hành trình tên lửa Igla [11], [56].



Hình 1.5. Sơ đồ kết cấu của động cơ hành trình tên lửa Igla

- |                      |                  |                          |
|----------------------|------------------|--------------------------|
| 1-Đáy trước động cơ; | 2-Dây dẫn nhiệt; | 3-Buồng đốt;             |
| 4-Liều phóng;        | 5-Cơ cấu mồi;    | 6-Khối loa phụt;         |
| 7-Trụ cháy chậm;     | 8-Nắp bịt;       | A-Rãnh ren lắp khối cánh |

ĐỒ THỊ LỰC ĐẨY



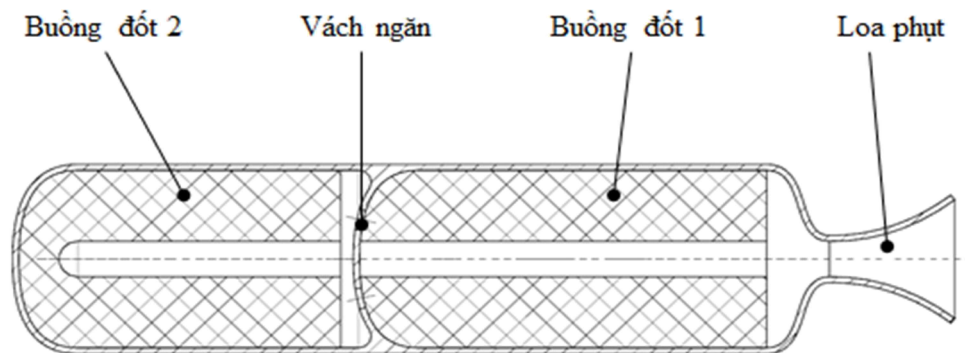
Hình 1.6. Đồ thị lực đẩy động cơ hành trình tên lửa Igla

*Nhận xét:* Các động cơ phóng của các tên lửa có điều khiển thường có lực đẩy lớn, thời gian làm việc ngắn trong khi các động cơ hành trình có lực đẩy nhỏ, thời gian làm việc dài.

### 1.3. Động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp – đối tượng nghiên cứu của đề tài

Như đã biết, ĐTR nói chung là những động cơ đơn xung, mỗi động cơ chỉ tạo ra một xung lực đẩy. Do đó, để thực hiện chương trình bay theo yêu cầu, tên lửa có điều khiển được trang bị một hệ thống nhiều động cơ, gồm động cơ phóng, động cơ hành trình và nhiều trường hợp còn có động cơ tăng tốc cho tên lửa đạt tốc độ siêu thanh trong giai đoạn tiếp cận mục tiêu. Ngoài trừ các tên lửa cỡ nhỏ, tầm gần (như các tên lửa có điều khiển chống tăng, tên lửa phòng không tầm thấp), các tên lửa lớn, tầm bắn xa đều cấu trúc dưới dạng tên lửa nhiều tầng, các tầng được cắt bỏ dần sau khi động cơ trên tầng đó làm việc xong để giảm tiêu tốn vô ích xung lực đẩy của tầng tiếp theo. Cấu trúc như vậy làm phức tạp sơ đồ phối trí kết cấu của tên lửa, làm tăng thêm các bộ phận phụ trợ gắn liền với hệ thống tách tầng, giảm độ tin cậy thực hiện chức năng của tên lửa.

Gắn liền với điều đó, người ta đã nghiên cứu phát triển loại động cơ tên lửa nhiên liệu rắn có hai hoặc nhiều 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 liều 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

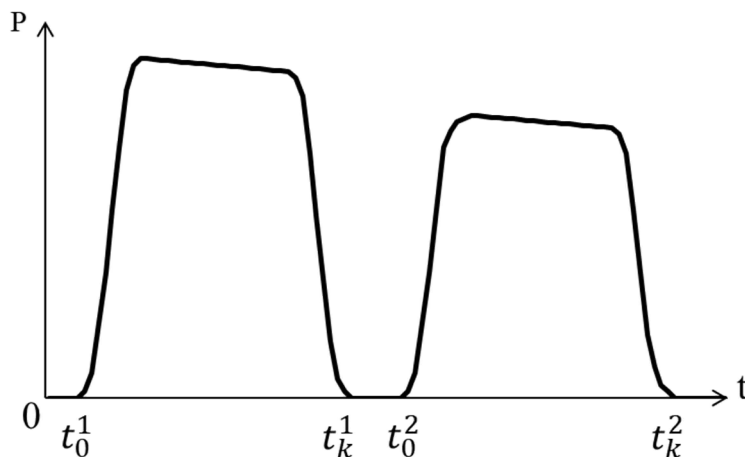


Hình 1.7. Sơ đồ nguyên lý ĐTRHBĐ liên hợp

Quá trình làm việc của động cơ bắt đầu bằng việc kích hoạt buồng đốt 1 (buồng đốt sơ cấp). Khi đó, vách ngăn cách ly hoàn toàn buồng đốt 2 (buồng đốt thứ cấp) 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.

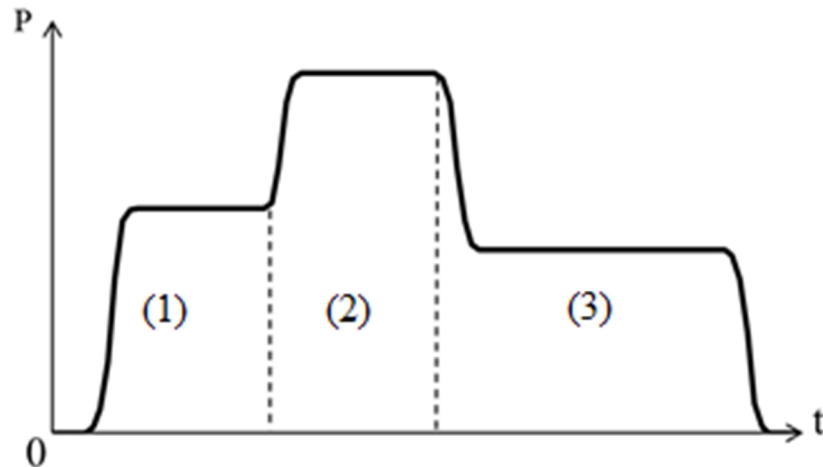
Phụ thuộc vào thời điểm kích hoạt buồng đốt 2, động cơ có thể có các chế độ làm việc như sau:

*Trường hợp 1:* Buồng đốt 2 được kích hoạt sau một khoảng thời gian giữ chậm  $\Delta t$  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  $\Delta t$  (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

*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 (đơn xung) với các chế độ có thể khác nhau của lực đẩy tương ứng với các giai đoạn cháy của hai liều nhiên liệu trong hai buồng đốt (hình 1.9).



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

- 1- Giai đoạn cháy riêng lẻ của liệu nhiên liệu trong buồng đốt 1
- 2- Giai đoạn cháy đồng thời của cả hai liệu nhiên liệu trong hai buồng đốt
- 3- Giai đoạn cháy riêng lẻ của liệu nhiên liệu trong buồng đốt 2

Từ sơ đồ và nguyên lý hoạt động của ĐTRHBĐ liên hợp có thể thấy:

1) So với động cơ tên lửa nhiên liệu rắn một buồng đốt thông thường, loại động cơ này chỉ có thêm chi tiết vách ngăn liên kết hai buồng đốt, còn các bộ phận khác không có gì khác biệt;

2) Trên một động cơ có thể tạo ra một hoặc hai xung lực đẩy với các chế độ lực đẩy khác nhau, mở rộng đáng kể khả năng đáp ứng yêu cầu chương trình hóa lực đẩy của tên lửa có điều khiển;

3) Khi sử dụng động cơ này, cho phép tăng thời gian tác dụng của lực đẩy lên gấp đôi so với động cơ thông thường trong cùng một điều kiện giới hạn bề dày cháy của liệu nhiên liệu.

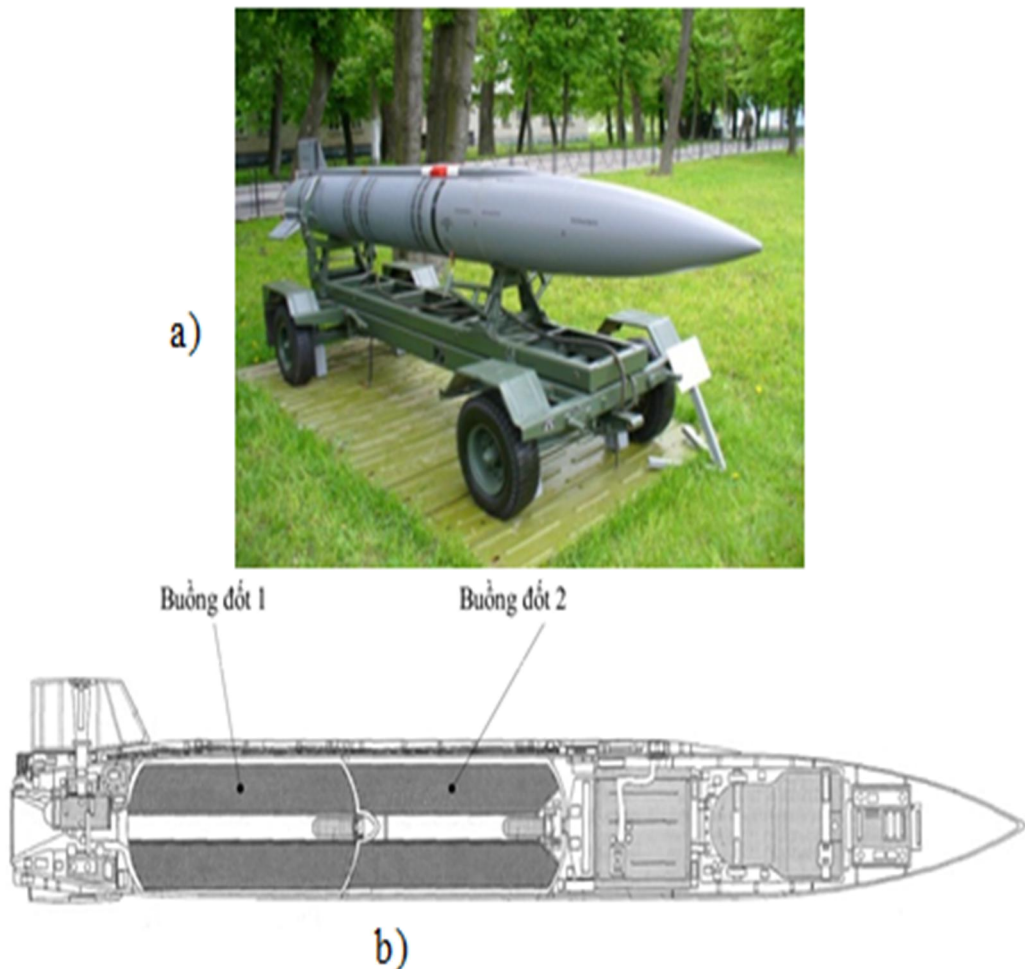
Với các đặc điểm này, ĐTRHBĐ liên hợp thu hút sự chú ý khi nghiên cứu các giải pháp kết cấu đối với tên lửa có điều khiển, đặc biệt trong điều kiện hạn chế về công nghệ chế tạo liệu nhiên liệu như đối với nền CNQP của nước ta hiện nay.



## 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

ĐTRHBĐ 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,... Theo các tài liệu có thể tiếp cận [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 (hình 1.10).



Hình 1.10. Tên lửa siêu thanh Kh-15

- a- Dạng ngoài của tên lửa
- b- Sơ đồ cấu tạo của tên lửa

Các tên lửa này dùng động cơ có sơ đồ ĐTRHBD liên hợp dạng hai xung (ký hiệu ĐTR-160), cho phép tên lửa đạt tốc độ  $M=5$  khi tiếp cận mục tiêu ở cự ly 300 km. Các tên lửa Kh-15 và Kh-15S được trang bị trên các máy bay chiến đấu tầm xa Tu-95MS, Tu-22M3 và Tu-160.

Cũng theo các tài liệu có thể tiếp cận [43], hãng Boeing đã phát triển loại tên lửa siêu thanh AGM-69 SRAM cho quân đội Mỹ (hình 1.11) dùng động cơ nhiên liệu rắn hai xung SR75-LP-1 do Tập đoàn Lockheed Martin chế tạo với vách ngăn dạng đàn hồi.



Hình 1.11. Tên lửa AGM-69 SRAM

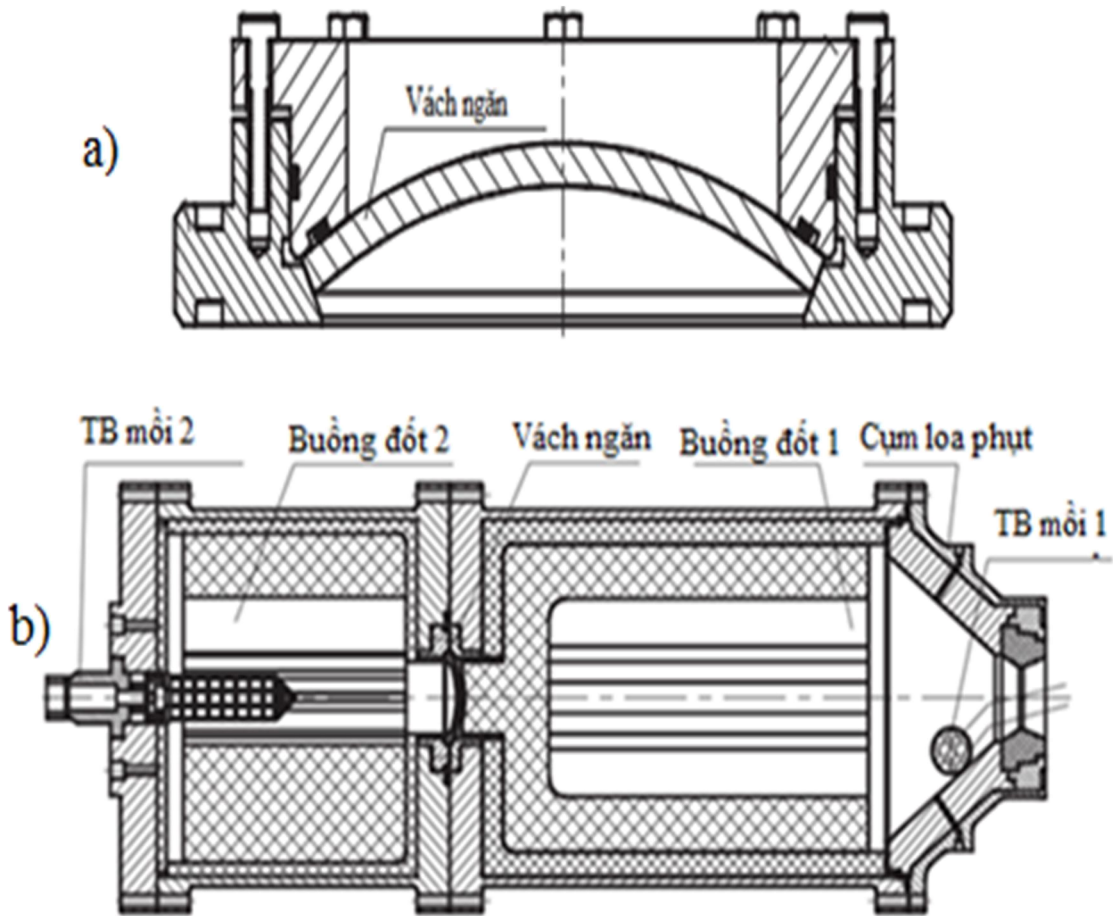
Tên lửa AGM-69 SRAM có tốc độ  $M=3$ , tầm bắn xấp xỉ 200 km, được trang bị trên máy bay chiến đấu F-111 và các máy bay ném bom chiến lược B-52 và B-1.

Những năm gần đây, Trung quốc đã phát triển một số loại tên lửa siêu thanh lớp không đối không, sử dụng động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai xung như: tên lửa PL-12 tầm bắn 70 km và tên lửa PL-15 tầm bắn 400 km [44], [45], [46] (hình 1.12).



Hình 1.12. Tên lửa PL-12

Để có được các loại tên lửa này trong trang bị Quân đội, có thể nhận thấy rằng, ở các nước Nga, Mỹ và Trung Quốc, việc nghiên cứu về ĐTRHBD liên hợp đã được thực hiện với nhiều thành tựu trong tính toán thiết kế, thử nghiệm kết cấu và công nghệ chế tạo. Tuy nhiên, chúng hoàn toàn không được công bố trong các tài liệu lưu hành công khai có thể tiếp cận, ngoại trừ công trình công bố năm 2011 trên tạp chí Acta Astronautica của nhóm tác giả Chang Hui Wang và các cộng sự ở Đại học Hàng không vũ trụ Bắc Kinh về thiết kế và thử nghiệm khối vách ngăn của động cơ ĐTRHBD liên hợp [37]. Trong công trình này, nhóm nghiên cứu đã thiết kế chế tạo động cơ thử nghiệm với vách ngăn làm bằng bột đá có biên dạng hình chòm cầu (hình 1.13). Kết quả đo áp suất trong các buồng đốt của động cơ thử nghiệm đã cho thấy vách ngăn thực hiện chức năng một cách an toàn, động cơ thử nghiệm hoạt động ổn định theo chế độ tính toán.



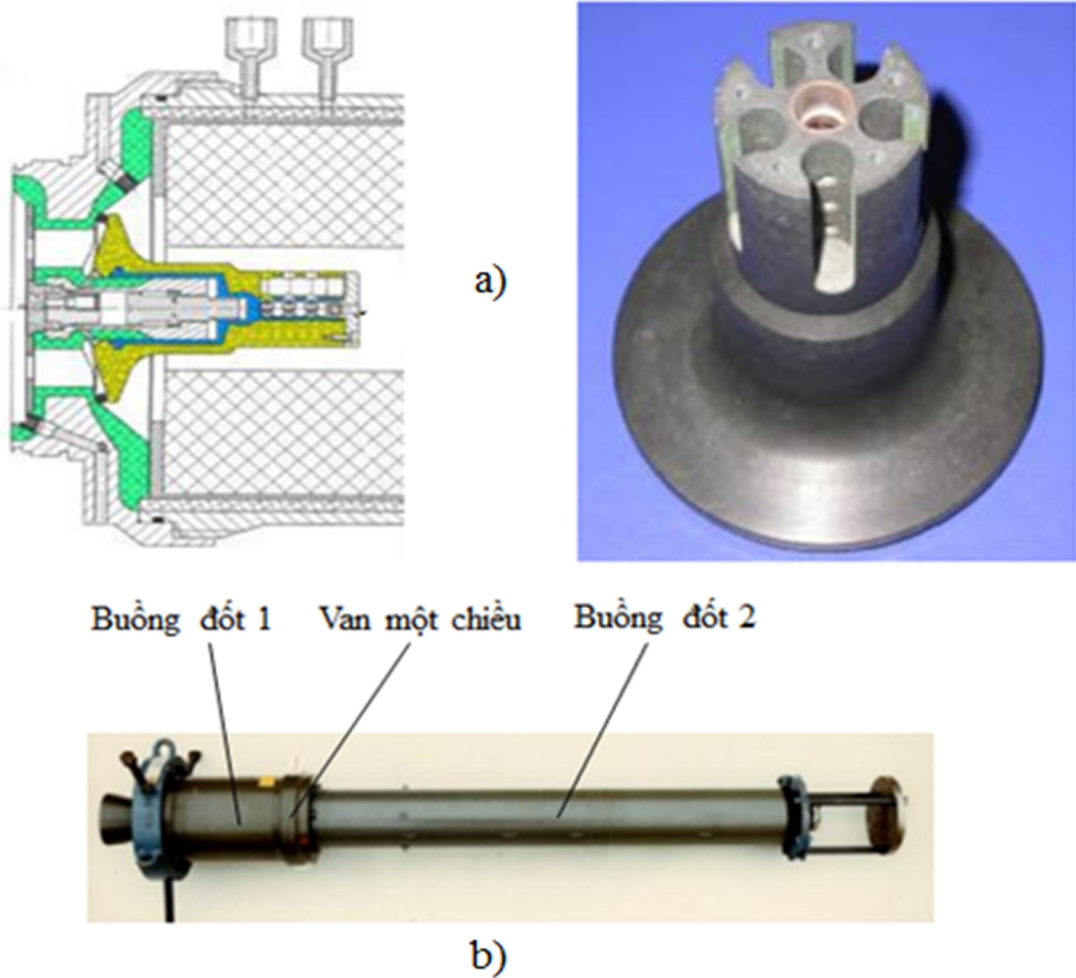
Hình 1.13. ĐTRHBĐ liên hợp sử dụng vách ngăn bằng bột đá

a -Cơ cấu vách ngăn

b-Động cơ thử nghiệm

Ngoài các nước Nga, Mỹ và Trung Quốc, một số nước khác cũng hướng nghiên cứu vào các động cơ có sơ đồ hai buồng đốt liên hợp. Ở châu Âu, Viện nghiên cứu Bayer-Chemie thuộc tập đoàn MBDA có trụ sở ở Đức, đã công bố trên tạp chí Hàng không vũ trụ AIAA nhiều công trình nghiên cứu về ĐTRHBĐ 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 công trình này trình bày các nghiên cứu cụ thể 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.

Các kết cấu khác nhau của vách ngăn giữa hai buồng đốt đã được nghiên cứu thử nghiệm bao gồm loại vách ngăn dạng van một chiều, vách ngăn dạng phá hủy và vách ngăn đàn hồi. Trên hình 1.14. trình bày kết cấu vách ngăn dạng van một chiều và động cơ mẫu thử nghiệm của nó.

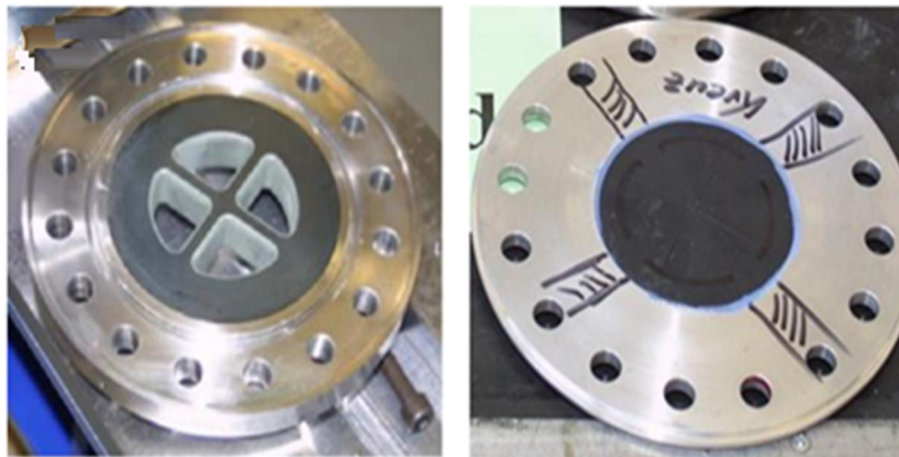
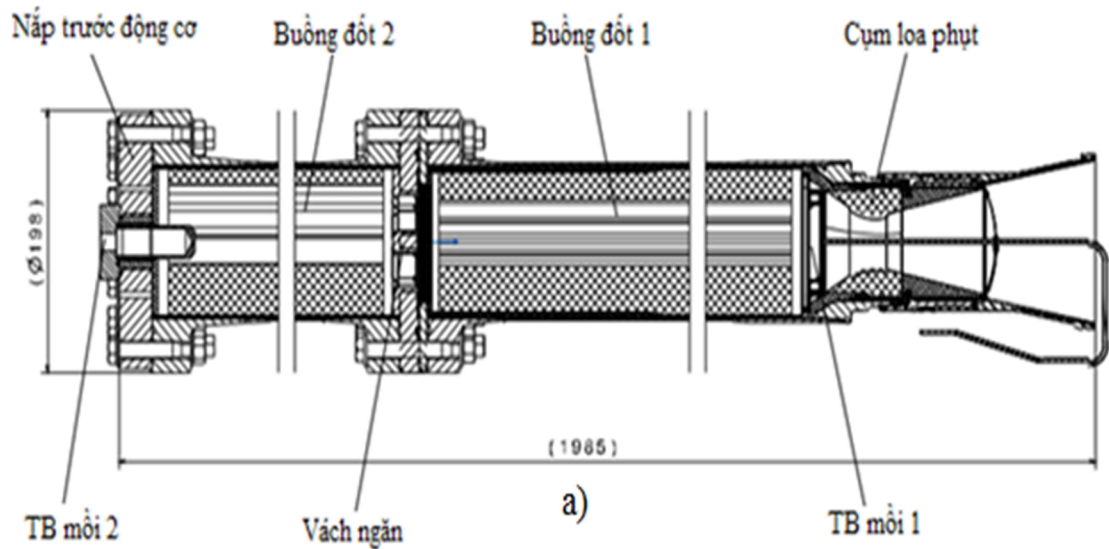


Hình 1.14. ĐTRHBD liên hợp sử dụng vách ngăn dạng van một chiều  
a-Vách ngăn dạng van một chiều

b-Động cơ mẫu thử nghiệm vách ngăn van một chiều

Khi buồng đốt 1 hoạt động, van một chiều đóng kín cách ly hoàn toàn buồng đốt 2 với buồng đốt 1 đang hoạt động. Khi kích hoạt thiết bị môi của buồng đốt 2 đặt trong van một chiều, van được mở tạo ra sự liên thông hai buồng đốt.

Hình 1.15 là sơ đồ kết cấu động cơ mẫu của Viện nghiên cứu Bayer-Chemie với vách ngăn dạng phá hủy dùng màng nhôm.

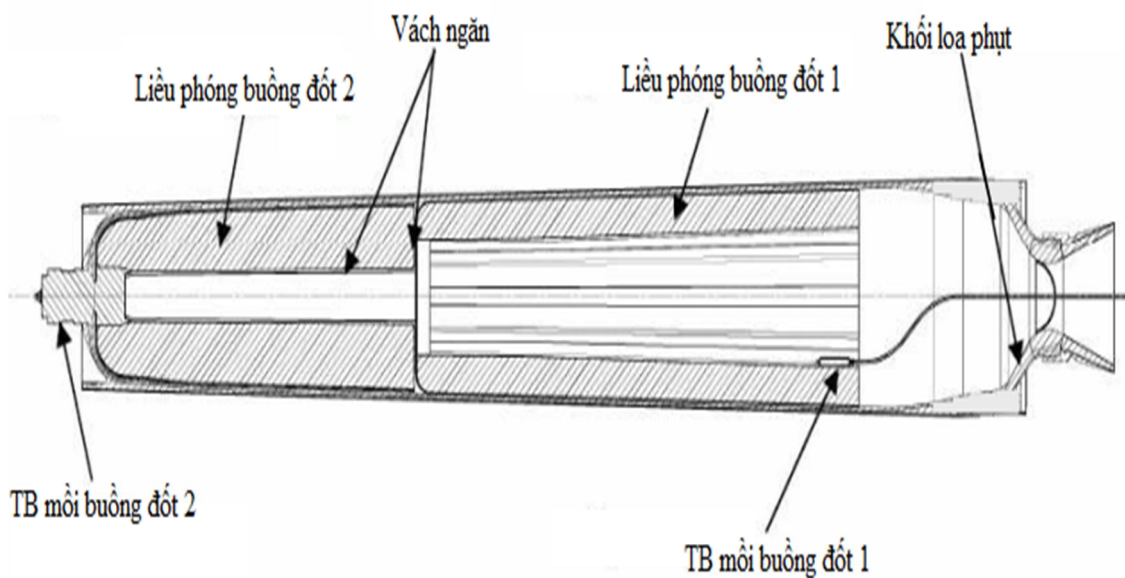


b)

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

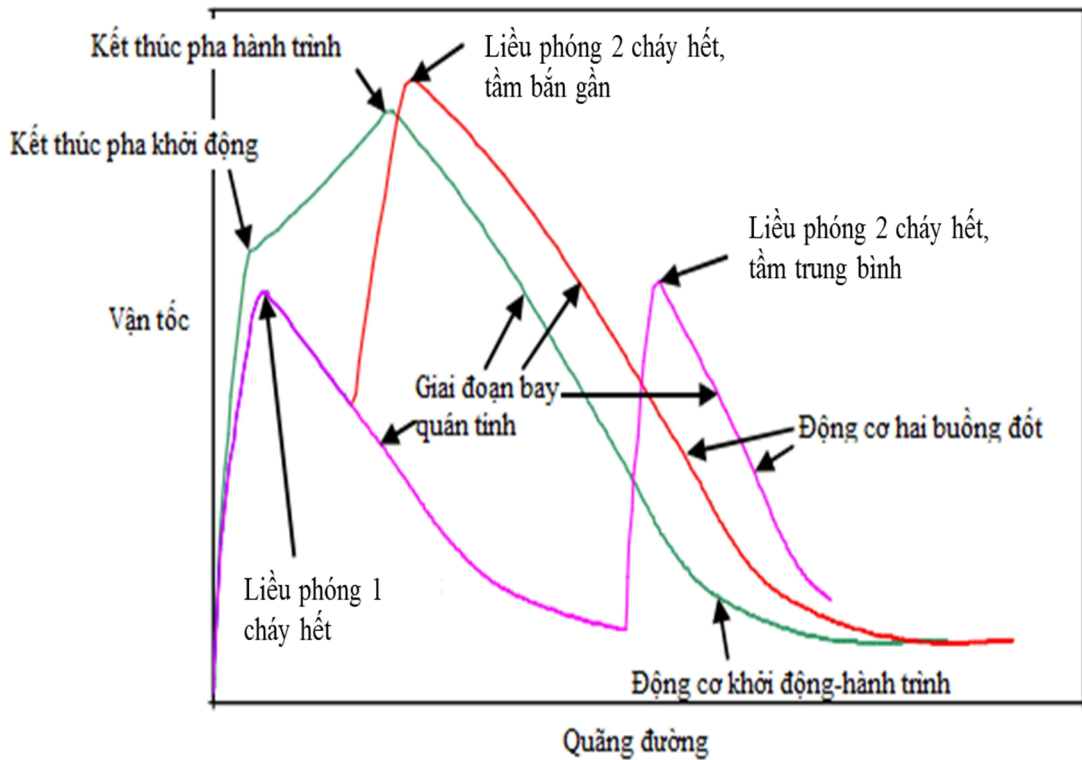
Theo kết quả thử nghiệm được công bố, vách ngăn với màng nhôm được thiết kế, chế tạo và thử nghiệm đảm bảo cách ly hai buồng đốt khi áp suất trong buồng đốt 1 lên đến  $176.10^5 Pa$  và bị phá hủy khi áp suất trong buồng đốt 2 xấp xỉ  $50.10^5 Pa$ .

Trên hình 1.16 là sơ đồ động cơ mẫu thử nghiệm với kết cấu vách ngăn đàn hồi, trong đó, bề mặt cháy của liệu nhiên liệu trong buồng đốt 2 được cách ly với buồng đốt 1 bởi màng mỏng làm bằng vật liệu composit cách nhiệt. Màng mỏng tì sát bề mặt liệu nhiên liệu trong buồng đốt 2, bảo vệ nó khỏi tác dụng của sản phẩm cháy trong khi buồng đốt 1 làm việc và dễ dàng bị thổi bay khi kích hoạt buồng đốt 2.



Hình 1.16. Sơ đồ ĐTRHBD liên hợp với vách ngăn đàn hồi

Để đánh giá hiệu quả sử dụng động cơ hai xung, Viện nghiên cứu Bayer-Chemie đã chế tạo và bắn bay các mẫu tên lửa thử nghiệm: tên lửa LFK-NG dùng động cơ hai xung với vách ngăn phá hủy dạng màng nhôm và tên lửa MSA dùng động cơ hai xung với vách ngăn đàn hồi [39], [40], [41], [42]. Tên lửa đối chứng là tên lửa dùng một động cơ thông thường có hai chế độ lực đẩy (chế độ phóng và chế độ hành trình) có cùng kích thước, cùng khối lượng nhiên liệu và cùng khối lượng phóng như các tên lửa dùng động cơ hai xung. Trên hình 1.17, biểu diễn sự thay đổi vận tốc của các tên lửa này trên hành trình bay.



Hình 1.17. So sánh quan hệ vận tốc-quãng đường của tên lửa siêu thanh sử dụng ĐTRHBD liên hợp với ĐTR khởi động-hành trình

Kết quả đánh giá cho thấy, so với tên lửa đối chứng, các tên lửa sử dụng động cơ hai xung có tầm bắn lớn nhất xa hơn với tốc độ tiếp cận mục tiêu lớn hơn. Có thể giải thích một cách định tính về khả năng tăng tầm bắn của tên lửa sử dụng động cơ hai xung như sau. Các tên lửa này đều có cùng một khối lượng nhiên liệu nên cơ bản có cùng mức độ năng lượng. Từ đồ thị vận tốc-quãng đường trên hình 1.17, có thể thấy tên lửa với động cơ hai chế độ lực đẩy có tốc độ rất lớn trong giai đoạn đầu của quá trình bay trong khi tốc độ trong giai đoạn cuối tương đối thấp, đồng nghĩa với việc mất mát năng lượng lớn do sự tăng lực cản khí động của lên tên lửa trong giai đoạn đầu (lực cản khí động tỷ lệ thuận với bình phương của tốc độ bay). Mặt khác, các tên lửa với động cơ hai xung có tốc độ bay thấp hơn trong giai đoạn đầu và lớn hơn trong giai đoạn cuối của quá trình bay (do điều chỉnh thời gian giãn cách giữa



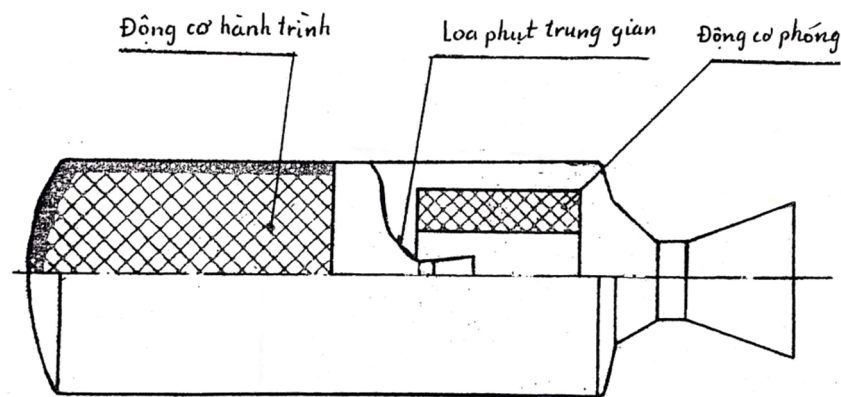
hai xung của động cơ). Do đó, tên lửa sử dụng động cơ hai xung có khả năng cho tầm bay lớn hơn so với tên lửa sử dụng động cơ một xung hai chế độ. Đây là ưu điểm vượt trội của loại động cơ hai xung.

Nhìn chung, loại động cơ có sơ đồ hai buồng đốt liên hợp đã thu hút được sự chú ý nghiên cứu phát triển và ứng dụng vào thực tế trang bị tại nhiều nước trên thế giới. Tuy nhiên, các tài liệu công bố còn hạn chế, khó tiếp cận do tính bảo mật cao, các tài liệu tiếp cận được chủ yếu công bố kết quả thực nghiệm mà không đưa ra mô hình toán học mô tả các quá trình làm việc diễn ra trong các buồng đốt của động cơ.

#### 1.4.2. Trong nước

Ở Việt nam, động cơ ĐTRHBĐ 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).

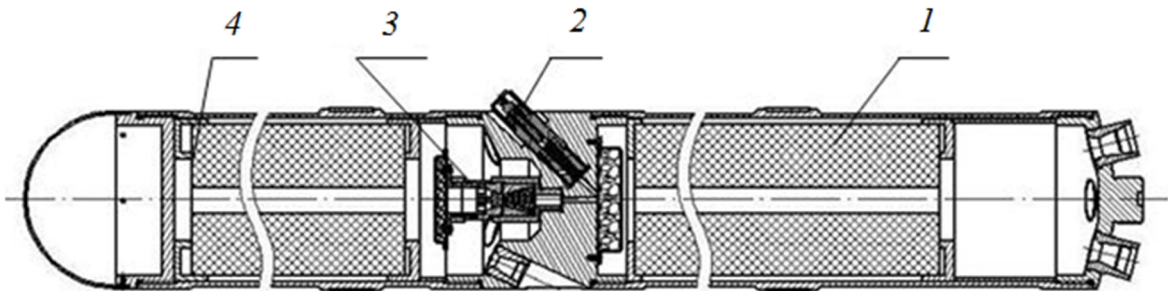


Hình 1.18. Sơ đồ ĐTRHBĐ liên hợp bằng cách ghép nối động cơ hành trình với động cơ phóng

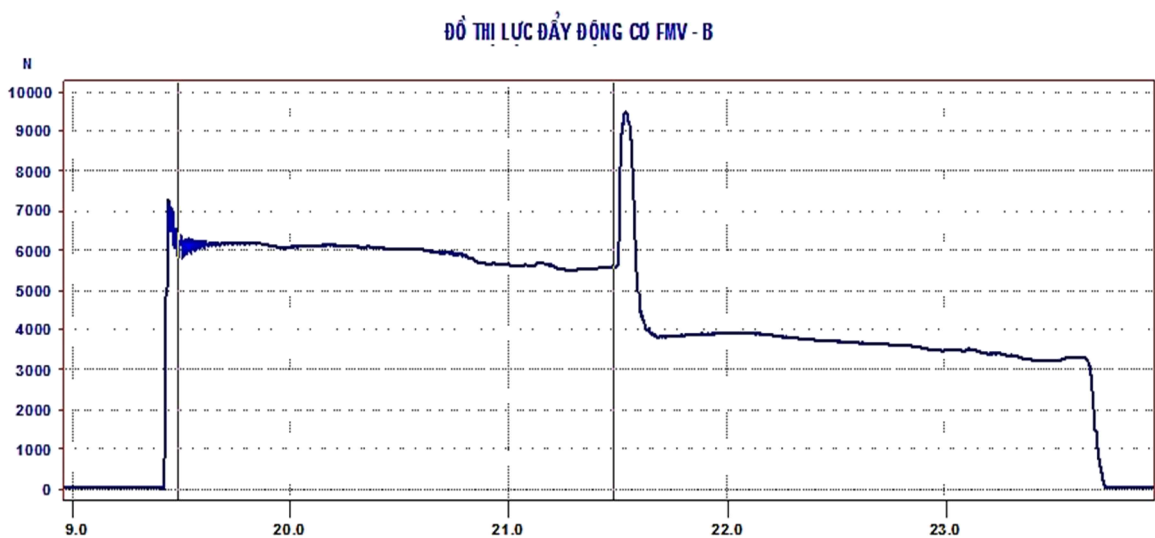
Hai động cơ được kích hoạt đồng thời, tạo ra một xung lực đẩy có hai chế độ. Tuy nhiên, các nội dung được trình bày mới chỉ ở dạng sơ đồ nguyên

lý sơ bộ, chưa phân tích toàn bộ quá trình hoạt động của động cơ và chưa có những định hướng cần thiết để hình thành sơ đồ kết cấu.

Tại Viện Tên lửa, Viện KH-CN QS, đã công bố một số công trình nghiên cứu mà ở một mức độ nhất định có 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 (hình 1.20)



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



Hình 1.20. Xung lực đẩy điển hình của tổ hợp động cơ vũ khí phá vật cản

Trong sơ đồ kết cấu được trình bày, nhờ cột giữ chậm làm bằng thuốc phóng cháy hết trong giai đoạn kết thúc hoạt động của động cơ phóng, sản phẩm cháy từ trong buồng đốt động cơ phóng sẽ truyền vào buồng đốt động cơ hành trình, kích hoạt thiết bị môi, đưa đến sự hoạt động của động cơ hành trình. Mặc dù mỗi động cơ có buồng đốt với liều nhiên liệu và khối loa phụt riêng biệt, thực tế là tồn tại sự liên thông ở mức độ nào đó giữa hai buồng đốt trong quá trình làm việc do lỗ thông của ống giữ chậm tạo ra. Trong các công trình đã công bố, hiệu ứng liên thông này không được đề cập đến, hoạt động của hai động cơ được khảo sát một cách hoàn toàn độc lập.

Nhìn chung, ở trong nước các nghiên cứu về động cơ ĐTRHBD liên hợp còn rất hạn chế, chưa có nhiều công trình nghiên cứu được công bố. Những công trình đã công bố phần lớn chỉ liên quan gián tiếp đến loại động cơ hai buồng đốt liên hợp. Một vài công trình nghiên cứu trực tiếp vào loại động cơ này mới giới hạn ở mức độ khảo sát sơ bộ về lý thuyết trên sơ đồ nguyên lý của động cơ.

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

Phát triển công nghệ tên lửa để sản xuất các tổ hợp tên lửa điều khiển chính xác, có tầm bắn xa là chủ trương lớn của Đảng và Nhà nước. Điều này đặt ra yêu cầu cấp thiết phải nghiên cứu khả năng tạo ra các động cơ hành trình của tên lửa, đặc biệt là các động cơ nhiên liệu rắn có xung lực đẩy lớn tác dụng trong thời gian dài.

Trên cơ sở phân tích tình hình nghiên cứu trong và ngoài nước, những khác biệt về công nghệ chế tạo thuốc phóng của nước ta và các nước trên thế giới, có thể rút ra một số nhận xét sau:

- Các nước trên thế giới đã có nhiều nghiên cứu về động cơ có sơ đồ hai buồng đốt liên hợp, trong khi đó ở nước ta các nghiên cứu liên quan còn rất hạn chế. Mặt khác, do tính bảo mật cao nên rất khó khăn trong việc tiếp cận

tài liệu của các nghiên cứu trên thế giới, mới chỉ tiếp cận được một số tài liệu về kết quả thực nghiệm mà chưa tiếp cận được các tài liệu về nghiên cứu lý thuyết các quá trình bên trong động cơ cũng như các tài liệu tính toán thiết kế loại động cơ này.

- ĐTRHBD liên hợp có thời gian làm việc dài, có thể chương trình hóa lực đẩy, được sử dụng nhiều trong các tên lửa có điều khiển, các tên lửa siêu thanh và có thể tăng khả năng tiêu diệt mục tiêu của tên lửa;

- Để chế tạo được ĐTR có thời gian làm việc dài với điều kiện công nghiệp quốc phòng trong nước, một trong các hướng nghiên cứu quan trọng đó là nghiên cứu làm chủ lý thuyết và công nghệ chế tạo ĐTRHBD liên hợp;

Trong những điều kiện hạn chế về công nghệ chế tạo thuốc phóng trong nước, với các đặc điểm vốn có, 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 của chúng ta 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 liều nhiên liệu là thuốc phóng keo sản xuất trong nước.

Đề tài luận án tập trung nghiên cứu các nội dung sau:

- Nghiên cứu xây dựng mô hình toán học mô tả các quá trình xảy ra trong ĐTRHBD liên hợp để xác định các đặc trưng cơ bản của động cơ như áp suất trong các buồng đốt và lực đẩy của động cơ;

- Nghiên cứu kiểm chứng độ tin cậy của mô hình toán được xây dựng bằng phương pháp nghiên cứu thực nghiệm trên động cơ mẫu;

- Nghiên cứu khảo sát một số yếu tố ảnh hưởng đến chế độ làm việc và khả năng chương trình hóa lực đẩy của động cơ, bao gồm: Diện tích lưu thông khí trên vách ngăn và thời điểm kích hoạt buồng đốt 2.

## 1.6. Kết luận chương 1

Chương 1 đã trình bày các nghiên cứu tổng quan về động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp. Đã phân tích, đánh giá các nghiên cứu trong nước và ngoài nước, từ đó lựa chọn đối tượng và đề tài nghiên cứu của luận án. Từ các nghiên cứu trên, có thể rút ra một số kết luận như sau:

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 ĐTRHBD 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 ĐTRHBD 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 ĐTRHBD, tuy nhiên các nghiên cứu về ĐTRHBD 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**

Để nghiên cứu quá trình làm việc của động cơ, cần phải thiết lập mô hình lý thuyết, trong đó, tương tác giữa các quá trình bên trong buồng đốt được mô tả bằng những mối tương quan định lượng. Đối với động cơ tên lửa nhiên liệu rắn thông thường, mô hình lý thuyết phổ biến và được ứng dụng rộng rãi là mô hình đơn giản dựa trên việc xem tất cả các quá trình là ổn định và lý tưởng, các tham số được xác định một cách trung bình trong toàn bộ không gian buồng đốt [20], [24], [47], [50]. Mặc dù đơn giản nhưng mô hình này rất hiệu quả và trở thành nền tảng chung của lý thuyết động cơ tên lửa. Dựa trên mô hình cơ bản này, người ta đã phát triển nhiều mô hình lý thuyết có độ tin cậy cao hơn nhờ tính đến những hiệu ứng khác nhau xuất hiện trong quá trình làm việc của những lớp động cơ có những đặc điểm riêng (như mô hình với sự lưu động một chiều của sản phẩm cháy, mô hình tính đến sự cháy không ổn định, mô hình với liều hỗn hợp, mô hình với sản phẩm cháy không cân bằng, không lý tưởng và có nhiều pha) [9], [10], [11], [52], [62].

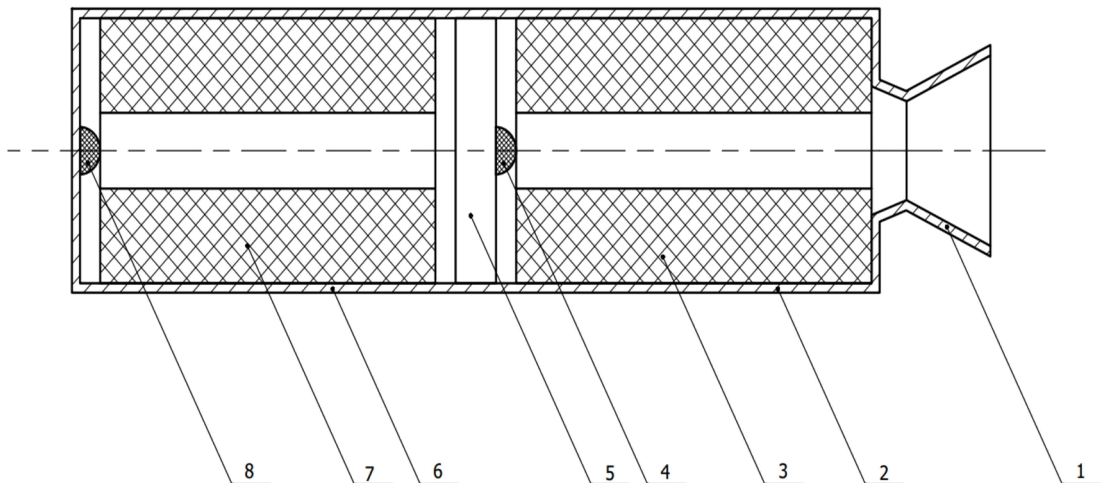
Một cách tương tự, đối với động cơ có sơ đồ hai buồng đốt liên hợp, việc nghiên cứu cũng bắt đầu từ một mô hình đơn giản, đóng vai trò là nền tảng chung và trên cơ sở đó sẽ phát triển các mô hình cho phép tiệm cận tốt hơn đến thực tế hoạt động của động cơ khi tính đến những hiệu ứng khác nhau và đa dạng, được quy định bởi đặc điểm cấu tạo và điều kiện nạp liều nhiên liệu cụ thể của các động cơ.

## 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

Phù hợp với sơ đồ nguyên lý và nguyên tắc hoạt động, quá trình làm việc của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt 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.

Trong giai đoạn 1, cụm buồng đốt 1 (gồm buồng đốt 1, liệu nhiên liệu 1 và thiết bị mồi 1 – hình 2.1) cùng với khối loa phụt lập thành một động cơ hoàn chỉnh, hoạt động như một động cơ tên lửa nhiên liệu rắn thông thường.



Hình 2.1. Sơ đồ nguyên lý cấu tạo ĐTRHBD liên hợp

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

Khi đó, các quá trình xảy ra trong buồng đốt 1 không có gì khác biệt so với các quá trình trong buồng đốt của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn thông

thường. Vì vậy, hoàn toàn có thể mô tả chúng theo các mối tương quan đã được thiết lập với động cơ tên lửa nhiên liệu rắn thông thường.

Trong giai đoạn 2, sau khi kích hoạt thiết bị mồi của buồng đốt 2, ban đầu thuốc mồi và thuốc phóng của liều nhiên liệu 2 cháy trong không gian kín của buồng đốt 2. Do kết quả cháy trong thể tích kín, áp suất  $p_2$  trong buồng đốt 2 tăng cao rất nhanh, vượt qua giá trị áp suất  $p_1$  trong buồng đốt 1. Khi  $\Delta p = p_2 - p_1$  đạt đến một ngưỡng nhất định, màng bịt kín cửa sổ của cơ cấu vách ngăn bị phá hủy, làm liên thông hai buồng đốt với nhau. Từ thời điểm đó, sản phẩm cháy sẽ lưu động trong toàn bộ không gian bên trong các buồng đốt và loa phụt của động cơ. Tồn tại hai trường hợp trong hoạt động của động cơ liên quan đến thời điểm mở cửa sổ trên cơ cấu vách ngăn.

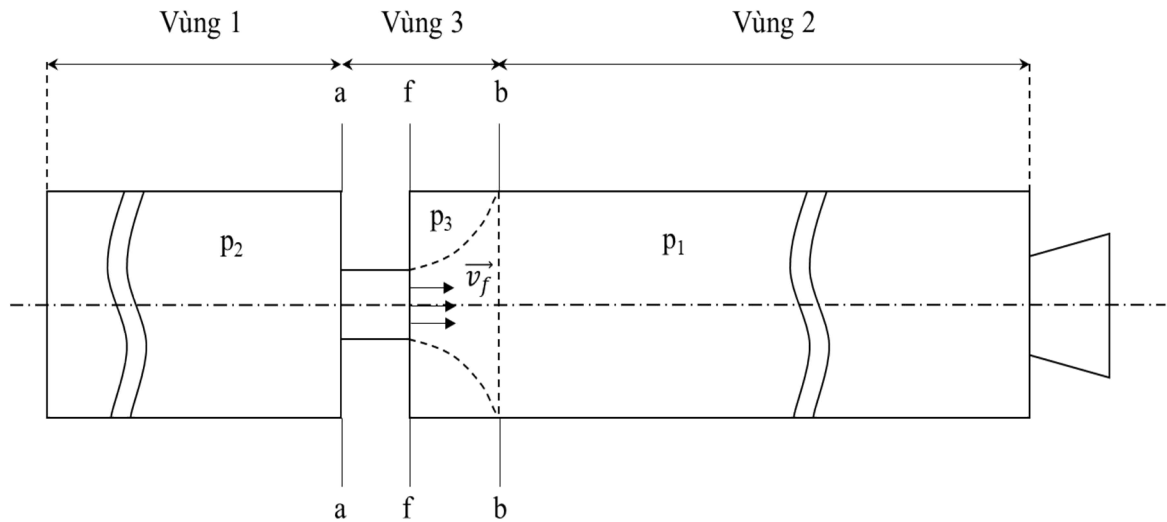
*Trường hợp thứ nhất*, cửa sổ trên cơ cấu vách ngăn được mở thông khi liều nhiên liệu trong buồng đốt 1 đã cháy hết, buồng đốt 1 đã hoàn toàn ngừng làm việc, áp suất trong buồng đốt 1 khi đó tương ứng với áp suất môi trường bên ngoài. Trong trường hợp này, khí thuốc với áp suất cao trong buồng đốt 2 sẽ lưu chuyển với tốc độ lớn sang buồng đốt 1, nhanh chóng điền đầy toàn bộ thể tích và làm tăng giá trị áp suất trong buồng đốt 1 đến một giá trị ổn định quy định bởi tương quan giữa cường độ thoát khí qua loa phụt và cường độ bổ sung khí từ buồng đốt 2. Khi đó, tương ứng với áp suất ổn định được thiết lập trong buồng đốt 1, áp suất trong buồng đốt 2 cũng thiết lập một giá trị ổn định xác định bởi tương quan giữa cường độ tạo khí do kết quả cháy của liều nhiên liệu 2 và cường độ lưu chuyển sản phẩm cháy sang buồng đốt 1 qua cửa sổ trên vách ngăn. Thời gian quá độ để thiết lập các giá trị áp suất ổn định trong các buồng đốt là rất ngắn. Sau khi được thiết lập, chế độ ổn định được duy trì cho đến khi kết thúc hoạt động của động cơ.



Trong trường hợp thứ 2, cửa sổ trên cơ cấu vách ngăn được mở thông khi buồng đốt 1 đang làm việc. Để mở thông cửa sổ này, quá trình quá độ trong thể tích kín của buồng đốt 2 duy trì cho đến khi áp suất  $p_2$  cao hơn áp suất  $p_1$  và có đủ độ chênh áp  $\Delta p = p_2 - p_1$  phá vỡ màng ngăn cửa sổ trên cơ cấu vách ngăn như trong trường hợp 1. Sau khi cửa sổ vách ngăn được mở, các quá trình xảy ra tương tự như trong trường hợp 1. Khác biệt duy nhất ở đây là, khi mở thông cửa sổ trên vách ngăn, thể tích buồng đốt 1 đã được điền đầy bởi khí thuốc có áp suất ổn định của giai đoạn buồng đốt 1 làm việc độc lập. Vì vậy, trạng thái ổn định mới của áp suất trong buồng đốt 1 sẽ được thiết lập ở mức cao hơn xác định bởi tương quan giữa cường độ tạo sản phẩm cháy của liệu nhiên liệu 1 trong buồng 1 với cường độ lưu động của khí thuốc giữa hai buồng đốt và cường độ tiêu hao khí thuốc qua loa phụt. Một cách tương ứng, mức áp suất ổn định trong buồng đốt 2 cũng được thiết lập ở giá trị cao hơn so với trường hợp 1.

Như vậy, trong cả hai trường hợp trên, nếu không xuất hiện hiệu ứng bất thường, trong phần lớn thời gian làm việc, động cơ sẽ duy trì chế độ hoạt động ổn định với các áp suất ổn định được thiết lập một cách tương ứng trong các buồng đốt.

Việc mô tả theo trình tự thời gian ở trên đối với hoạt động của động cơ tên lửa hai buồng đốt liên hợp chưa cho thấy đặc điểm của trạng thái sản phẩm cháy trong không gian các buồng đốt được liên thông. Để làm rõ đặc điểm này, cần phải mô tả sự lưu chuyển của sản phẩm cháy giữa hai buồng đốt theo quan điểm nhiệt-khí động học. Theo đó, tại mỗi thời điểm của quá trình làm việc ổn định của động cơ, sản phẩm cháy điền đầy không gian các buồng đốt có thể phân định thành ba vùng đặc trưng (hình 2.2) [50], [59].



Hình 2.2. Các vùng đặc trưng trong ĐTRHBD liên hợp

Vùng thứ nhất là toàn bộ thể tích tự do của buồng đốt 2, nơi có áp suất cao  $p_2$ . Vùng thứ hai 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 thứ 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, giống như trạng thái khí thuốc trong buồng đốt động cơ tên lửa nhiên liệu rắn thông thường. Sự xuất hiện của vùng 3 là do tác động của dòng khí thuốc lưu động từ vùng 1 sang vùng 2 qua lỗ thông trên vách ngăn với tốc độ  $v_f$  tại tiết diện ra của lỗ thông (tiết diện f-f). Trong vùng này, các thông số của khí thuốc phân bố không đều trên tiết diện ngang với sự xuất hiện phân vùng gần thành buồng đốt chứa khí thuốc ở trạng thái tĩnh có áp suất  $p_3$ . Giá trị của áp suất  $p_3$  nằm trong khoảng từ  $p_1$  đến  $p_2$ .

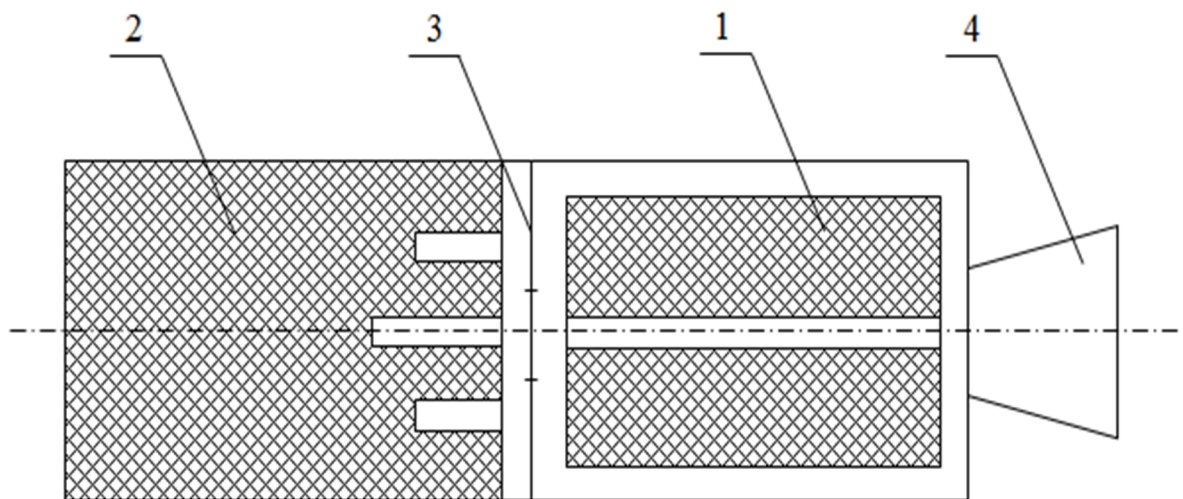
Vùng 3 có cấu trúc phức tạp. Độ rộng và mức độ phức tạp trong cấu trúc của vùng này phụ thuộc vào độ lớn của tốc độ  $v_f$ . Với các giá trị nhỏ của  $v_f$ , vùng 3 được thu hẹp, tiết diện b-b nằm gần với cửa ra của lỗ thông. Theo mức độ tăng lên của  $v_f$ , vùng 3 càng mở rộng tương ứng với sự dịch chuyển ra xa khỏi tiết diện f-f của tiết diện b-b. Cấu trúc của vùng 3 càng phức tạp, độ ổn định làm việc của động cơ càng giảm đi. Trong trường hợp 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. [5], [19].

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

Để xây dựng mô hình toán xác định các đặc trưng làm việc của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp, cần thiết phải thiết lập sơ đồ tính toán phù hợp của động cơ, trong đó các quá trình phức tạp trong buồng đốt khi động cơ hoạt động được đơn giản hóa ở mức độ hợp lý cần thiết. Với mục tiêu và giới hạn phạm vi các nội dung nghiên cứu đã xác định của đề tài luận án, sơ đồ tính toán của động cơ được xác định 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

Trong mỗi buồng đốt, liệu nhiên liệu rắn và thiết bị mồi được nạp theo các điều kiện nhồi riêng đối với mỗi buồng. Các liệu nhiên liệu được làm từ thuốc phóng keo có mác thuốc có thể khác nhau và có cấu hình phù hợp với yêu cầu của mỗi buồng đốt. Trên vách ngăn có cửa sổ với diện tích lỗ thông  $F_{lt}$  và chỉ có thể mở khi buồng đốt 2 hoạt động.

Quá trình làm việc của động cơ được khảo sát trong những điều kiện với các giả thiết cơ bản sau:

1. Thời kỳ quá độ vào chế độ làm việc của động cơ xảy ra trong thể tích kín của các buồng đốt có thời gian rất ngắn, ảnh hưởng không đáng kể đến các đặc trưng làm việc của động cơ. Do đó, giả thiết rằng, 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 liều nhiên liệu rắn có thể được làm từ những mác thuốc phóng khác nhau nhưng đều thuộc loại thuốc phóng keo (thuốc phóng hai gốc hoặc ballistit). Mặc dù chúng có đặc trưng lý hóa, đặc trưng năng lượng và đặc trưng thuật phóng khác nhau, nhưng sản phẩm cháy của chúng đều là hỗn hợp các chất khí  $N_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $H_2O$ ,... với tỷ lệ các thành phần dao động trong giới hạn không lớn, có thể xem 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

#### 2.3.1. Các phương trình cháy và tạo khí

Sự cháy của nhiên liệu là nhân tố chủ yếu chi phối đặc tính hoạt động của động cơ và được đặc trưng bởi tốc độ tạo khối lượng sản phẩm cháy mang năng lượng nhiệt, cấp vào các buồng đốt [19], [47], [54]:

$$\dot{m}^+ = \frac{dm^+}{dt} = \rho_T \cdot S(e) \cdot u, \quad (2.1)$$

trong đó :

$\dot{m}^+$  - tốc độ sinh khí của nhiên liệu

$\rho_T$  - mật độ (khối lượng riêng) của nhiên liệu

$S(e)$  - diện tích bề mặt cháy của liêu nhiên liệu

$e$  - bề dày cháy của liêu nhiên liệu

$u$  - tốc độ cháy của thuốc phóng

Theo [18], tốc độ cháy của thuốc phóng nói chung phụ thuộc vào nhiệt độ ban đầu  $T_0$  và các thông số môi trường bao quanh bề mặt cháy (áp suất  $p$  và tốc độ  $w$  của dòng sản phẩm cháy):

$$u = \frac{de}{dt} = u(T_0, p, w) \quad (2.2)$$

Biểu thức tốc độ cháy (2.2) thường được viết dưới dạng tích của ba hàm số với ba biến độc lập:

$$u = f(p) \cdot \varepsilon(w) \cdot \eta(T_0) \quad (2.3)$$

trong đó:

$$\text{- hàm phụ thuộc vào áp suất: } f(p) = u_1 \cdot p^v, \quad (2.4)$$

trong đó  $u_1, v$  lần lượt là hệ số và số mũ tốc độ cháy được xác định bằng thực nghiệm theo phương pháp nêu trong [21].

- hàm phụ thuộc vào nhiệt độ ban đầu của nhiên liệu:

$$\eta(T_0) = [1 - K_T (T_0 - T_n)]^{-1}, \quad (2.5)$$

trong đó:

$T_n$ - nhiệt độ tiêu chuẩn;

$K_T$ - hằng số phụ thuộc vào bản chất của nhiên liệu.

- hàm phụ thuộc vào tốc độ dòng chảy qua bề mặt cháy:

$$\varepsilon(w) = \begin{cases} 1 & , \text{ khi } w \leq w_{gh} \\ 1 + K_w (w - w_{gh}) & , \text{ khi } w > w_{gh} \end{cases}, \quad (2.6)$$

trong đó:

$K_w$ - hệ số cháy xói mòn [s/m];

$w, w_{gh}$ - tốc độ chuyển động của dòng sản phẩm cháy và giá trị ngưỡng khi xuất hiện hiệu ứng cháy xói mòn.

Do vậy,

$$\dot{m}^+ = \frac{dm^+}{dt} = \rho_T \cdot S(e) \cdot f(p) \cdot \varepsilon(w) \cdot \eta(T_0). \quad (2.7)$$

a. Đối với buồng 1

$$\dot{m}_1^+ = \frac{dm_1^+}{dt} = \rho_{T1} \cdot S_1(e) \cdot u_{11} \cdot p_1^{v_1} \cdot \varepsilon_1(w) \cdot \eta_1(T_0) \quad (2.8)$$

$$S_1 = S_1(e) \quad (2.9)$$

$$u_{LP1} = \left( \frac{de}{dt} \right)_{LP1} = u_{11} \cdot p_1^{v_1} \cdot \varepsilon_1(w) \cdot \eta_1(T_0) \quad (2.10)$$

Trong đó:

$\dot{m}_1^+$  - lưu lượng sinh khí của liều phóng trong buồng đốt 1

$S_1$  - hàm số của diện tích cháy theo bề dày lớp cháy tại từng thời điểm, được xác định bởi hình dạng, kích thước và phương pháp nạp liệu vào buồng 1.

$u_{LP1}$  - tốc độ cháy của liệu phóng trong buồng đốt 1

$u_{11}, v_1$  - hệ số tốc độ cháy và số mũ trong quy luật tốc độ cháy của liệu phóng trong buồng 1

$\rho_{T1}$  - mật độ của thuốc phóng trong buồng đốt 1

$p_1$  - áp suất của sản phẩm cháy trong buồng đốt 1

*b. Đối với buồng đốt 2:*

$$\dot{m}_2^+ = \frac{dm_2^+}{dt} = \rho_{T2} \cdot S_2(e) \cdot u_{12} \cdot p_2^{v_2} \cdot \varepsilon_2(w) \cdot \eta_2(T_0) \quad (2.11)$$

$$S_2 = S_2(e) \quad (2.12)$$

$$u_{LP2} = \left( \frac{de}{dt} \right)_{LP2} = u_{12} \cdot p_2^{v_2} \cdot \varepsilon_2(w) \cdot \eta_2(T_0) \quad (2.13)$$

Trong đó,

$\dot{m}_2^+$  - lưu lượng sinh khí của liệu phóng trong buồng đốt 2

$S_2$  - hàm số của diện tích cháy theo bề dày lớp cháy tại từng thời điểm, được xác định bởi hình dạng, kích thước và phương pháp nạp liệu vào buồng 2.

$u_{LP2}$  - tốc độ cháy của liệu phóng trong buồng đốt 1

$u_{12}, v_2$  - hệ số tốc độ cháy và số mũ trong quy luật tốc độ cháy của liệu phóng trong buồng 2

$\rho_{T2}$  - mật độ của thuốc phóng trong buồng đốt 2

$p_2$  - áp suất của sản phẩm cháy trong buồng đốt 2

### 2.3.2. Phương trình bảo toàn khối lượng của sản phẩm cháy trong động cơ

Tại thời điểm  $t$  đang xét, khối lượng sản phẩm cháy trong buồng 1 là  $m_1$  và trong buồng 2 là  $m_2$ . Theo định luật bảo toàn khối lượng, ta có:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_1^+ - \dot{m}_1^- + \delta_3 \dot{m}_{tr.d} \quad (2.14)$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_2^+ - \delta_3 \dot{m}_{tr.d} \quad (2.15)$$

Trong đó:

$\dot{m}_1, \dot{m}_2$ : lưu lượng sản phẩm cháy trong buồng đốt 1 và buồng đốt 2

$\dot{m}_1^-$ : lưu lượng sản phẩm cháy thoát khỏi loa phụt của động cơ

$\dot{m}_{tr.d}$ : lưu lượng sản phẩm cháy trao đổi giữa hai buồng đốt qua lỗ thông trên vách ngăn.

Khi đó, lưu lượng sản phẩm cháy qua loa phụt của động cơ hai buồng đốt liên hợp được xác định theo công thức phổ biến trong lý thuyết động cơ tên lửa [19], [47].

$$\dot{m}_1^- = \frac{dm_1^-}{dt} = \frac{\varphi_2 K_0(k) F_{th} p_1}{\sqrt{RT_{g,1}}} \quad (2.16)$$

Trong đó:

$\varphi_2$  - hệ số tổn hao lưu lượng sản phẩm cháy qua loa phụt

$F_{th}$ : diện tích tiết diện tới hạn của loa phụt

$R$ : hằng số khí của hỗn hợp sản phẩm cháy

$K_0(k)$ : hàm của chỉ số mũ đoạn nhiệt

$$K_0(k) = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}} \quad (2.17)$$

$k$ : chỉ số mũ đoạn nhiệt của sản phẩm cháy,



$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (2.18)$$

Tốc độ trao đổi khối lượng sản phẩm cháy giữa hai buồng đốt qua lỗ thông trên vách ngăn  $\dot{m}_{tr.d}$  được xác định bởi diện tích tiết diện  $F_{lt}$  của lỗ thông trên vách ngăn hai buồng đốt và tương quan giữa các áp suất  $p_1$  và  $p_2$  trong các buồng đốt 1 và 2. Phù hợp với [5], [20], [23], ta có:

$$\dot{m}_{tr.d} = \begin{cases} \frac{\varphi_2 F_{lt} p_2}{\sqrt{RT_{g,2}}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[ \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, & \text{ khi } 1 < \frac{p_2}{p_1} < \left( \frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \frac{\varphi_2 \cdot K_0(k) \cdot F_{lt} p_2}{\sqrt{RT_{g,2}}}, & \text{ khi } \frac{p_2}{p_1} \geq \left( \frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \frac{\varphi_2 F_{lt} p_1}{\sqrt{RT_{g,1}}} \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, & \text{ khi } 1 < \frac{p_1}{p_2} < \left( \frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \frac{\varphi_2 \cdot K_0(k) \cdot F_{lt} p_1}{\sqrt{RT_{g,1}}}, & \text{ khi } \frac{p_1}{p_2} \geq \left( \frac{k+1}{2} \right)^{\frac{k}{k-1}} \end{cases} \quad (2.19)$$

Trong đó:

$T_{g,1}, T_{g,2}$ : nhiệt độ của khí trong các buồng đốt 1 và 2

$F_{lt}$ : diện tích lưu thông khí của các lỗ thông trên vách ngăn;

$\varphi_2$ : hệ số tổn thất lưu lượng

$\delta_3$ : hệ số xác định chiều chuyển động của dòng khí qua vách ngăn

$$\delta_3 = \begin{cases} 1, & \text{ khi } p_2 > p_1 \\ -1, & \text{ khi } p_2 < p_1 \\ 0, & \text{ khi } p_2 = p_1 \end{cases}$$

### 2.3.3. Phương trình bảo toàn năng lượng của sản phẩm cháy trong động cơ

Đặt  $dI_{tr.d}$  là biến thiên Entalpi của khí trao đổi giữa buồng đốt 2 và buồng đốt 1, khi đó ta có [18,20,54,56]:

$$dI_{tr.d} = \begin{cases} \dot{m}_{tr.d} \cdot c_p \cdot T_{g.2} \cdot dt, & \text{khi } p_2 > p_1 \\ \dot{m}_{tr.d} \cdot c_p \cdot T_{g.1} \cdot dt, & \text{khi } p_2 < p_1 \\ 0, & \text{khi } p_2 = p_1 \end{cases} \quad (2.20)$$

Trong đó:

$c_p$ : nhiệt dung riêng đẳng áp trong buồng đốt 1 và buồng đốt 2

Phương trình bảo năng lượng cho buồng đốt 1 và buồng đốt 2 được xây dựng trên cơ sở của định luật I nhiệt động học:

#### a. Đối với buồng đốt 1

Áp dụng phương trình bảo toàn năng lượng cho buồng đốt 1, ta có:

$$dQ_1 + \delta_3 dI_{tr.d} = dU_1 + \sum dl_1 \quad (2.21)$$

Trong đó,  $Q_1$ : Tổng năng lượng của khí sinh ra trong buồng đốt 1, được xác định bằng biểu thức:

$$dQ_1 = (dm_1^+) c_v T_{1.1} = \dot{m}_1^+ c_v T_{1.1} dt \quad (2.22)$$

Trong đó:  $c_{v1}$ : nhiệt dung riêng đẳng tích trong buồng đốt 1

$T_{1.1}$ : Nhiệt độ cháy của thuốc phóng trong các buồng đốt 1

$U_1$ : Nội năng của khí trong buồng đốt 1, được xác định bằng biểu thức:

$$dU_1 = d \left[ (m_1^+ - m_1^- + \delta_3 \cdot m_{tr.d}) c_v T_{g.1} \right] \quad (2.23)$$

$$dU_1 = dt \left( \dot{m}_1^+ - \dot{m}_1^- + \delta_3 \cdot \dot{m}_{tr.d} \right) c_v T_{g.1} + (m_1^+ - m_1^- + \delta_3 m_{tr.d}) c_v dT_g \quad (2.24)$$

$l_1$ : Công của dòng khí, được xác định bằng biểu thức:

$$\sum dl_1 = dm_1^- \cdot c_p T_{g.1} + dQ_{nh1} \quad (2.25)$$

Trong đó:  $Q_{nh1}$ : Nhiệt lượng khí thuốc truyền vào thành buồng đốt, được xác định dựa vào biểu thức:

$$dQ_{nh1} = \sum F_1 \alpha_1 (T_{g,1} - T_{K,1}) dt \quad (2.26)$$

$F_1$ : diện bề mặt tiếp xúc với khí thuốc trong buồng đốt 1;

$T_{K,1}$ : nhiệt độ bề mặt trong của thành buồng đốt 1;

$\alpha_1$ : hệ số truyền nhiệt từ sản phẩm cháy vào thành buồng đốt 1.

Từ (2.24) và (2.25), ta có:

$$\sum dl_1 = dt \cdot [\dot{m}_1^- \cdot c_p \cdot T_{g,1} + \sum F_1 \alpha_1 (T_{g,1} - T_{K,1})] \quad (2.27)$$

Với chú ý:

$$c_p = kc_v$$

Thay (2.27), (2.24) và (2.22) vào (2.21) và bằng các phép biến đổi thông thường, thu được:

$$\frac{dT_{g,1}}{dt} = \frac{1}{\dot{m}_1^+ - \dot{m}_1^- + \delta_3 \cdot \dot{m}_{r,d}} \left[ \dot{m}_1^+ \cdot T_{1,1} - \dot{m}_1^- \cdot k \cdot T_{g,1} - (\dot{m}_1^+ - \dot{m}_1^- + \delta_3 \cdot \dot{m}_{r,d}) T_{g,1} + \delta_3 \frac{(k-1)}{R} \frac{dI_{r,d}}{dt} - \frac{(k-1)}{R} \frac{dQ_{nh1}}{dt} \right] \quad (2.28)$$

### b. Đối với buồng đốt 2

Phương trình bảo năng lượng cho buồng đốt 2 được xây dựng trên cơ sở của định luật I nhiệt động học:

Áp dụng phương trình bảo toàn năng lượng cho buồng đốt 2, ta có:

$$dQ_2 - \delta_3 dI_{r,d} = dU_2 + \sum dl_2 \quad (2.29)$$

Trong đó:

$Q_2$ : Tổng năng lượng của khí sinh ra trong buồng đốt 2, được xác định bằng biểu thức:

$$dQ_2 = (dm_2^+) \cdot c_v \cdot T_{1,2} = \dot{m}_2^+ \cdot c_v \cdot T_{1,2} dt \quad (2.30)$$

$c_{v2}$ : nhiệt dung riêng đẳng tích trong buồng đốt 2

$T_{1,2}$ : Nhiệt độ cháy của thuốc phóng trong buồng đốt 2

$U_2$ : Nội năng của khí, được xác định bằng biểu thức:

$$dU_2 = d \left[ (\dot{m}_2^+ - \delta_3 \cdot \dot{m}_{r,d}) \cdot c_v \cdot T_{g,2} \right] \quad (2.31)$$

$$dU_2 = \left( m_2^+ - \delta_3 \cdot m_{tr,d} \right) \cdot c_v \cdot dT_{g,2} + \left( \dot{m}_2^+ - \delta_3 \cdot \dot{m}_{tr,d} \right) \cdot c_v \cdot T_{g,2} \cdot dt \quad (2.32)$$

$l_2$ : Công của dòng khí, được xác định bằng biểu thức:

$$\sum dl_2 = dQ_{nh2} \quad (2.33)$$

$Q_{nh2}$ : Nhiệt lượng khí thuốc truyền vào thành buồng đốt, được xác định dựa vào biểu thức:

$$dQ_{nh2} = \sum F_2 \cdot \alpha_2 \cdot (T_{g,2} - T_{K,2}) dt \quad (2.34)$$

$F_2$ : diện tích bề mặt tiếp xúc với khí thuốc trong buồng đốt 2;

$T_{K,2}$ : nhiệt độ bề mặt trong của thành buồng đốt 2;

$\alpha_2$ : hệ số truyền nhiệt từ sản phẩm cháy vào thành buồng đốt 2;

Từ (2.28) và (2.29), ta có:

$$\sum dl_2 = \left[ \sum F_2 \cdot \alpha_2 \cdot (T_{g,2} - T_{K,2}) \right] dt \quad (2.35)$$

Thay (2.35), (2.32) và (2.30) vào (2.29) và bằng các phép biến đổi thông thường ta thu được:

$$\frac{dT_{g,2}}{dt} = \frac{1}{m_2^+ - \delta_3 \cdot m_{tr,d}} \left[ \dot{m}_2^+ \cdot T_{1,2} - \left( \dot{m}_2^+ - \delta_3 \cdot \dot{m}_{tr,d} \right) \cdot T_{g,2} - \delta_3 \frac{(k-1)}{R_1} \frac{dI_{tr,d}}{dt} - \frac{(k-1)}{R_1} \frac{dQ_{nh2}}{dt} \right] \quad (2.36)$$

**\* Biểu thức xác định hệ số truyền nhiệt  $\alpha_1, \alpha_2$  :**

Theo [18],[48],[54],[56], hệ số truyền nhiệt từ sản phẩm cháy vào thành buồng đốt được xác định theo biểu thức sau:

$$\alpha_1 = \alpha_{dl,1} + \alpha_{bx,1} \quad (2.37)$$

$$\alpha_2 = \alpha_{dl,2} + \alpha_{bx,2} \quad (2.38)$$

Trong đó:

$\alpha_{bx,1}, \alpha_{bx,2}$ : Các hệ số truyền nhiệt do bức xạ trong buồng đốt 1 và 2, được xác định dựa vào các biểu thức sau:

$$\alpha_{bx.1} = c_o \cdot \varepsilon \frac{\varepsilon_K + 1}{2} \left( \frac{T_{g.1}}{100} \right)^4 \frac{1 - \left( \frac{T_{K.1}}{T_{g.1}} \right)^4}{T_{g.1} \left( 1 - \frac{T_{K.1}}{T_{g.1}} \right)} \quad (2.39)$$

$$\alpha_{bx.2} = c_o \cdot \varepsilon \frac{\varepsilon_K + 1}{2} \left( \frac{T_{g.2}}{100} \right)^4 \frac{1 - \left( \frac{T_{K.2}}{T_{g.2}} \right)^4}{T_{g.2} \left( 1 - \frac{T_{K.2}}{T_{g.2}} \right)} \quad (2.40)$$

$\alpha_{dl.1}, \alpha_{dl.2}$ : Các hệ số truyền nhiệt đối lưu trong buồng đốt 1 và 2, được xác định dựa vào các biểu thức:

$$\alpha_{dl.1} = \alpha_{dl.cb.1} + \alpha_{dl.td.1} \quad (2.41)$$

$$\alpha_{dl.2} = \alpha_{dl.cb.2} + \alpha_{dl.td.2} \quad (2.42)$$

$\alpha_{dl.cb.1}, \alpha_{dl.cb.2}$ : Các hệ số truyền nhiệt đối lưu cưỡng bức, được xác định qua các biểu thức sau:

$$\alpha_{dl.cb.1} = 0,023 \frac{\lambda}{D_{dtr.1}} \left( \frac{D_{dtr.1} \cdot \dot{m}_1}{F_{td.1} \cdot \mu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (2.43)$$

$$\alpha_{dl.cb.2} = 0,023 \frac{\lambda}{D_{dtr.2}} \left( \frac{D_{dtr.2} \cdot \dot{m}_2}{F_{td.2} \cdot \mu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (2.44)$$

$\alpha_{dl.td.1}, \alpha_{dl.td.2}$ : Các hệ số truyền nhiệt đối lưu tự do trong buồng đốt 1 và 2, được xác định dựa vào các biểu thức:

$$\alpha_{dl.td.1} = 0,327 \lambda \cdot \sqrt[4]{\frac{j}{D_{dtr.1}} \cdot \frac{p_1^2}{(\mu \cdot R_1)^2 \cdot T_{g.1}^2}} \quad (2.45)$$

$$\alpha_{dl.td.2} = 0,327 \lambda \cdot \sqrt[4]{\frac{j}{D_{dtr.2}} \cdot \frac{p_2^2}{(\mu \cdot R_2)^2 \cdot T_{g.2}^2}} \quad (2.46)$$

$\varepsilon$ : độ đen của khí;

$c_o$ : hằng số bức xạ của vật đen lý tưởng;

$\varepsilon_K$  : độ đen hiệu dụng của bề mặt trong thành buồng đốt.

$\lambda$  : hệ số dẫn nhiệt của khí;

$D_{dtr.1}, D_{dtr.2}$  : kích thước đặc trưng hình học của buồng đốt 1 và 2;

$F_{td.1}, F_{td.2}$  : diện tích thoát khí tự do của buồng đốt 1 và 2;

$\mu$  : độ nhớt động lực;

$Pr$ : tiêu chuẩn Prant

$j$ : gia tốc của động cơ.

Thay (2.44) và (2.46) vào (2.42), thu được:

$$\alpha_{dl.1} = 0,023 \frac{\lambda}{D_{dtr.1}} \left( \frac{D_{dtr.1} \dot{m}_1}{F_{td.1} \cdot \mu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} + 0,327 \lambda \cdot 4 \sqrt{\frac{j}{D_{dtr.1}} \cdot \frac{p_1^2}{(\mu R)^2 T_{g.1}^2}} \quad (2.47)$$

Thay (2.43) và (2.45) vào (2.41), ta được:

$$\alpha_{dl.2} = 0,023 \frac{\lambda}{D_{dtr.2}} \left( \frac{D_{dtr.2} \dot{m}_2}{F_{td.2} \cdot \mu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} + 0,327 \lambda \cdot 4 \sqrt{\frac{j}{D_{dtr.2}} \cdot \frac{p_2^2}{(\mu R)^2 T_{g.2}^2}} \quad (2.48)$$

Thay (2.47) và (2.39) vào (2.36), thu được:

$$\begin{aligned} \alpha_1 = & 0,023 \frac{\lambda}{D_{dtr.1}} \left( \frac{D_{dtr.1} \dot{m}_1}{F_{td.1} \cdot \mu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} + 0,327 \lambda \cdot 4 \sqrt{\frac{j}{D_{dtr.1}} \cdot \frac{p_1^2}{(\mu R)^2 T_{g.1}^2}} + \\ & + c_o \varepsilon \frac{\varepsilon_K + 1}{2} \left( \frac{T_{g.1}}{100} \right)^4 \frac{1 - \left( \frac{T_{K.1}}{T_{g.1}} \right)^4}{T_{g.1} \left( 1 - \frac{T_{K.1}}{T_{g.1}} \right)} \end{aligned} \quad (2.49)$$

Thay (2.48) và (2.40) vào (2.37), thu được:

$$\begin{aligned} \alpha_2 = & 0,023 \frac{\lambda}{D_{dtr.2}} \left( \frac{D_{dtr.2} \dot{m}_2}{F_{td.2} \cdot \mu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} + 0,327 \lambda \cdot 4 \sqrt{\frac{j}{D_{dtr.2}} \cdot \frac{p_2^2}{(\mu R)^2 T_{g.2}^2}} + \\ & + c_o \varepsilon \frac{\varepsilon_K + 1}{2} \left( \frac{T_{g.2}}{100} \right)^4 \frac{1 - \left( \frac{T_{K.2}}{T_{g.2}} \right)^4}{T_{g.2} \left( 1 - \frac{T_{K.2}}{T_{g.2}} \right)} \end{aligned} \quad (2.50)$$

### 2.3.4 Phương trình trạng thái

Phương trình trạng thái của một hỗn hợp khí có dạng [18],[22],[45],:

$$pV = mRT \quad (2.51)$$

Trong đó:

P: Áp suất trong buồng đốt

V: Thể tích của hỗn hợp khí trong buồng đốt

m: Khối lượng sản phẩm cháy lưu lại trong buồng đốt

T: Nhiệt độ sản phẩm cháy trong buồng đốt

Áp dụng phương trình trạng thái của chất khí (2.51) cho các buồng đốt ta được:

#### a. Đối với buồng đốt 1

$$p_1 V_1 = m_1 R T_{g,1} \quad (2.52)$$

$$m_1 = \frac{p_1 V_1}{R T_{g,1}} \quad (2.53)$$

Lấy đạo hàm theo thời gian phương trình (2.53), thu được:

$$\begin{aligned} \dot{m}_1 &= \frac{d}{dt} \left( \frac{p_1 V_1}{R T_{g,1}} \right) = \frac{\left( V_1 \frac{dp_1}{dt} + p_1 \frac{dV_1}{dt} \right) R T_{g,1} - p_1 V_1 \cdot \frac{d(R T_{g,1})}{dt}}{(R T_{g,1})^2} \\ &= \frac{T_{g,1} V_1 \frac{dp_1}{dt} + p_1 T_{g,1} \frac{dV_1}{dt} - p_1 V_1 \cdot \frac{dT_{g,1}}{dt}}{R T_{g,1}^2} \\ &= \frac{V_1}{R T_{g,1}} \cdot \frac{dp_1}{dt} + \frac{p_1}{R T_{g,1}} \cdot \frac{dV_1}{dt} - \frac{p_1 V_1}{R T_{g,1}^2} \cdot \frac{dT_{g,1}}{dt} \\ \Rightarrow \Rightarrow \quad \dot{m}_1 &= \frac{V_1}{R T_{g,1}} \cdot \frac{dp_1}{dt} + \frac{p_1}{R T_{g,1}} \cdot \frac{dV_1}{dt} - \frac{p_1 V_1}{R T_{g,1}^2} \cdot \frac{dT_{g,1}}{dt} \quad (2.54) \end{aligned}$$

Thay (2.54) vào (2.15), thu được:

$$\frac{V_1}{RT_{g,1}} \cdot \frac{dp_1}{dt} + \frac{p_1}{RT_{g,1}} \cdot \frac{dV_1}{dt} - \frac{p_1 V_1}{RT_{g,1}^2} \cdot \frac{dT_{g,1}}{dt} = \dot{m}_1^+ - \dot{m}_1^- + \delta_3 \cdot \dot{m}_{r,d} \quad (2.55)$$

Với chú ý:

$$\frac{dV_1}{dt} = S_1 \cdot u_{Lp1} \quad (2.56)$$

Nhận được:

$$\frac{dp_1}{dt} = \frac{1}{V_1} \left[ RT_{g,1} (\dot{m}_1^+ - \dot{m}_1^- + \dot{m}_{r,d}) - p_1 \cdot S_1 \cdot u_{Lp1} + \frac{p_1 \cdot V_1}{T_{g,1}} \frac{dT_{g,1}}{dt} \right] \quad (2.57)$$

b. Đối với buồng đốt 2

$$p_2 V_2 = m_2 RT_{g,2} \quad (2.58)$$

Tương tự các biến đổi với buồng đốt 1, thu được phương trình vi phân như sau:

$$\frac{dp_2}{dt} = \frac{1}{V_2} \left[ RT_{g,2} (\dot{m}_2^+ - \dot{m}_{r,d}) - p_2 \cdot S_2 \cdot u_{Lp2} + \frac{p_2 \cdot V_2}{T_{g,2}} \frac{dT_{g,2}}{dt} \right] \quad (2.59)$$

## 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 đã xây dựng ở trên, tổng hợp được hệ 12 phương trình vi phân mô tả thuật phóng trong của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp, bao gồm:

- 02 phương trình mô tả sự thay đổi của áp suất trong các buồng đốt (2.57) và (2.59);

- 02 phương trình mô tả sự thay đổi của nhiệt độ của sản phẩm cháy trong các buồng đốt (2.28) và (2.36);



- 02 phương trình tổn thất nhiệt của các buồng đốt (2.26), (2.34);
- 02 phương trình thay đổi bề dày cháy của các liệu nhiên liệu (2.9) và (2.12);
- 02 phương trình sinh khí của các liệu nhiên liệu (2.8) và (2.11);
- 01 phương trình phụt khí qua loa phụt của động cơ (2.16);
- 01 phương trình trao đổi khí giữa hai buồng đốt (2.19);

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \frac{de_{c,1}}{dt} = \delta_1 u_{lp1} = \delta_1 u_{11} \cdot p_1^{\nu_1} \cdot \varepsilon_1(w) \eta_1(T_0) \\
 \frac{dm_1^+}{dt} = \delta_1 S_1 u_{lp1} \cdot \rho_{T1} = \delta_1 \cdot \rho_{T1} \cdot S_1(e) \cdot u_{11} \cdot p_1^{\nu_1} \cdot \varepsilon_1(w) \eta_1(T_0) \\
 \frac{dp_1}{dt} = \frac{1}{V_1} \left[ RT_{g,1} (\dot{m}_1^+ - \dot{m}_1^- + \delta_3 \dot{m}_{r,d}) - \delta_1 \cdot p_1 \cdot S_1 u_{lp1} + \frac{p_1 V_1}{T_{g,1}} \frac{dT_{g,1}}{dt} \right] \\
 \frac{dm_1^-}{dt} = \frac{\varphi_2 \cdot K_0(k) \cdot F_{th} \cdot p_1}{\sqrt{RT_{g,1}}} \\
 \frac{dm_{r,d}}{dt} = \dot{m}_{r,d} \\
 \frac{dT_{g,1}}{dt} = \frac{1}{\dot{m}_1^+ - \dot{m}_1^- + \delta_3 \dot{m}_{r,d}} \left[ \dot{m}_1^+ \cdot T_{1,1} - \dot{m}_1^- \cdot k T_{g,1} - (\dot{m}_1^+ - \dot{m}_1^- + \delta_3 \dot{m}_{r,d}) T_{g,1} + \delta_3 \frac{(k-1)}{R} \frac{dI_{r,d}}{dt} - \frac{(k-1)}{R} \frac{dQ_{nh1}}{dt} \right] \\
 \frac{dQ_{nh1}}{dt} = \sum F_{xq1} \cdot \alpha_1 \cdot (T_{g,1} - T_{K,1}) \\
 \frac{de_{c,2}}{dt} = \delta_2 u_{lp2} = \delta_2 \cdot u_{12} \cdot p_2^{\nu_2} \cdot \varepsilon_2(w) \eta_2(T_0) \\
 \frac{dm_2^+}{dt} = \delta_2 S_2 u_{lp2} \cdot \rho_{T2} = \delta_2 \cdot \rho_{T2} \cdot S_2(e) \cdot u_{12} \cdot p_2^{\nu_2} \cdot \varepsilon_2(w) \eta_2(T_0) \\
 \frac{dp_2}{dt} = \frac{1}{V_2} \left[ RT_{g,2} (\dot{m}_2^+ - \delta_3 \dot{m}_{r,d}) - \delta_2 \cdot p_2 \cdot S_2 u_{lp2} + \frac{p_2 V_2}{T_{g,2}} \frac{dT_{g,2}}{dt} \right] \\
 \frac{dT_{g,2}}{dt} = \frac{1}{\dot{m}_2^+ - \delta_3 \dot{m}_{r,d}} \left[ \dot{m}_2^+ \cdot T_{1,2} - (\dot{m}_2^+ - \delta_3 \dot{m}_{r,d}) T_{g,2} - \delta_3 \frac{(k-1)}{R} \frac{dI_{r,d}}{dt} - \frac{(k-1)}{R} \frac{dQ_{nh2}}{dt} \right] \\
 \frac{dQ_{nh2}}{dt} = \sum F_{xq2} \cdot \alpha_2 \cdot (T_{g,2} - T_{K,2})
 \end{array} \right. \quad (2.60)$$

Với các phương trình bổ sung:

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

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

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

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

$$\alpha_1 = 0,023 \frac{\lambda}{D_{dtr.1}} \left( \frac{D_{dtr.1} \dot{m}_1}{F_{td.1} \cdot \mu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} + 0,327 \lambda \cdot \sqrt[4]{\frac{j}{D_{dtr.1}} \cdot \frac{p_1^2}{(\mu R)^2 T_{g.1}^2}} +$$

$$+ c_o \varepsilon \frac{\varepsilon_K + 1}{2} \left( \frac{T_{g.1}}{100} \right)^4 \frac{1 - \left( \frac{T_{K.1}}{T_{g.1}} \right)^4}{T_{g.1} \left( 1 - \frac{T_{K.1}}{T_{g.1}} \right)}$$

$$\alpha_2 = 0,023 \frac{\lambda}{D_{dtr.2}} \left( \frac{D_{dtr.2} \cdot \dot{m}_2}{F_{td.2} \cdot \mu} \right)^{0,8} \cdot Pr^{0,4} + 0,327 \lambda \cdot 4 \sqrt{\frac{j}{D_{dtr.2}} \cdot \frac{p_2^2}{(\mu R)^2 T_{g.2}^2}} +$$

$$+ c_o \varepsilon \frac{\varepsilon_K + 1}{2} \left( \frac{T_{g.2}}{100} \right)^4 \frac{1 - \left( \frac{T_{K.2}}{T_{g.2}} \right)^4}{T_{g.2} \left( 1 - \frac{T_{K.2}}{T_{g.2}} \right)}$$

Các hệ số  $\delta_1, \delta_2$  được sử dụng để xác định thời điểm môi cháy của các liệu nhiên liệu:

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

Hệ số  $\delta_3$  được sử dụng để xác định chiều chuyển động của dòng khí qua vách ngăn hai buồng đốt:

$$\delta_3 = \begin{cases} 1, & \text{khi } p_2 > p_1 \\ -1, & \text{khi } p_2 < p_1 \\ 0, & \text{khi } p_2 = p_1 \end{cases}$$

- Các điều kiện ban đầu khi  $t=0$

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

trong đó:

$p_{moi}$  – áp suất môi trong buồng đốt 1

$p_0, T_0$ - tương ứng là áp suất và nhiệt độ ban đầu trong không gian buồng đốt, xem gần đúng bằng áp suất và nhiệt độ môi trường xung quanh ;

$V_{1,0}$ —lần lượt là thể tích tự do ban đầu của buồng đốt 1 và buồng đốt 2

Diện tích bề mặt cháy  $S_1(e)$  được tính theo kích thước hình học của liều thuốc phóng trong buồng đốt 1.

- Các điều kiện khi  $t=t_{mt}$  (thời điểm mở vách ngăn giữa hai buồng đốt)

$$\left\{ \begin{array}{l} (e)_{LP2} = (e)_{LP20} \\ m_2^+ = m_{20}^+ \\ p_2 = p_{moi} \\ T_{g,2} = T_{1,2} \\ Q_{nh,2} = 0; \\ V_2 = V_{2,0} \end{array} \right.$$

$p_{moi}$  - áp suất môi trong buồng đốt 2

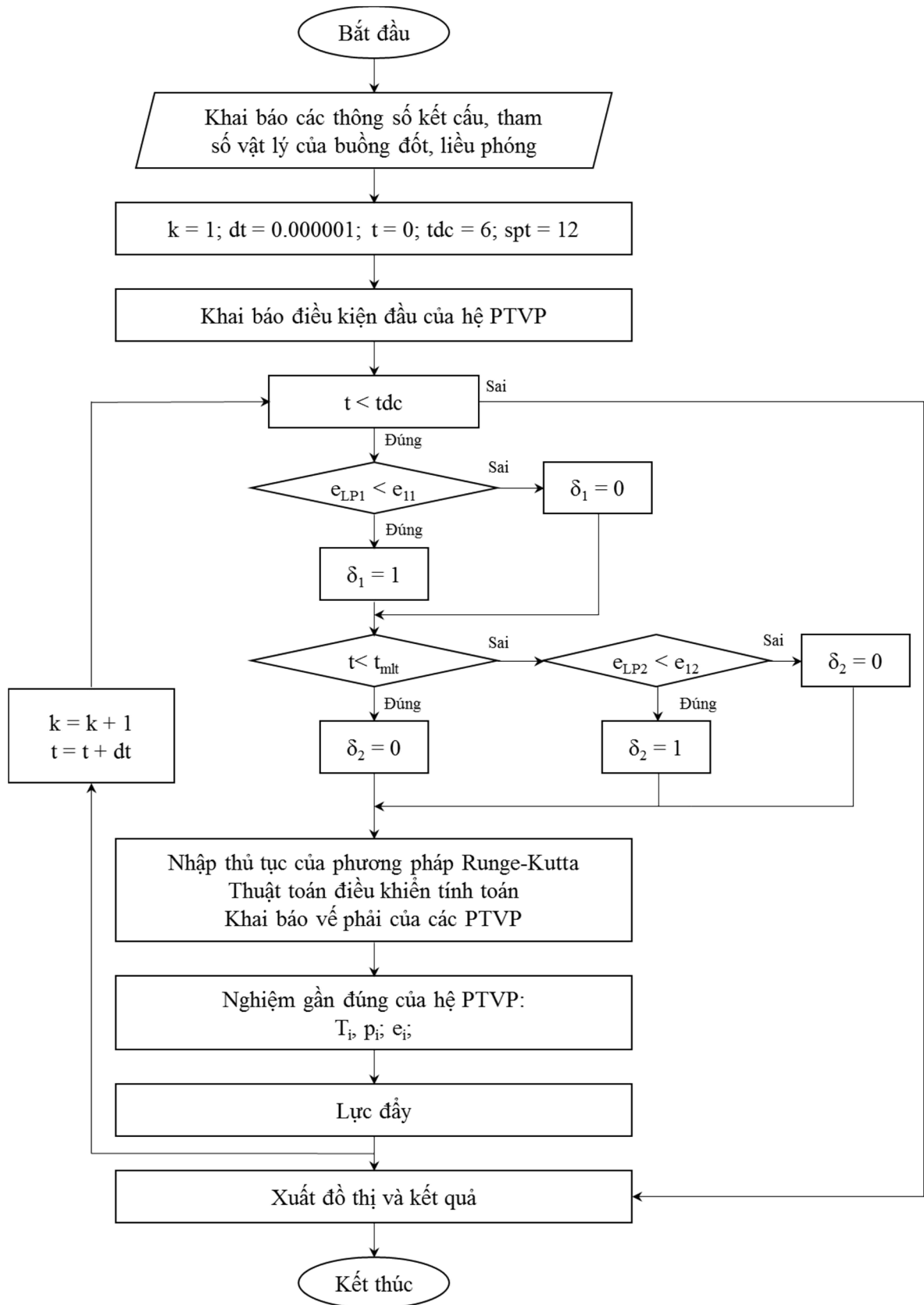
$V_{2,0}$ —lần lượt là thể tích tự do ban đầu của buồng đốt 2

Diện tích bề mặt cháy  $S_2(e)$  được tính theo kích thước hình học của liều thuốc phóng trong buồng đốt 2.

#### **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. Đây là một trong những phương pháp phổ biến, cho lời giải số tin cậy, dùng để tìm nghiệm của các phương trình vi phân thường cấp một trong các bài toán phân tích số.

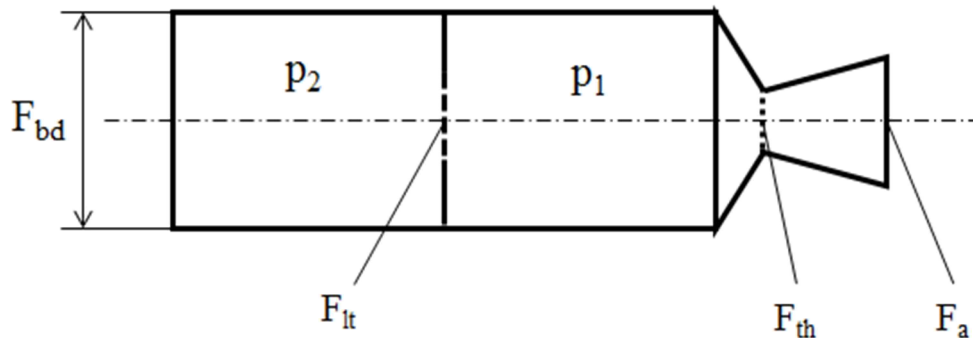
Sơ đồ thuật toán giải hệ phương trình bài toán thuật phóng trong của ĐTRHBD liên hợp được thể hiện ở hình 2.4.



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

## 2.5. Tính toán lực đẩy của động cơ

Đối với ĐTRHBD liên hợp, lực đẩy của động cơ được xác định như sau:



Hình 2.5. Sơ đồ tính toán lực đẩy của ĐTRHBD liên hợp

- Trong giai đoạn bùng nổ 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 đó:

$p_1$  - áp suất của hỗn hợp sản phẩm cháy trong buồng đốt 1;

$F_{th}$  - diện tích tiết diện tới hạn của loa phụt;

$C_p$  - hệ số lực đẩy được xác định từ biểu thức

$$C_p = \varphi_1 \varphi_2 K_0(k) F_w(\xi_a, k) \quad (2.62)$$

$\varphi_1$  - tổn thất tốc độ chuyển động của dòng gây ra bởi nội, ngoại ma sát và sự không một chiều của dòng khí trên phần ra của loa phụt;

$\varphi_2$  - tổn thất lưu lượng của dòng khí chuyển động trong loa phụt, có kể đến các tổn thất gây ra do ma sát giữa dòng khí với thành loa phụt, hiện tượng

đứt dòng, dòng quân v.v.;

$F_w(\xi_a, k)$  - hàm phụ thuộc vào chỉ số mũ đoạn nhiệt  $k$  và mức độ mở rộng loa phụt  $\xi_a$ .

$$F_w(\xi_a, k) = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \left( 1 - \pi_a^{\frac{k-1}{k}} \right)} \quad (2.63)$$

Trong đó:

$$\xi_a = \frac{d_a}{d_{th}}, \quad \pi_a = \frac{p_a}{p_1}$$

- 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:

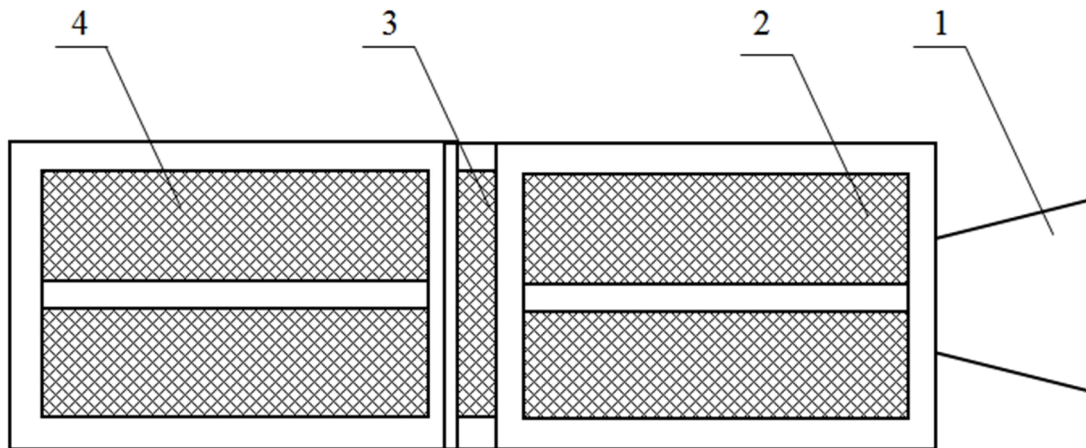
$$\begin{aligned} P &= P_{bd1} + P_{bd2} \\ P &= (C_p \cdot p_1 \cdot F_{th} - p_1 \cdot F_{lt}) + [p_2 \cdot F_{bd} - p_2 (F_{bd} - F_{lt})] \\ P &= C_p \cdot p_1 \cdot F_{th} + (p_2 - p_1) \cdot F_{lt} \end{aligned} \quad (2.64)$$

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

Để có căn cứ đánh giá mô hình lý thuyết đã xây dựng, dưới đây sẽ trình bày kết quả áp dụng mô hình để tính toán các đặc trưng làm việc của một động cơ mẫu thử nghiệm. Động cơ mẫu này được thiết kế chế tạo nhằm khẳng định khả năng hiện thực hóa việc tạo ra động cơ hai buồng đốt liên hợp ở nước ta và làm công cụ thực hiện các nghiên cứu thực nghiệm đo các đặc trưng làm việc của động cơ. Nội dung này được trình bày trong chương 3.

### 2.6.1. Sơ đồ cấu tạo và các tham số chính của động cơ

Sơ đồ cấu tạo của động cơ mẫu dùng để tính toán được trình bày trên hình 2.6.



Hình 2.6. Sơ đồ kết cấu động cơ mẫu

1 - Loa phụt; 2 - Buồng đốt 1; 3 - Vách ngăn; 4 - Buồng đốt 2.

Động cơ mẫu bao gồm: buồng đốt 1; buồng đốt 2; loa phụt và vách ngăn giữa hai buồng đốt. Trong đó vách ngăn được cấu tạo từ phân kim loại với các lỗ thông và phân thuốc phóng có cùng mức thuốc so với các liều nhiên liệu, có tác dụng bịt kín buồng đốt 2 trong giai đoạn buồng đốt 1 làm việc độc lập và dễ dàng bị đánh thủng khi kích hoạt thuốc môi trong buồng đốt 2. Nhiên liệu trong buồng đốt 1 gồm hai thành phần: liều nhiên liệu 1 và liều thuốc phóng trong vách ngăn.

- Các thông số cấu tạo chính của động cơ được trình bày ở bảng 2.1

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 thời 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
Mức 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
<b>Phần kim loại</b>	
Số lượng lỗ thông	16
Đường kính lỗ, [m]	0,01
<b>Liều thuốc phóng</b>	
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

- Thành phần hóa học của thuốc phóng keo RSI-12M được thể hiện trong bảng 2.3 [14], [15].

Bảng 2.3. Thành phần hóa học của thuốc phóng RSI-12M

Tên gọi	Công thức hóa học	Tỷ lệ, %
Nitroxenlulo (N=13,15%)	C <sub>22,74</sub> H <sub>29,33</sub> O <sub>36,08</sub> N <sub>8,57</sub>	56,0 ± 1,0
Nitroglyxerin	C <sub>3</sub> H <sub>5</sub> O <sub>9</sub> N <sub>3</sub>	26,7 ± 0,7
Dinitrotoluen	C <sub>7</sub> H <sub>6</sub> O <sub>4</sub> N <sub>2</sub>	10,5 ± 1,0
Xentralit	C <sub>15</sub> H <sub>16</sub> N <sub>2</sub> O	3,0 ± 0,3
Vazoli	C <sub>20</sub> H <sub>42</sub>	1,2 ± 0,4
Oxit chì	PbO	0,9 ± 0,3
Canxi cacbonat	CaCO <sub>3</sub>	1,7 ± 0,3
Độ ẩm (Nước), %	H <sub>2</sub> O	≤ 0,7

Các số liệu nhiệt động lực học của thuốc phóng keo RSI-12M được xác định theo tiêu chuẩn 06 TCN 834: 2000 và phần mềm ASTRA. Đây là phần mềm tính toán quá trình cháy trong động cơ tên lửa, đã được sử dụng rộng rãi trong thiết kế chế tạo tên lửa tại Liên bang Nga và đang được sử dụng tại Việt nam [1,2]. [PL1]. Các thông số đặc trưng của nhiên liệu được trình bày trên bảng 2.4.

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	$T_{1.1}, T_{1.2}$	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	$\nu$	0,3456	
6	Hệ số ảnh hưởng của nhiệt độ	$K_T$	0,0034	
7	Mật độ của nhiên liệu	$\rho_T$	1570	$kg/m^3$

### 2.6.2. Kết quả tính toán

- Các trường hợp tính toán:

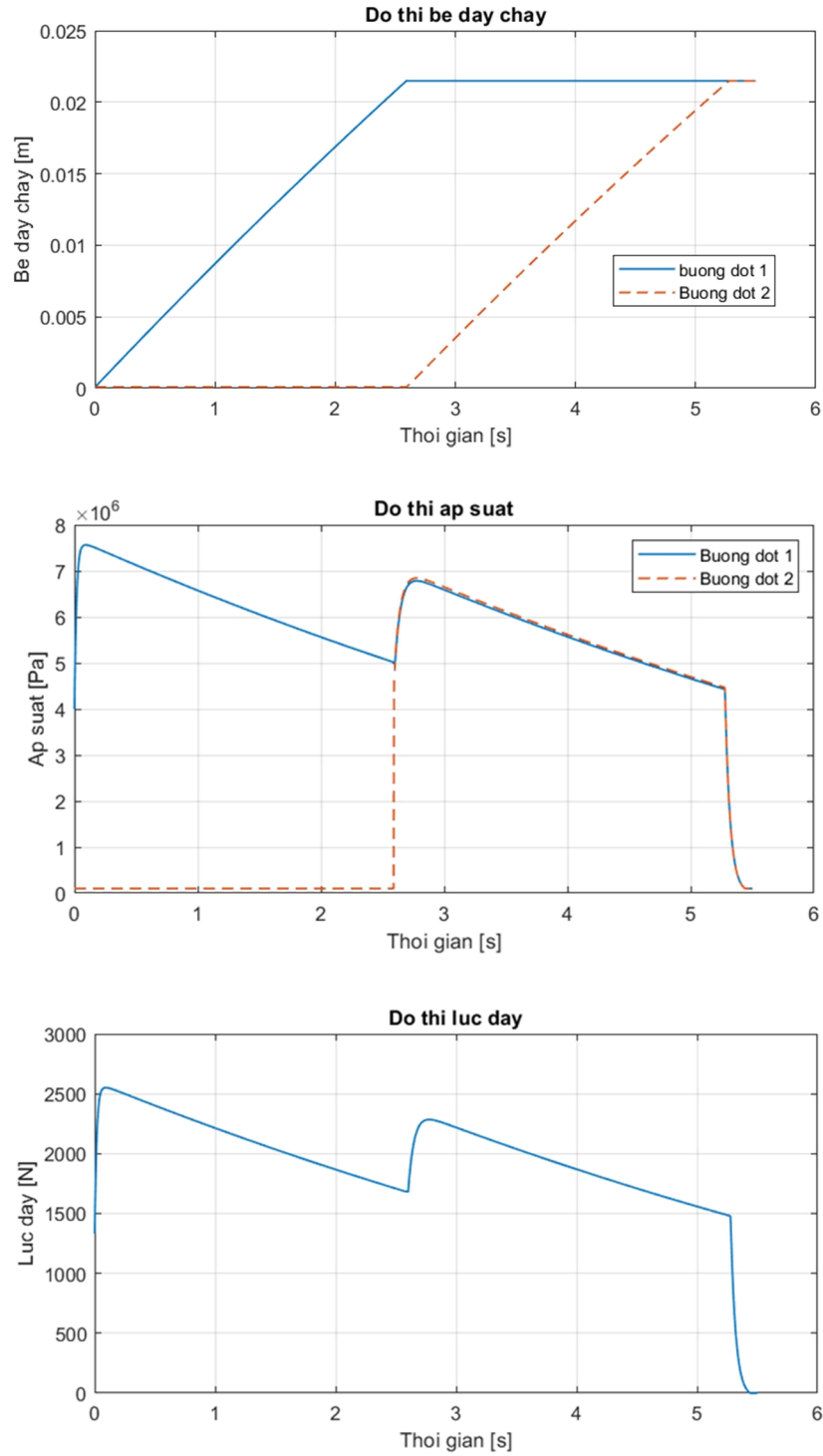
+ Trường hợp 1: Buồng đốt 2 được kích hoạt ngay sau khi liều phóng trong buồng đốt 1 hoàn toàn cháy hết

+ 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  $\Delta t = 1s$

+ 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  $\Delta t = 1s$ .

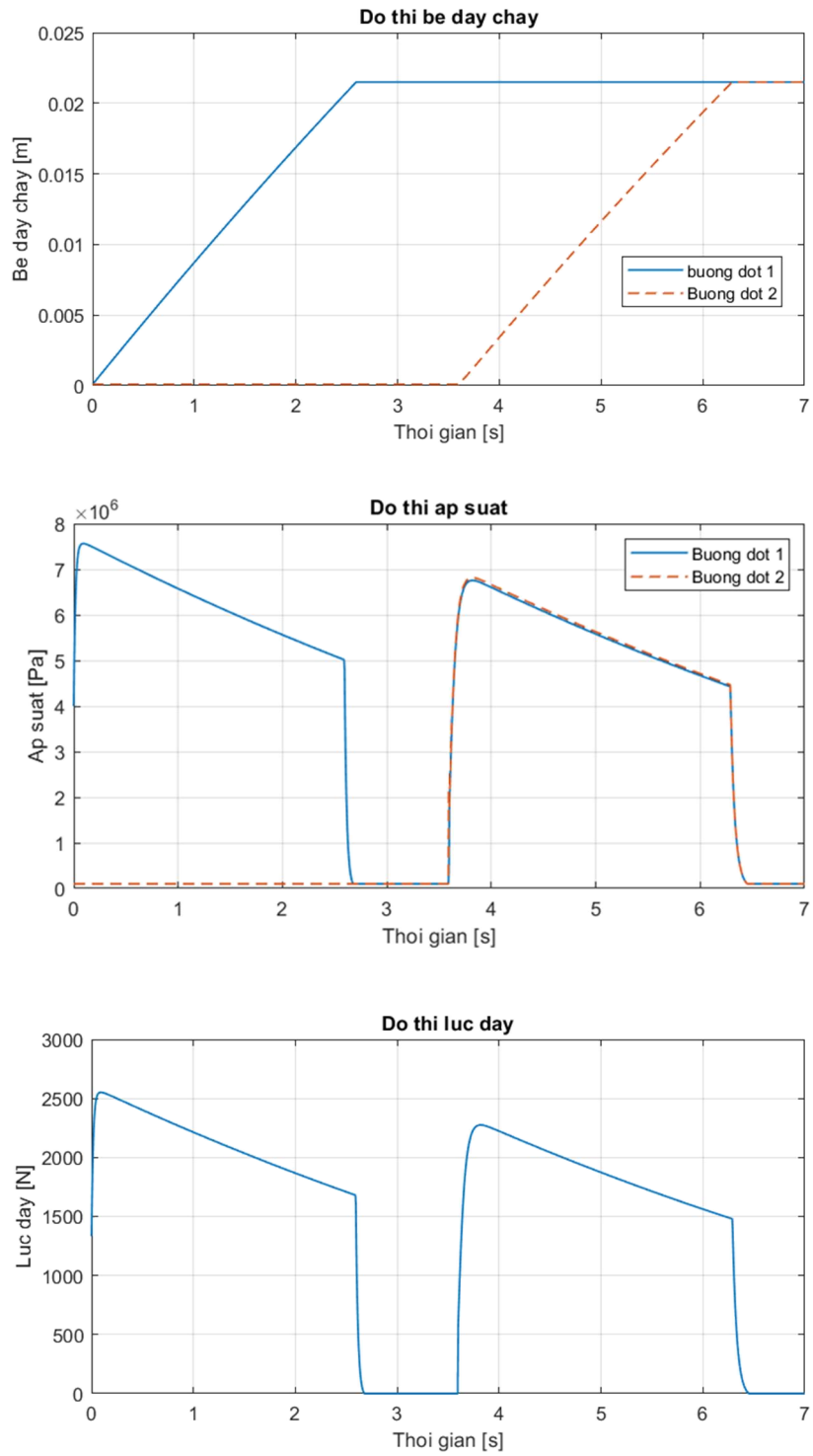
- Thực hiện giải hệ phương trình (2.60) với các tham số của động cơ mẫu thử nghiệm theo các trường hợp tính toán trên, thu được các kết quả như sau:

a. Trường hợp 1: buồng đốt 2 được kích hoạt ngay sau khi liệu phóng trong buồng đốt 1 hoàn toàn cháy hết:



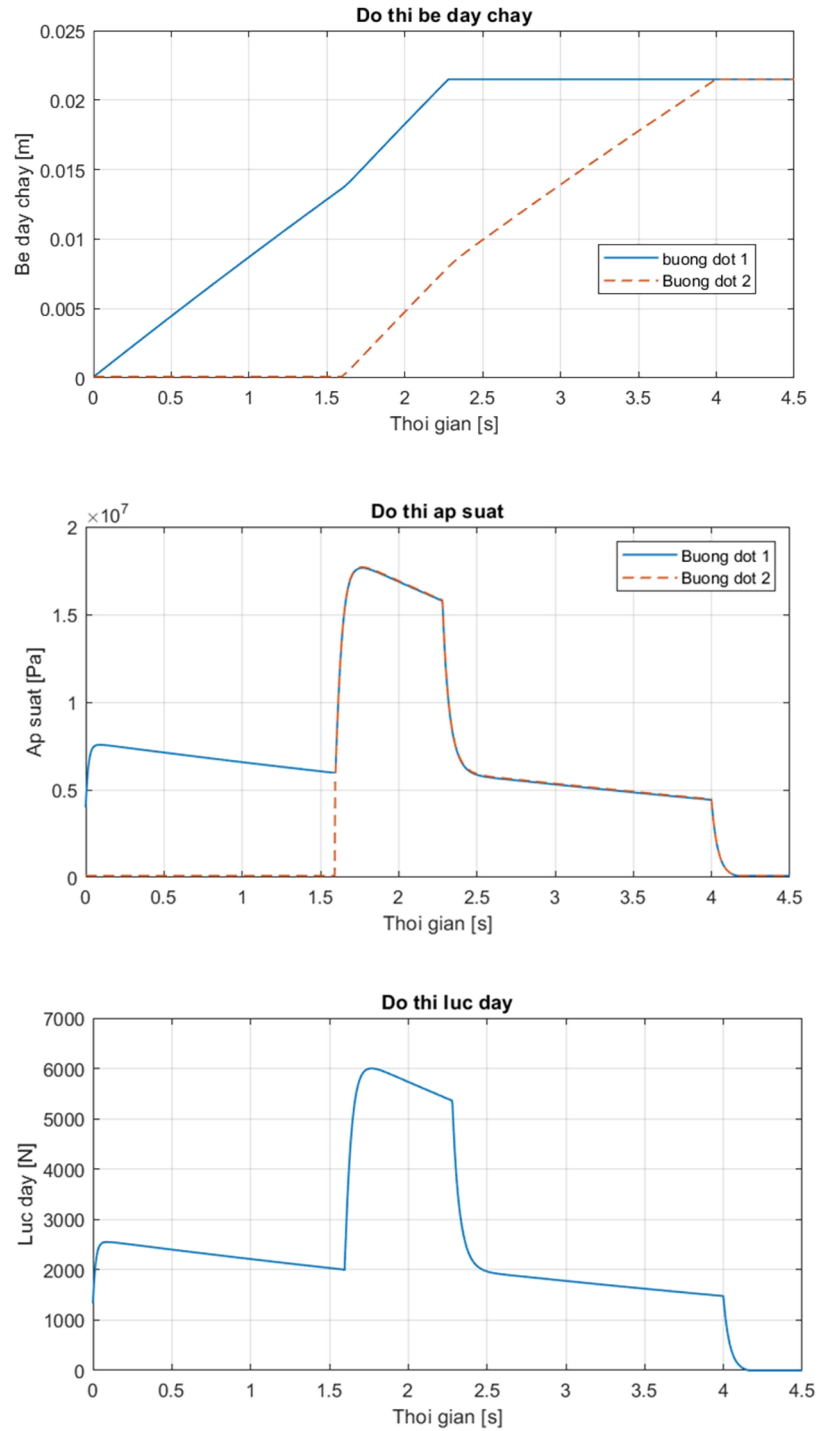
Hình 2.7. Kết quả tính toán lý thuyết trường hợp 1

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



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

c. 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  $\Delta t = 1s$ .



Hình 2.9. Kết quả tính toán lý thuyết trường hợp 3

***Nhận xét:***

- Quy luật biến đổi giá trị lực đẩy ở các trường hợp của động cơ mẫu phù hợp với lý thuyết động cơ hai buồng đốt đã trình bày trong mục 2.1.

- Buồng đốt 1 có thời gian làm việc ngắn hơn buồng đốt 2 và áp suất trung bình cao hơn buồng đốt 2, do trong buồng đốt 1 có sự cháy đồng thời của liêu thuốc phóng trong vách ngăn của động cơ. Vì vậy, lực đẩy trung bình của động cơ trong giai đoạn 2 thấp hơn lực đẩy trung bình của động cơ trong giai đoạn 1.

- Trong các giai đoạn có sự cháy của liêu phóng 2, ở mỗi thời điểm, các giá trị áp suất ở buồng đốt 2 có giá trị cao hơn buồng đốt 1 nhưng chênh lệch áp suất giữa hai buồng đốt không cao do sự mất mát áp suất qua các lỗ thông trên vách ngăn không nhiều.

## 2.7 Kết luận chương 2

Chương 2 đã xây dựng mô hình lý thuyết cho phép tính toán các đặc trưng làm việc của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp. Từ đó, có thể rút ra một số kết luận sau:

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 phương pháp nghiên cứu thực nghiệm.

### **Chương 3. NGHIÊN CỨU THỰC NGHIỆM**

Mục đích của các nghiên cứu thực nghiệm là kiểm chứng mô hình lý thuyết tính toán các đặc trưng làm việc của động cơ đã được thiết lập. Để tiến hành thử nghiệm, cần phải có một động cơ mẫu được xây dựng tương thích với các điều kiện của mô hình tính toán.

Việc xây dựng động cơ mẫu của một loại động cơ có nguyên lý mới, chưa được nghiên cứu ở nước ta đòi hỏi phải thực hiện những thử nghiệm cần thiết, đặc biệt là đối với những bộ phận kết cấu đặc trưng riêng cho loại động cơ này.

#### **3.1. Xây dựng động cơ mẫu thử nghiệm**

##### ***3.1.1. Xác định kết cấu động cơ mẫu***

Tương tự động cơ thật, động cơ mẫu gồm các bộ phận hợp thành như sau:

- Buồng đốt sơ cấp (buồng 1) với nắp sau;
- Buồng đốt thứ cấp (buồng 2) với nắp trước;
- Cụm vách ngăn liên kết hai buồng đốt;
- Khối loa phụt;
- Liệu nhiên liệu rắn và thiết bị mồi trong buồng đốt 1;
- Liệu nhiên liệu rắn và thiết bị mồi trong buồng đốt 2.

Ngoài ra có thể có các chi tiết phụ trợ giống như trong động cơ tên lửa nhiên liệu rắn thông thường như các chi tiết định vị liệu nhiên liệu trong buồng đốt, các chi tiết hãm dòng trước loa phụt,...

Kết cấu các buồng đốt và khối loa phụt có thể áp dụng các kết cấu tương ứng của động cơ mẫu thông thường. Buồng đốt kết cấu dạng ống trụ,



nồi với nắp trước (buồng 2) và nắp sau (buồng 1) bằng các mối ghép ren. Khối loa phụt cũng được ghép bằng ren với nắp sau trên buồng đốt 1.

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 dạng kết cấu vách ngăn này đều có những nhược điểm nhất định.

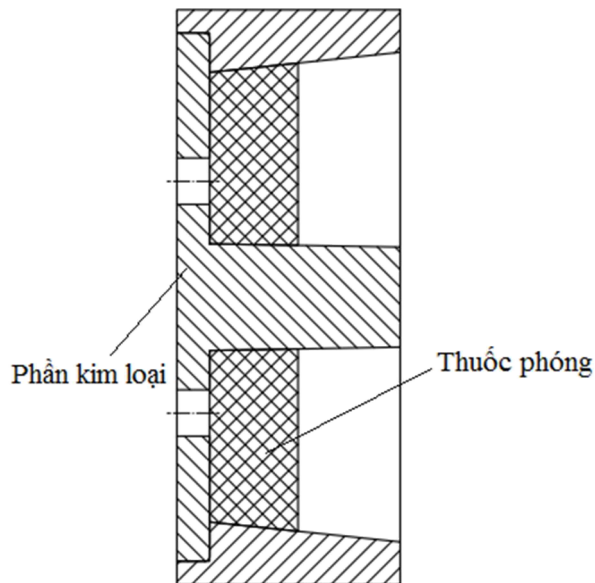
Nhược điểm của phương pháp dùng vách ngăn dạng van một chiều là việc đảm bảo độ bền của van một chiều trong không gian buồng đốt 1 khi buồng đốt 2 làm việc. Ngoài ra, công nghệ chế tạo các chi tiết của van một chiều để bịt kín các mặt tiếp xúc phức tạp, đòi hỏi chính xác rất cao.

Nhược điểm của các kết cấu vách ngăn phá hủy là các mảnh vỡ của màng ngăn (bằng nhôm hoặc bột đá keramic) phụt ra ngoài qua loa phụt với tốc độ cao làm xói mòn và phá hủy kết cấu loa phụt, đặc biệt có thể làm thay đổi thiết diện tới hạn của loa phụt, ảnh hưởng đến sự thay đổi áp suất cũng như lực đẩy của động cơ. Ngoài ra, công nghệ chế tạo màng ngăn bằng nhôm và vách ngăn bằng bột đá biên dạng hình cầu tương đối phức tạp và đòi hỏi thử nghiệm nhiều lần để đảm bảo vách ngăn có khả năng chịu bền khi buồng đốt 1 làm việc và dễ dàng phá hủy khi buồng đốt 2 làm việc.

Nhược điểm của phương pháp vách ngăn đàn hồi tập trung ở việc chế tạo các vật liệu cách nhiệt, đòi hỏi công nghệ rất cao và phải thử nghiệm nhiều lần. Vách ngăn đàn hồi bằng vật liệu cách nhiệt phải đảm bảo bền nhiệt và kín tuyệt đối trong quá trình buồng đốt 1 làm việc, tuy nhiên khi buồng đốt 2 kích hoạt, vách ngăn đàn hồi phải dễ dàng bị phá vỡ tạo không gian cho sản phẩm cháy chuyển động qua buồng đốt 1 và phụt ra ngoài qua loa phụt chung

của động cơ. Ngoài ra, những dị vật của vật liệu cách nhiệt cũng có thể xuất hiện làm cản trở dòng sản phẩm cháy của động cơ.

Tóm lại, các kết cấu vách ngăn đã được nghiên cứu ở nước ngoài đều có những 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. Vì vậy, 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).

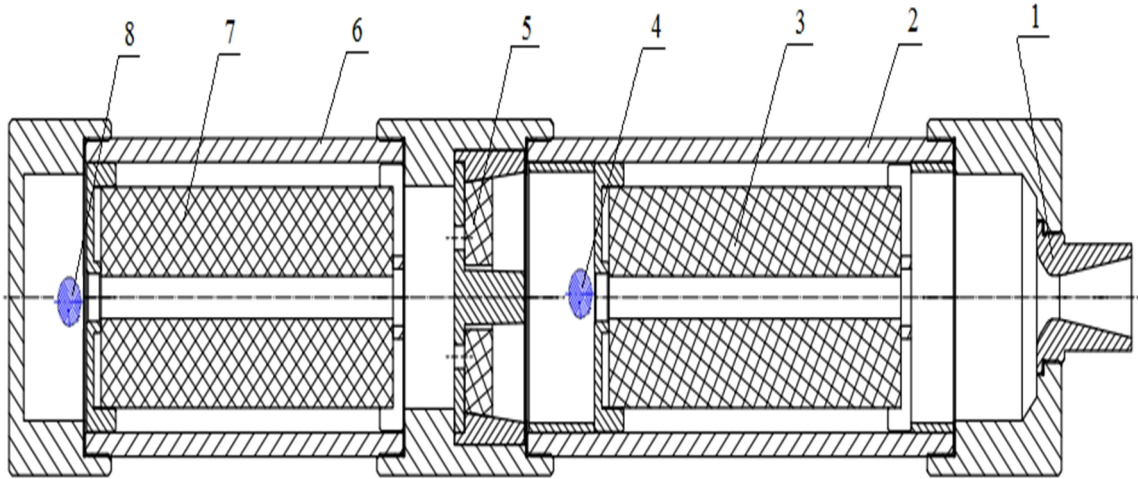


Hình 3.1. Cấu tạo cụm vách ngăn

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

Trên hình 3.2, trình bày sơ đồ kết cấu động cơ mẫu được xây dựng.



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

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

### 3.1.2. Xác định các thông số cơ bản của động cơ mẫu

#### \* Xác định kích thước các nhiên liệu và thiết bị môi trong các buồng đốt

Kết cấu các nhiên liệu được lựa chọn trong giới hạn rất hẹp do hạn chế của điều kiện nghiên cứu thực nghiệm của đề tài luận án. Do vậy, kết cấu của các nhiên liệu dựa trên thuốc phóng keo RSI-12M hình ống, có đường kính ngoài  $D_n=104$  mm, đường kính lỗ  $d_{tr}=18$  mm. Tương ứng với loại thuốc phóng được sử dụng, thiết bị môi trong cả hai buồng đốt đều được cấu tạo từ thuốc đen cỡ hạt số 2.

Để thuận tiện cho việc nghiên cứu nguyên lý, lựa chọn chiều dài các nhiên liệu trong các buồng đốt có kích thước bằng nhau và bằng 200 mm.

Như vậy, kích thước chi tiết của các liều nhiên liệu trong các buồng đốt như sau:

+ Đường kính ngoài:  $D_{n1} = D_{n2} = 104 \text{ mm}$

+ Đường kính trong:  $d_{tr1} = d_{tr2} = 18 \text{ mm}$

+ Chiều dài:  $L_{Lp1} = L_{Lp2} = 200 \text{ mm}$

**\* Xác định các kích thước cơ bản của các buồng đốt và loa phụt**

Xét buồng đốt động cơ với thanh thuốc phóng hình trụ có các kích thước như sau:

+ Đường kính trong buồng đốt:  $D_k$

+ Đường kính ngoài của thanh thuốc phóng:  $D_n$

+ Đường kính trong của thanh thuốc phóng:  $d_{tr}$

+ Chiều dài thanh thuốc phóng:  $L_{Lp}$

Theo [20], [22], đường kính trong của buồng đốt được xác định từ điều kiện đồng nhất các thông số bên trong rãnh và bên mặt ngoài thanh thuốc phóng :

$$\chi_{tr} = \chi_n \quad (3.1)$$

trong đó:

$\chi_{tr}, \chi_n$  - tương ứng là các tham số đặc trưng cho hiện tượng xói mòn (tham số Pôbiedônôsczew) trong lỗ và trên bề mặt ngoài của thanh thuốc phóng;

Biểu thức xác định các tham số  $\chi_{tr}$  và  $\chi_n$  có dạng:

$$\chi_{tr} = \frac{\pi d_{tr} \cdot L_{Lp}}{\frac{\pi}{4} d_{tr}^2} = \frac{4L_{Lp}}{d_{tr}}; \quad (3.2)$$

$$\chi_n = \frac{\pi \cdot D_n \cdot L_{lp}}{\frac{\pi}{4} (D_k^2 - D_n^2)} = \frac{4D_n \cdot L_{lp}}{D_k^2 - D_n^2}, \quad (3.3)$$

Từ (3.1), (3.2) và (3.3), nhận được:

$$D_k = \sqrt{D_n (D_n + d_{tr})}. \quad (3.4)$$

Áp dụng biểu thức (3.4) cho các buồng đốt của động cơ, xác định các đường kính trong của các buồng đốt 1 và 2 là :

$$D_{k1} = D_{k2} = 112,6 \text{ mm}$$

Lựa chọn đường kính trong của các buồng đốt  $D_{k1} = D_{k2} = 114 \text{ mm}$

Động cơ mẫu thử nghiệm thường được thiết kế với chiều dày vỏ tương đối lớn để đảm bảo an toàn và sử dụng nhiều lần. Lấy hệ số dự trữ bền  $\eta=2,5$  ta xác định được chiều dày vỏ buồng đốt động cơ theo công thức [20]:

$$\Delta = \frac{p_{\max} D_k \eta}{[\sigma_B]}, \quad (3.5)$$

trong đó:

$p_{\max}$  - áp suất làm việc lớn nhất trong buồng đốt động cơ.

Chọn  $p_{\max}=200 \times 10^5 \text{ Pa}$ ;

$\sigma_B$  - Giới hạn bền vật liệu kết cấu buồng đốt. Vật liệu chế tạo động cơ là thép 40X có  $[\sigma_B]=650 \text{ MPa}$

Từ đó tính được  $\Delta = 8,7 \text{ mm}$ . Chọn  $\Delta = 10 \text{ mm}$ .

Đường kính ngoài các buồng đốt của động cơ :

$$D_1 = D_2 = D_{k1} + 2\Delta = 134 \text{ mm}.$$

Căn cứ vào kết cấu cụ thể của các chi tiết động cơ như đĩa chắn thuốc, nắp trước, nắp sau của động cơ, xác định được chiều dài buồng đốt động cơ  $L_k = 292 \text{ mm}$ .

Đường kính tiết diện tới hạn của loa phụt của động cơ được xác định từ điều kiện không xảy ra hiện tượng cháy xói mòn như sau :

$$\chi \leq \chi_{gh}$$

trong đó:

$\chi_{gh}$  - Thông số Pôbiedônôsczew giới hạn.

$$\chi_{gh} = \frac{w_{gh}}{a} \quad (3.6)$$

với a là ký hiệu của biểu thức:

$$a = \frac{\varphi_2 \cdot K_0^2(k) \cdot F_{th} \cdot C^*}{S_0}; \quad (3.7)$$

$w_{gh}$  - Tốc độ giới hạn của sản phẩm cháy,  $w_{gh} = 100$  m/s [65];

$$K_0(k) = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}}; \quad (3.8)$$

$$F_{th} = \frac{\pi \cdot d_{th}^2}{4}; \quad (3.9)$$

$S_0$  - Diện tích bề mặt cháy ban đầu,

$$S_0 = \pi(D_n + d_{tr})L_{lp} + \frac{\pi}{2}(D_n^2 - d_{tr}^2); \quad (3.10)$$

trong đó, các giá trị:  $C^*$  - Xung lượng riêng của áp suất;

$k$  - hệ số mũ đoạn nhiệt

của nhiên liệu đã được tính toán bằng lý thuyết hoặc bằng thực nghiệm [1], [3], [22] trên cơ sở xử lý kết quả đo áp suất của các động cơ của đạn phản lực GRAD và B41-M. Cụ thể:

- Đối với nhiên liệu RSI-12M:  $k=1,25$ ;  $C^* = 1271$  m/s;

Từ biểu thức (3.6), (3.7) thấy rằng giá trị  $\chi_{gh}$  chỉ phụ thuộc vào đường kính tiết diện tối hạn  $d_{th}$  khi các tham số khác đã biết:  $d_{th}$  càng lớn thì  $\chi_{gh}$  càng nhỏ. Mặt khác, từ điều kiện  $\chi_{tr} < \chi_{gh}$  và  $\chi_n < \chi_{gh}$  với  $\chi_{tr}, \chi_n$  được tính theo công thức (3.2), (3.3) hoàn toàn xác định được đường kính tiết diện tối hạn lớn nhất của động cơ thỏa mãn điều kiện cháy xói mòn.

Cho  $d_{th}$  một số giá trị, tính  $\chi_{gh}$  theo (3.6), so sánh  $\chi_{gh}$  với  $\chi_{tr}, \chi_n$  sẽ tìm được  $d_{th}$  lớn nhất.

Đối với động cơ sử dụng liệu nhiên liệu thí nghiệm RSI-12M  $d_{th(max)}=22$  mm.

Lựa chọn  $d_{th} = 18$  mm, khi đó các giá trị của tham số Pôbiedônôsczew như sau:

$$\chi_{gh} = 66,98, \quad \chi_{tr} = 44,45, \quad \chi_n = 38,17$$

Rõ ràng  $\chi_{tr} < \chi_{gh}$  và  $\chi_n < \chi_{gh}$ , điều kiện về cháy xói mòn được thỏa mãn.

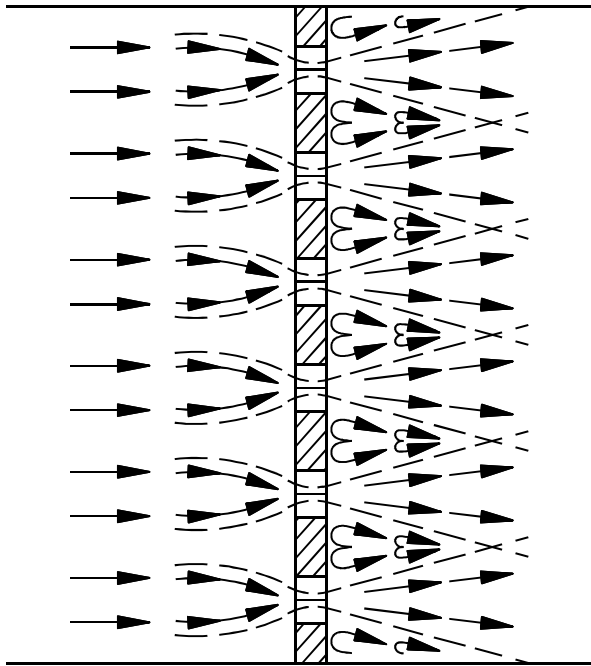
### \* Thiết kế kết cấu vách ngăn

Từ cấu tạo vách ngăn đã được trình bày trên hình 3.1, có thể nhận thấy, việc thiết kế kết cấu vách ngăn bao gồm hai bài toán sau:

- 1) Xác định số lượng và kích thước các lỗ thông trên vách ngăn;
- 2) Xác định bề dày của liệu phóng trong vách ngăn.

Số lượng và kích thước các lỗ thông trên vách ngăn phải đảm bảo chất lượng của dòng chảy của khí trao đổi giữa hai buồng đốt khi buồng đốt 2 được kích hoạt. Trong không gian sau vách ngăn diễn ra sự giãn nở đột ngột dòng sản phẩm cháy tạo ra tổn thất cục bộ trong các buồng đốt. Giả sử các lỗ thoát khí của vách ngăn có bố trí đối xứng và đều đặn theo tiết diện buồng đốt

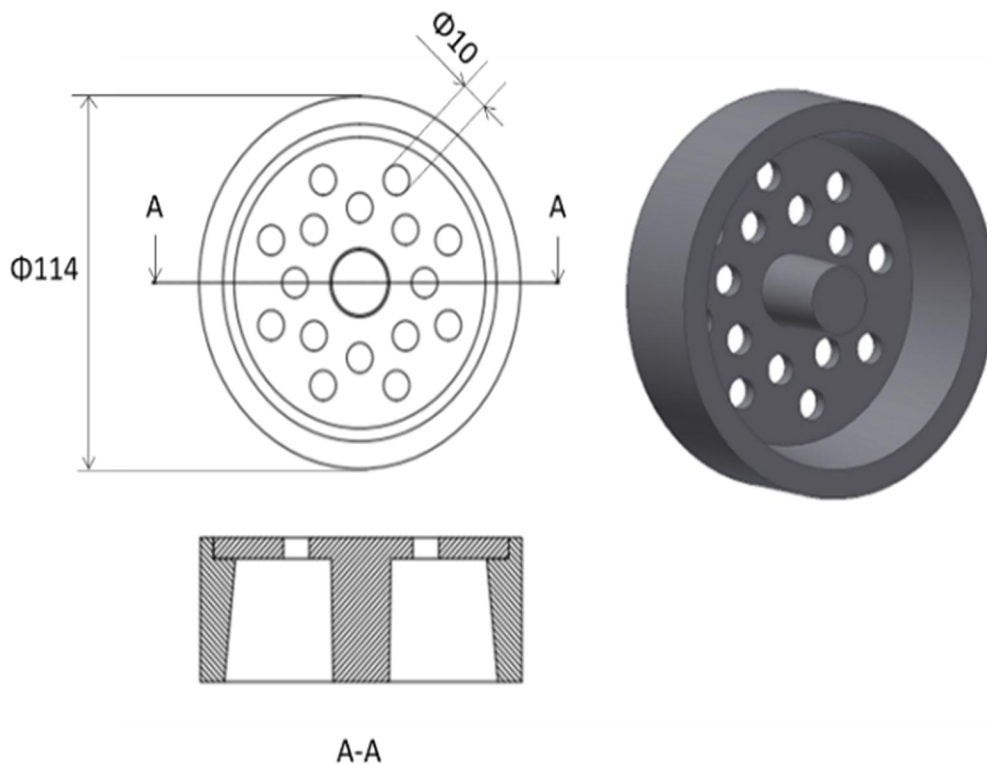
(hình 3.3). Bản chất tổn thất của dòng khí đi qua vách ngăn phẳng là do dòng bị nén lại khi đi vào các lỗ thoát khí và được tăng tốc qua từng lỗ thoát khí trên vách ngăn. Nghĩa là xuất hiện các tổn thất liên quan đến cửa vào các lỗ thoát khí và sự giãn nở đột ngột ở cửa ra các lỗ.



Hình 3.3. Dòng sản phẩm cháy đi qua các lỗ thông trên vách ngăn

Trên quan điểm khí động lực học, việc lắp đặt vách ngăn làm cản trở dòng sản phẩm cháy và gây ra các tổn thất năng lượng. Để làm giảm sự ảnh hưởng bất lợi của vách ngăn cần lựa chọn hợp lý tỷ lệ tổng diện tích tiết diện thoát khí của các lỗ thông so với diện tích tiết diện tới hạn loa phụt  $F_{lt}/F_{th}$ . Tỷ lệ diện tích  $F_{lt}/F_{th}$  phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác nhau của liêu nhiên liệu và kích thước của khối loa phụt. Theo tài liệu [ 54], thông thường đặc trưng dòng sản phẩm cháy được đảm bảo khi  $F_{lt}/F_{th} = 4 \div 5$ . Vì vậy, lựa chọn  $F_{lt}/F_{th} = 5$ . Khi đó thiết kế vách ngăn gồm 16 lỗ thông có đường kính 10 mm, được bố trí trên hai đường tròn đồng tâm như trên hình 3.4.

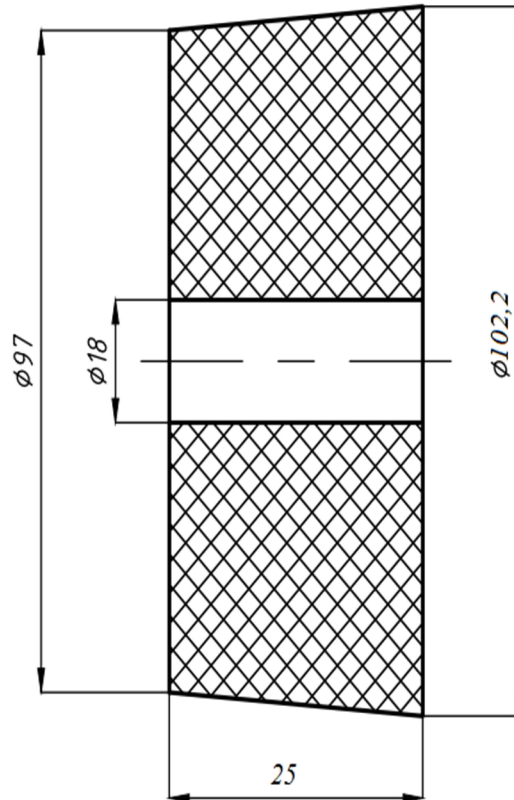




Hình 3.4. Kết cấu phần kim loại của vách ngăn giữa hai buồng đốt

Bài toán xác định bề dày cháy của liều phóng trong vách ngăn đảm bảo các điều kiện bịt kín vách ngăn khi buồng đốt 1 làm việc và dễ dàng bị thổi bay khi kích hoạt buồng đốt 2 là rất phức tạp, đòi hỏi rất nhiều tính toán và thử nghiệm về độ bền của thuốc phóng cũng như kết cấu phần kim loại của vách ngăn.

Để đảm bảo liều phóng trong vách ngăn dễ dàng bị tách rời khi kích hoạt buồng đốt 2, sự liên kết giữa liều phóng và phần kim loại trong vách ngăn được thiết kế biên dạng côn (một góc côn khoảng  $12^{\circ}$ ) và được bịt kín bằng keo chuyên dụng. Bề dày cháy của liều phóng trong vách ngăn được xác định bằng phương pháp thực nghiệm, được trình bày trong mục 3.2.1. Từ kết quả thực nghiệm, xác định được bề dày cháy của liều phóng trong vách ngăn của động cơ mẫu thử nghiệm là 25 mm (hình 3.5).



Hình 3.5. Liệu thuốc phóng trong vách ngăn  
 Các thông số chính của vách ngăn được trình bày trong bảng 3.1.

Bảng 3.1. Các tham số chính của vách ngăn

Tham số	Giá trị
<b>Phần kim loại</b>	
Số lượng lỗ thông	16
Đường kính lỗ, [m]	0,01
<b>Liệu thuốc phóng</b>	
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

Từ các kết quả trên, các thông số cơ bản của động cơ mẫu thử nghiệm được trình bày trong bảng 3.2.

Bảng 3.2. Các tham số chính của động cơ mẫu thử nghiệm

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 thổi 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
Bề dày cháy của các liều phóng, [m]	0,0215	0,0215
Mác của thuốc phóng	RSI-12M	RSI-12M
Đường kính tối hạn loa phụt, [m]	0,018	

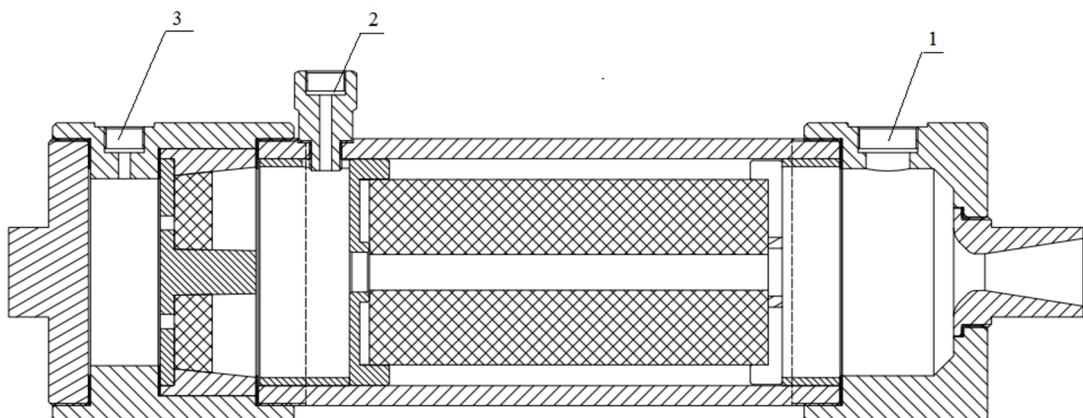
### 3.2. Nghiên cứu thực nghiệm kết cấu vách ngăn

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

*Mục đích của thực nghiệm:* Kiểm tra khả năng bịt kín của vách ngăn và xác định bề dày cháy của liều phóng trong vách ngăn.

##### 3.2.1.1. Sơ đồ thực nghiệm

Động cơ mẫu thử nghiệm kết cấu vách ngăn có cấu tạo như trên hình 3.6.



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

Trong đó, động cơ thử nghiệm được rút gọn từ động cơ mẫu hai buồng đốt mà không có thành phần buồng đốt 2, tức là chỉ bao gồm các bộ phận sau: buồng đốt 1, khối vách ngăn và khối loa phụt. Đây thực chất là thử nghiệm giai đoạn làm việc thứ nhất trong sơ đồ đầy đủ của động cơ hai buồng đốt. 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). Trên hình 3.6, các cảm biến áp suất được lắp đặt tại các vị trí số 2 và 3, van an toàn của động cơ được lắp tại vị trí số 1.

Từ các giá trị áp suất này sẽ kiểm tra được sự bịt kín của vách ngăn và xác định được bề dày cháy an toàn của liều phóng trong vách ngăn. Vách ngăn chỉ đảm bảo được bịt kín và làm việc an toàn nếu như áp suất trong buồng đốt trung gian không xuất hiện, ngược lại trong trường hợp tồn tại áp suất trong buồng trung gian sau vách ngăn thì vách ngăn đã bị đánh thủng.

Tính toán bề dày cháy của vách ngăn trên phương diện tốc độ cháy và thời gian mở thông vách ngăn. Nếu bề dày cháy của liều phóng trong vách ngăn và của liều nhiên liệu 1 (buồng đốt 1) bằng nhau, vách ngăn sẽ bị đánh thủng trước khi buồng đốt 1 kết thúc quá trình cháy, do sự chênh áp suất giữa buồng 1 và buồng 2. Vì vậy, để đảm bảo liều phóng trong vách ngăn không bị đánh thủng trong giai đoạn cuối của quá trình cháy liều nhiên liệu 1 khi bề dày liều phóng trong vách ngăn còn rất mỏng, cần phải lựa chọn bề dày liều phóng trong vách ngăn lớn hơn bề dày của liều nhiên liệu 1. Như vậy, bề dày cháy của liều phóng trong vách ngăn được xác định như sau:

$$h = e_{11} + \delta$$

Trong đó,  $e_{11}$  - là bề dày của liều nhiên liệu 1

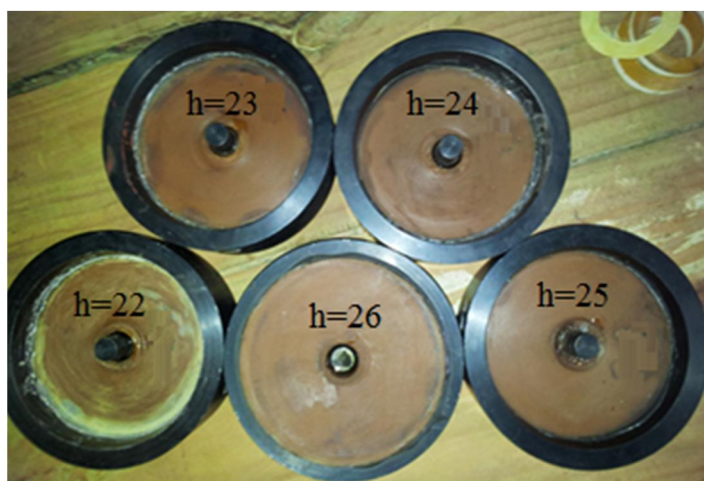
Như đã phân tích ở trên, việc xác định được bề dày cháy của liều phóng trong vách ngăn phải đảm bảo đồng thời hai tiêu chí: Vách ngăn không bị đánh thủng khi buồng đốt 1 làm việc và vách ngăn dễ dàng bị đánh thủng khi kích hoạt buồng đốt 2. Vì vậy, để xác định giá trị  $\delta$  cần phải thực hiện các nghiên cứu thực nghiệm xác định việc đánh thủng vách ngăn với các giá trị khác nhau của  $\delta$  khi buồng đốt 1 làm việc và sau đó tiến hành thực nghiệm xác định áp suất mở thông vách ngăn.

Lựa chọn  $\delta = 1,5; 2,5; 3,5$  mm, ta tính được  $h=23; 24; 25$  mm

Liều phóng trong vách ngăn có bề dày cháy khác nhau theo các phương án trên bảng 3.3 và hình 3.7.

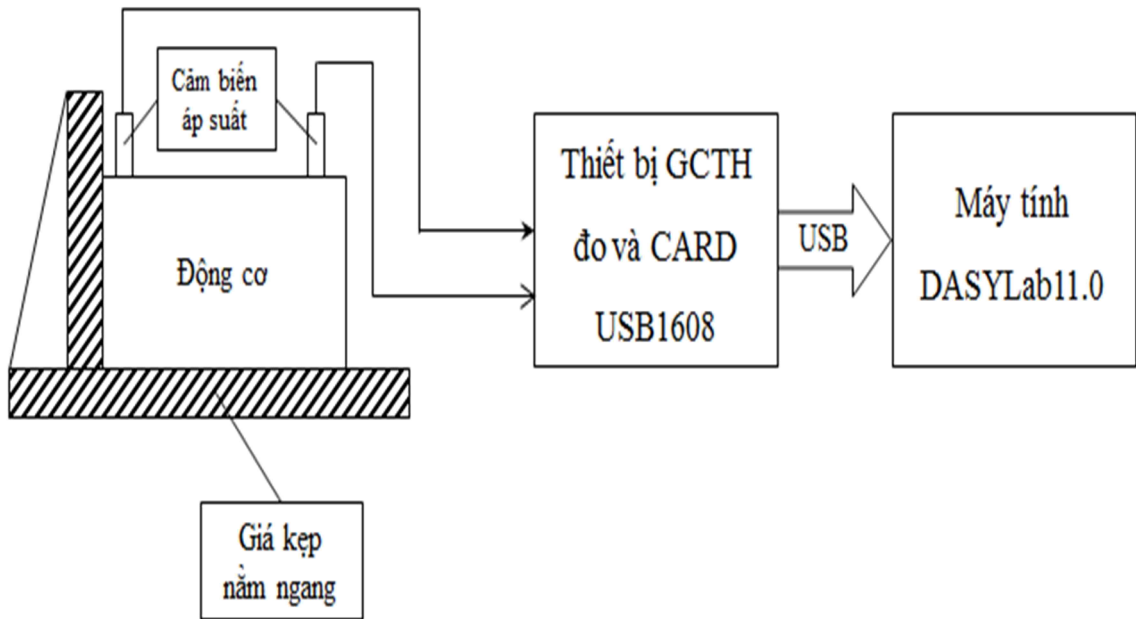
Bảng 3.3. Các phương án kích thước liều phóng trong vách ngăn

Phương án	Bề dày cháy của liều nhiên liệu, mm	Bề dày cháy của liều phóng trong vách ngăn, mm
1	21,5	23
2	21,5	24
3	21,5	25



Hình 3.7. Các phương án vách ngăn với bề dày cháy khác nhau

Sơ đồ thử nghiệm động cơ mẫu trên giá được trình bày trên hình 3.8.



Hình 3.8. Sơ đồ thử nghiệm động cơ

### 3.2.1.2. Hệ thống thiết bị đo

Phương tiện đo phục vụ thử nghiệm bao gồm cảm biến đo áp suất DA-10-08 và hệ thống đo đa năng DEWE-4000 của Viện Tên lửa đã được kiểm định bởi Viện Đo lường Việt Nam cho đầu áp suất theo giấy chứng nhận số 16/189/ĐL3.78 ngày 16/9/2016.

- Cảm biến đo áp suất DA-10-08:



Hình 3.9. Cảm biến đo áp suất động cơ tên lửa DA-10-08

Cảm biến áp suất DA-10-08 là một loại cảm biến đo áp suất nhiệt động làm việc dựa trên nguyên lý biến dạng đàn hồi, chúng được thiết kế để đo áp suất trong buồng đốt của các loại động cơ tên lửa có dải đo phù hợp. Áp suất

làm việc của động cơ được cảm biến thu nhận và biến đổi thành giá trị điện áp tương ứng để phù hợp với các thiết bị gia công tín hiệu đi kèm cảm biến.

Bảng 3.4. Các tham số cơ bản của cảm biến đo áp suất DA-10-08

Tham số	Đơn vị	Giá trị
- Phạm vi đo	Bar	0 ÷ 300
- Độ phân giải	Bar	0,01
- Độ không đảm bảo đo U	%	0,3
- Hệ số phủ k		2
- Mức tin cậy P	%	95

- Hệ thống đo đa năng DEWE-4000

Các cảm biến đo áp suất được nối ghép với hệ thống đo đa năng DEWE-4000 (hình 3.10). DEWE-4000 là một hệ thống đo đa năng đồng bộ các tham số cơ nhiệt biến dạng, áp suất, lực đẩy.



Hình 3.10. Hệ thống đo đa năng DEWE-4000



Hình 3.11. Hệ thống đo đa năng DEWE 4000 triển khai tại thực địa

Để kết nối các cảm biến đo áp suất với hệ thống đo đa năng DEWE-4000 sử dụng 02 kênh DAQN - BRIDGE modul được lắp đặt sẵn trong máy. Các modul này có các đặc tính kỹ thuật chính như sau:

- Có thể sử dụng đồng bộ với các cảm biến đo kiểu tem điện trở có kết cấu cầu đủ, cầu 1/2 hay cầu 1/4. Với độ nhạy của cảm biến là 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0 và 5.0 mV/V.

- Việc chọn chế độ làm việc tương ứng với các độ nhạy trên của cảm biến và các chế độ lọc có thể thực hiện bằng tay hay bằng phần mềm.

- Modul cung cấp cho cảm biến nguồn nuôi DC ổn định là 2.5, 5, 10 và 15 vôn tùy chọn.



Hình 3.12. Modul DAQN - BRIDGE

- Điện trở cầu đo từ 120  $\Omega$  đến 10 k $\Omega$ .

- Trở kháng ra nhỏ hơn 10  $\Omega$ .

- Tín hiệu nhận vào từ cảm biến đo thông qua giắc 9 chân.

Để bảo đảm an toàn cho người và thiết bị đo, khoảng cách từ cảm biến đo tới vị trí đặt thiết bị đo phải lớn hơn 50 m. Do đó hệ thống cáp truyền tín hiệu đo từ cảm biến về trung tâm được sử dụng là loại cáp chuyên dụng (CAP-01, CAP-02, CAP-03, CAP-04) được bọc kim để chống các nhiễu trên đường truyền.

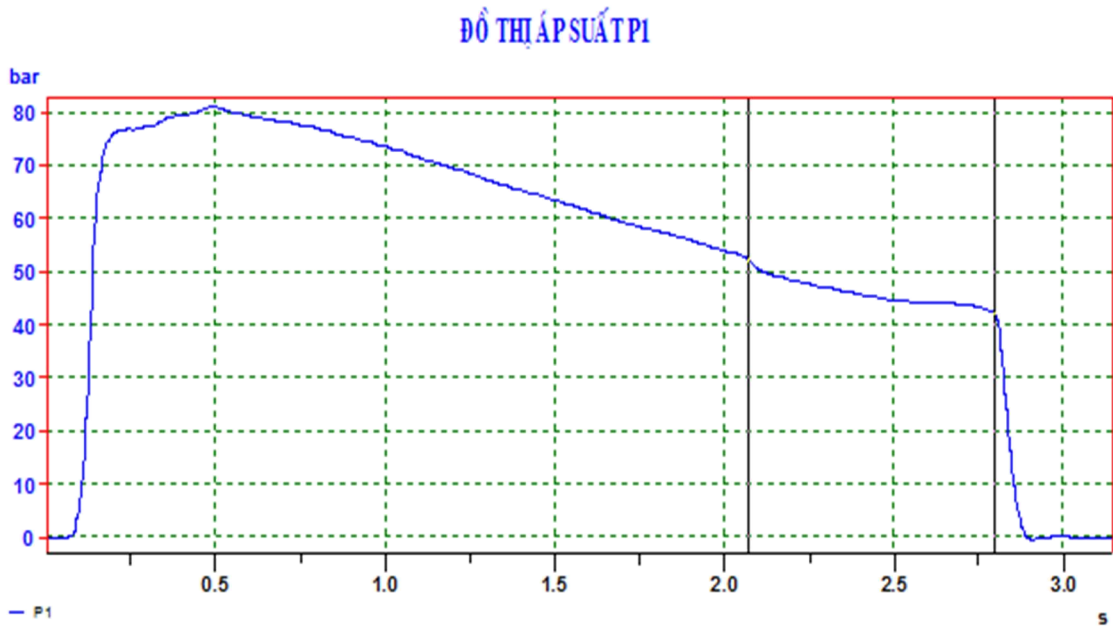
Tín hiệu từ cảm biến đo (khoảng vài chục mV) được truyền từ cảm biến tới modul DAQN - BRIDGE, tại đây tín hiệu đo được khuếch đại lên cỡ vài vôn và đưa tới CARD ADC PCI-DAS1620/16 rồi được xử lý hiển thị và lưu giữ trên phần mềm Dasy Lab 11.0.

### 3.2.1.3 Kết quả thực nghiệm

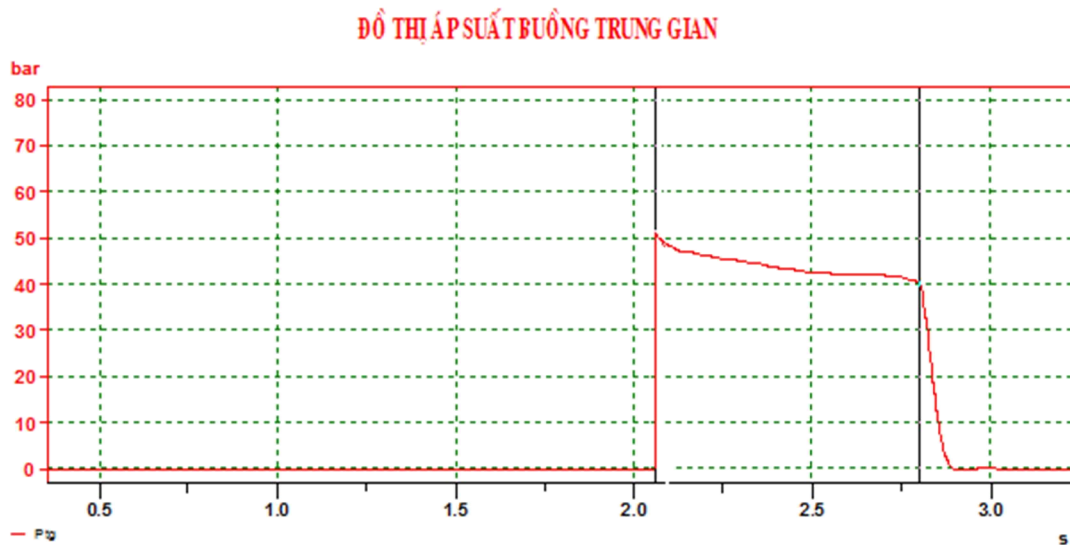
Kết quả thử nghiệm động cơ mẫu như sau:



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



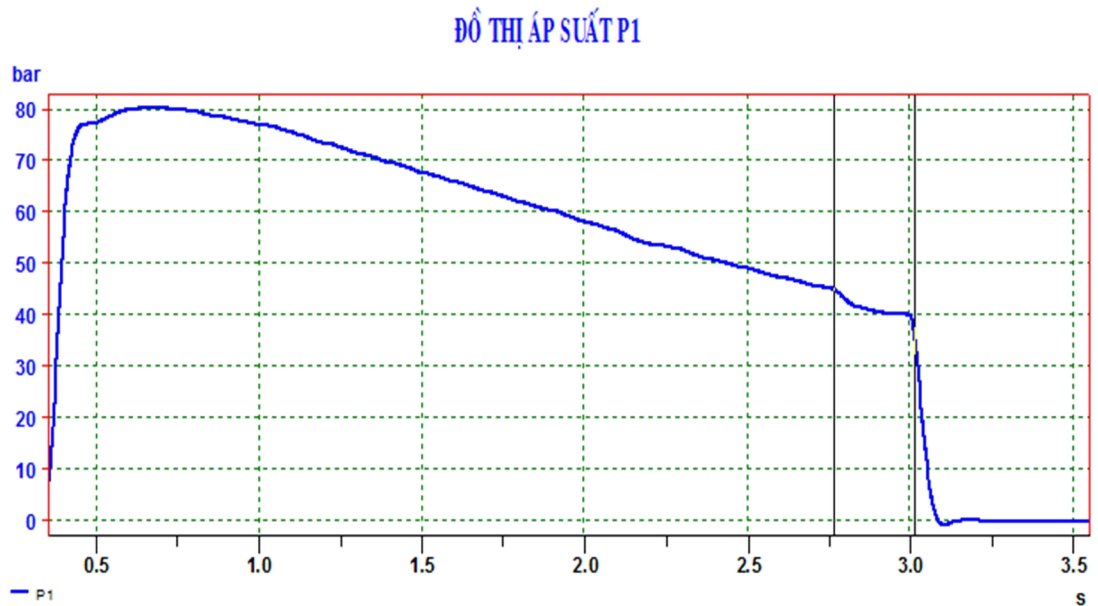
Hình 3.13. Đồ thị áp suất buồng đốt 1 khi  $h=23$  mm



Hình 3.14. Đồ thị áp suất buồng trung gian khi  $h=23$  mm

**Nhận xét:** Khi bề dày cháy của liệu phóng trong vách ngăn  $h=23$  mm (lớn hơn bề dày cháy của liệu nhiên liệu 1 giá trị  $\delta=1,5$  mm), 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 liệu phóng trong vách ngăn  $h=24$  mm



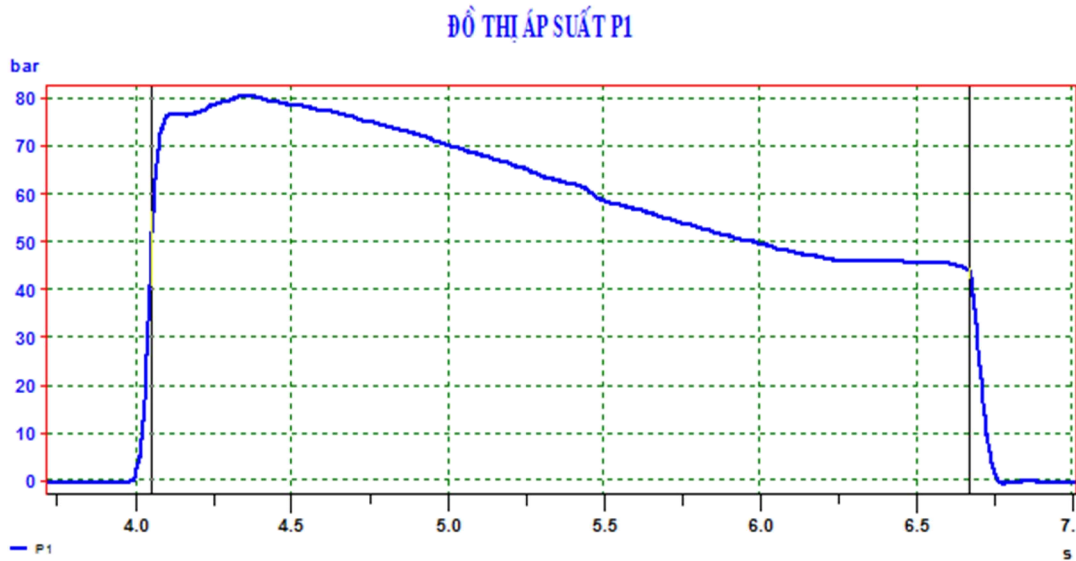
Hình 3.15. Đồ thị áp suất buồng đốt 1 khi  $h=24$  mm



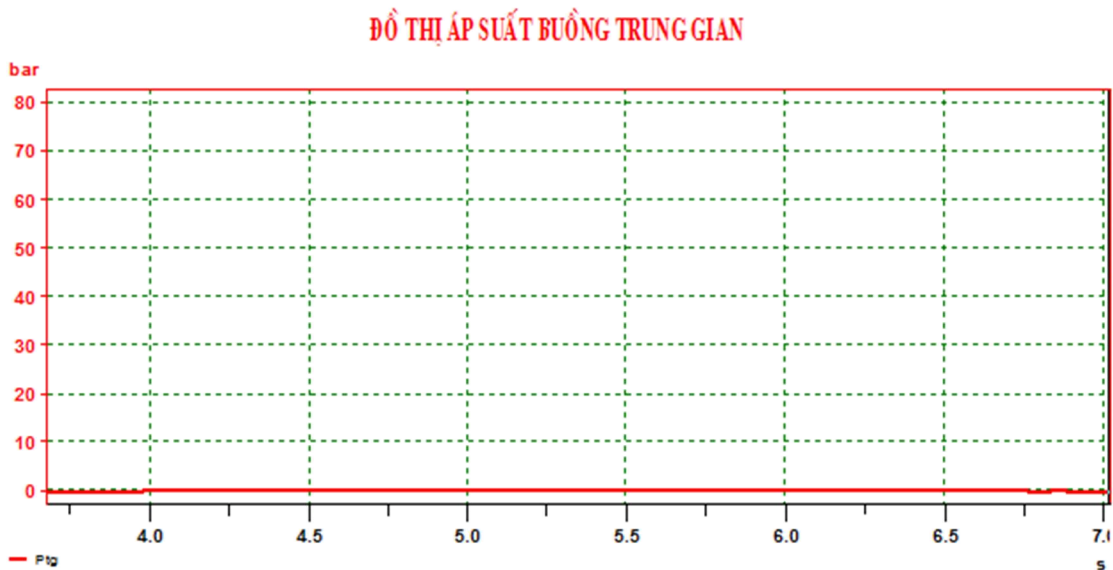
Hình 3.16. Đồ thị áp suất buồng trung gian khi  $h=24$  mm

**Nhận xét:** Khi bề dày cháy của liệu phóng trong vách ngăn  $h=24$  mm (lớn hơn bề dày cháy của liệu nhiên liệu 1 giá trị  $\delta=2,5$  mm), 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 khi  $h=25$  mm



Hình 3.18. Đồ thị áp suất buồng trung gian khi  $h=25$  mm

**Nhận xét:** Khi bề dày cháy của liệu phóng trong vách ngăn  $h=25$ mm (lớn hơn bề dày cháy của liệu nhiên liệu 1 giá trị  $\delta=3,5$  mm), không ghi nhận sự tăng áp suất trong buồng trung gian sau vách ngăn. Vách ngăn đảm bảo hoàn toàn 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

Như kết quả nghiên cứu thực nghiệm ở trên, khi bề dày của liều phóng trong vách ngăn lớn hơn bề dày cháy của liều nhiên liệu 1 giá trị  $\delta=3,5\text{mm}$ , vách ngăn đảm bảo bịt kín khi buồng đốt 1 làm việc. Để xác định điều kiện đủ trong giai đoạn làm việc thứ hai của động cơ, khi buồng đốt 2 được kích hoạt, liều phóng còn lại trong vách ngăn có được mở thông bởi áp suất khí thuốc trong buồng đốt 2 hay không, cần thiết phải tiến hành thử nghiệm xác định áp suất mở thông vách ngăn bằng phương pháp thử nghiệm khí nén.

#### 3.2.2.1 Sơ đồ thực nghiệm

Sơ đồ kết cấu động cơ mẫu để thử nghiệm được trình bày trên 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

Động cơ mẫu được rút gọn bao gồm: Buồng đốt 1 không có liều nhiên liệu 1, liều phóng trong vách ngăn có bề dày 3,5 mm được nối liền với khối trung gian sau vách ngăn.

Phương pháp thực nghiệm: Khí nén từ nguồn cao áp được bơm vào vị trí số 1 trên buồng trung gian và đồng thời đo áp suất trong buồng trung gian

tại vị trí số 2. Tăng dần áp suất khí nén đến giá trị mà vách ngăn được mở thông (liều phóng trong vách ngăn bị tách rời). Áp suất đo được trong buồng trung gian tại thời điểm vách ngăn được mở thông được xác định là áp suất mở thông vách ngăn.

#### 3.2.2.2. Kết quả thực nghiệm

Tiến hành thực nghiệm theo phương pháp trên với 03 lần thử nghiệm, kết quả xác định áp suất mở thông vách ngăn được trình bày trên bảng 3.5:

Bảng 3.5. Kết quả thực 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		

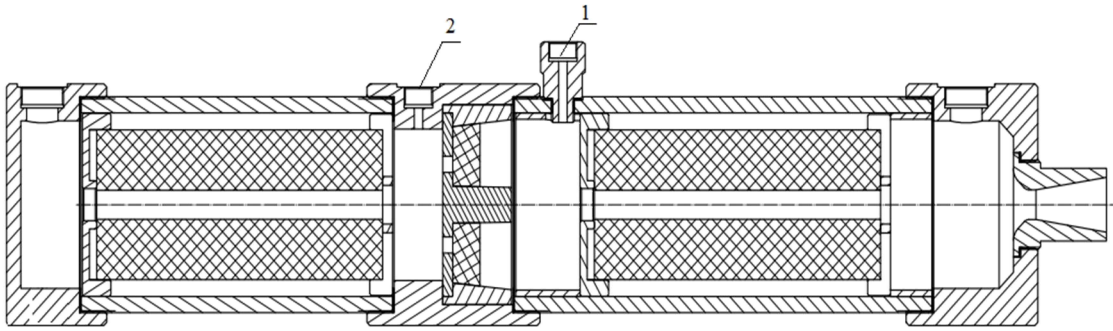
**Nhận xét:** Với liều phóng trong vách ngăn có bề dày 3,5 mm , áp suất mở thông vách ngăn trung bình là  $38,66.10^5 Pa$ , tương đương với áp suất môi của động cơ ( $40.10^5 Pa$ ).

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

Sau khi đã xác định được đầy đủ các thông số kết cấu và các liệu nhiên liệu trong động cơ mẫu, tiến hành nghiên cứu thực nghiệm để đo biểu đồ áp suất và lực đẩy của động cơ.

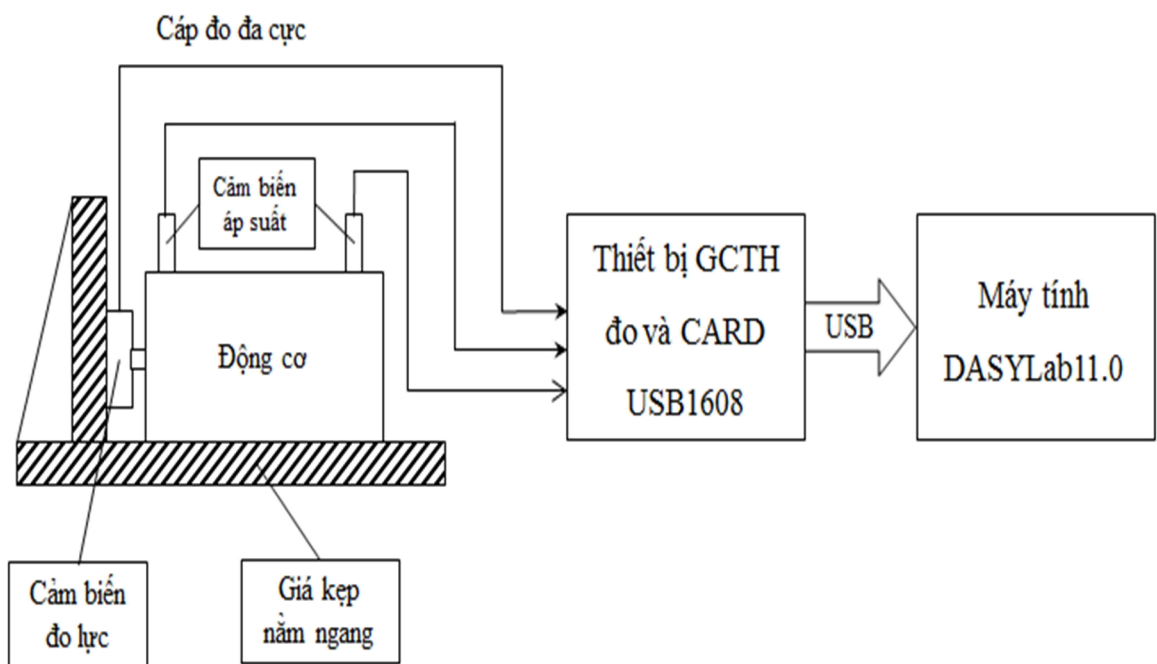
#### 3.3.1. Sơ đồ thực nghiệm

Động cơ mẫu thử nghiệm có cấu tạo như trên hình 3.20.



Hình 3.20. Động cơ mẫu thử nghiệm  
1,2- Vị trí lắp các cảm biến áp suất

Thực hiện thử nghiệm đo lực đẩy của động cơ và áp suất trong các buồng đốt tại các vị trí 1 và 2. Sơ đồ thử nghiệm động cơ mẫu trên giá đo được thể hiện trên hình 3.21.



Hình 3.21. Sơ đồ thử nghiệm động cơ mẫu trên giá đo

Tiến hành thực nghiệm mô phỏng 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. Việc điểm hỏa thiết bị mồi trong buồng đốt 2 được thực hiện bằng phương pháp hẹn giờ.

### 3.3.2. Hệ thống thiết bị đo

Sử dụng hệ thống thiết bị đo như đã trình bày trong mục 3.2.2 và cảm biến đo lực đẩy của động cơ. Thông tin về cảm biến đo lực đẩy như sau:

Cảm biến lực đẩy động cơ tên lửa ĐL-20kN là một loại cảm biến đo lực đẩy làm việc dựa trên nguyên lý biến dạng đàn hồi, chúng được thiết kế để đo lực đẩy của các loại động cơ tên lửa có dải đo phù hợp (lực đẩy của động cơ nhỏ hơn 20kN). Lực đẩy của động cơ được cảm biến thu nhận và biến đổi thành giá trị điện áp tương ứng để phù hợp với các thiết bị gia công tín hiệu đi kèm cảm biến.

Cấu tạo của cảm biến đo lực như trong hình 3.22 và 3.23.



Hình 3.22. Cảm biến đo lực ĐL-20kN

Bảng 3.6. Tính năng kỹ thuật của cảm biến đo lực

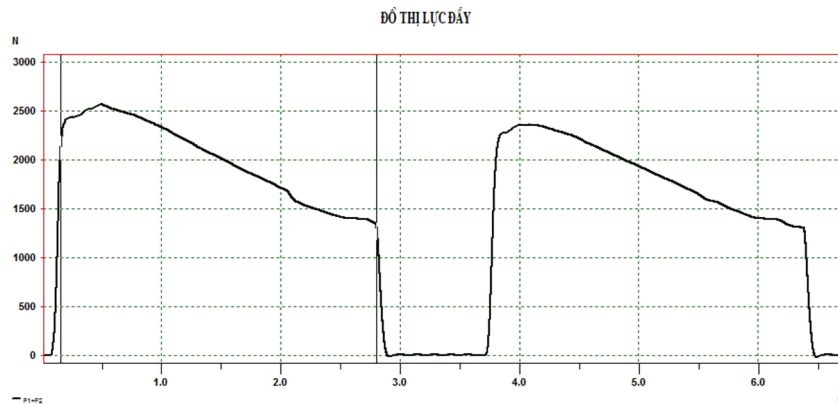
Đặc tính	Đơn vị đo	Giá trị	Ghi chú
Giới hạn đo			
- Lực đẩy	kN	20	
- Độ quá tải (nén)	kN	25	
Độ nhạy	mV/V	1,5	
Dải tần số làm việc	Hz	< 500	
Điện trở nhánh cầu	$\Omega$	$120 \pm 1$	
Độ phân giải trên toàn dải tần (0 Hz đến 500 Hz)	kN	0,001	
Độ tuyến tính biên độ	%	1	
Độ chính xác	%	5	

### 3.3.3. Kết quả thực nghiệm

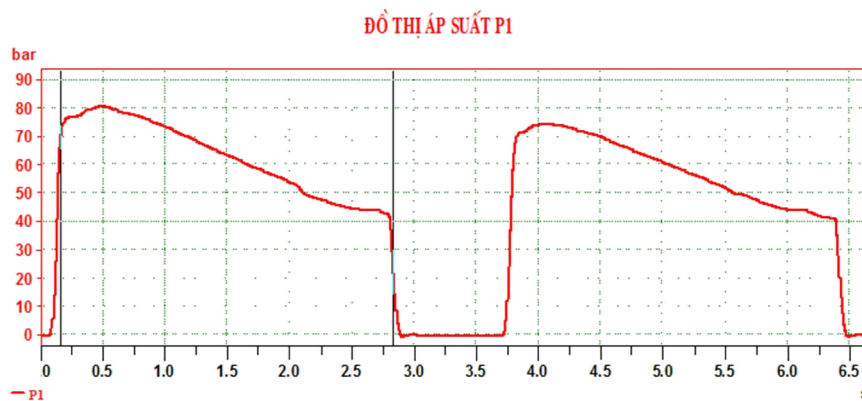
Tiến hành thử nghiệm động cơ mẫu trên giá thử nghiệm với 02 phát bắn. Hình ảnh động cơ mẫu hoạt động được trình bày trên hình 3.23.



Hình 3.23. Động cơ mẫu hoạt động trong quá trình thử nghiệm  
 Đồ thị lực đẩy của động cơ và áp suất trong các buồng đốt được thể hiện trên các hình 3.24, 3.25 và 3.26.

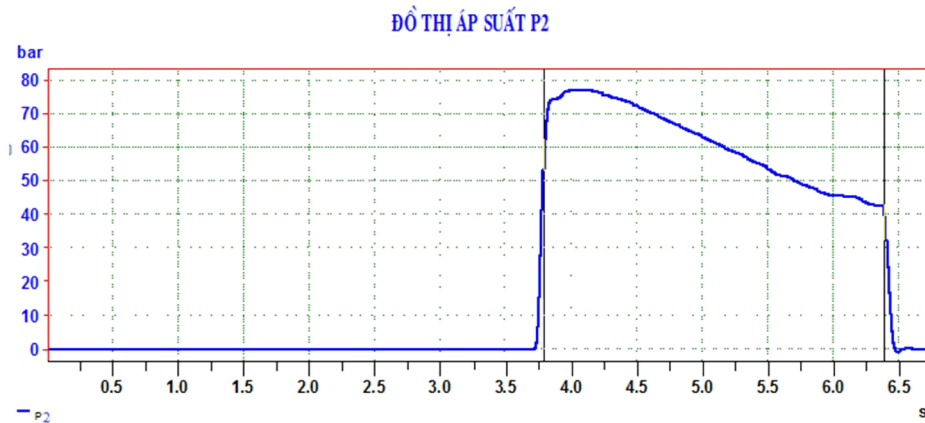


Hình 3.24. Đồ thị lực đẩy của động cơ mẫu



Hình 3.25. Đồ thị áp suất trong buồng đốt 1 động cơ mẫu





Hình 3.26. 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

Trong đó:

Hàng TB: Trung bình các giá trị của 02 phát bắn;

Hàng TT: Các giá trị tính toán lý thuyết;

Hàng SL: Sai lệch giữa tính toán lý thuyết và thực nghiệm;

$p_{11max}$ : Áp suất lớn nhất trong buồng đốt 1, giai đoạn 1;

$p_{1tb}$ : Áp suất trung bình trong buồng đốt 1, giai đoạn 1;

$t_1$ : Thời gian làm việc của giai đoạn 1;

- $p_{12max}$ : Áp suất lớn nhất trong buồng đốt 1, giai đoạn 2;  
 $p_{12tb}$ : Áp suất trung bình trong buồng đốt 1, giai đoạn 2;  
 $p_{22max}$ : Áp suất lớn nhất trong buồng đốt 2, giai đoạn 2;  
 $p_{22tb}$ : Áp suất trung bình trong buồng đốt 2, giai đoạn 2;  
 $t_2$ : Thời gian làm việc của giai đoạn 2.

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

Trong đó:

- $P_{1max}$ : Lực đẩy lớn nhất của động cơ trong giai đoạn 1;  
 $P_{1tb}$ : Lực đẩy trung bình của động cơ trong giai đoạn 1;  
 $I_{\Sigma 1}$ : Tổng xung lực của động cơ trong giai đoạn 1;  
 $P_{2max}$ : Lực đẩy lớn nhất của động cơ trong giai đoạn 2;  
 $P_{2tb}$ : Lực đẩy trung bình của động cơ trong giai đoạn 2;  
 $I_{\Sigma 2}$ : Tổng xung lực của động cơ trong giai đoạn 2;

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. Bảng 3.7 cho thấy kết quả sai lệch áp suất giữa thực nghiệm và tính toán lý thuyết trong khoảng từ 1,89 đến 9,88. Bảng 3.8 cho thấy kết quả 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 liêu 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 liêu 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 ĐÓT LIÊN HỢP**

Hiệu quả làm việc của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn có sơ đồ liên hợp hai buồng đốt phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác nhau của từng buồng đốt riêng biệt cũng như các tham số liên quan giữa hai buồng đốt. Với từng buồng đốt, việc khảo sát các yếu tố ảnh hưởng không khác nhiều so với động cơ tên lửa nhiên liệu rắn một buồng đốt thông thường và đã được trình bày trong nhiều tài liệu kỹ thuật cùng chuyên ngành. Đối với động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp, các tham số trung gian liên quan đến cả hai buồng đốt là diện tích lưu thông khí thuốc qua vách ngăn giữa hai buồng đốt và thời điểm kích hoạt buồng đốt 2. Đây là hai yếu tố quan trọng, có vai trò chi phối sự hình thành động cơ dạng đơn xung hay hai xung với các chế độ lực đẩy khác nhau. Nghiên cứu ảnh hưởng của các yếu tố này cho phép định hướng các giải pháp kỹ thuật cụ thể của việc chương trình hóa lực đẩy của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp. Từ kết quả đó, đưa ra một số chế độ làm việc khả dụng của ĐTRHBD liên hợp trong điều kiện nước ta.

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

Tồn tại sự lưu thông sản phẩm cháy giữa hai buồng đốt là đặc trưng quan trọng nhất trong quá trình làm việc của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp. Hiệu ứng lưu thông khí thuốc 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. Về mặt định tính, có thể thấy rằng:

1- Với các giá trị  $k_s$  rất lớn ( $k_s \gg 1$ ), có thể xem vách ngăn không tồn tại, hai buồng đốt liên thông sẽ suy biến thành một buồng đốt chung với sự san bằng áp suất trong toàn bộ không gian điền đầy sản phẩm cháy. Khi đó, giai đoạn 2 trong quá trình làm việc của động cơ hai buồng đốt liên hợp có thể được khảo sát như hoạt động của động cơ một buồng đốt thông thường. Vấn đề cần xác định là, với giá trị tới hạn  $k_s^*$  nào sẽ xuất hiện ứng san bằng áp suất này.

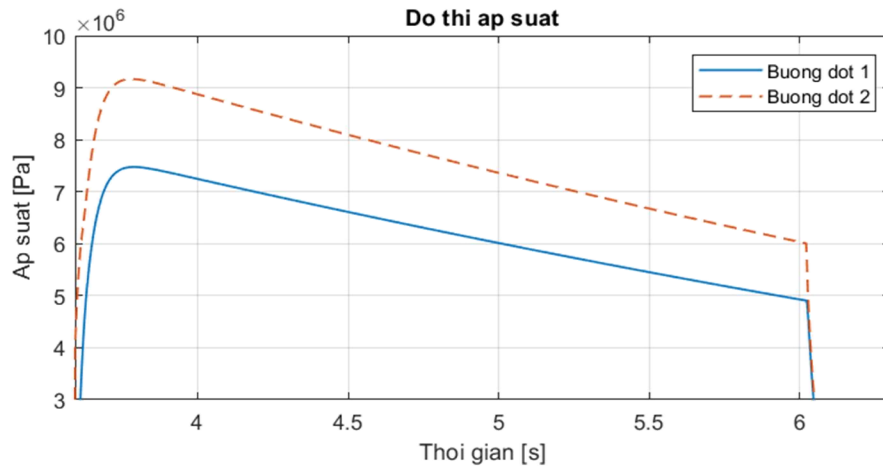
2- Theo chiều ngược lại, với những giá trị rất nhỏ của  $k_s$  ( $k_s \ll 1$ ), độ chênh áp giữa hai buồng đốt tăng cao đến một mức nào đó, tiết diện lưu thông trên vách ngăn sẽ đóng vai trò là tiết diện tới hạn của luồng sản phẩm cháy đi từ buồng đốt 2 sang buồng đốt 1. Khi đó, trong vùng gần vách ngăn của buồng đốt 1 sẽ xuất hiện hệ thống các bước nhảy nén lan truyền dưới dạng sóng xung kích trong thể tích sản phẩm cháy. Hiện tượng này làm phá vỡ trạng thái làm việc ổn định của động cơ và có thể gây nổ động cơ. Câu hỏi đặt ra là với giá trị  $k_s^{\min}$  nào để đối với  $k_s > k_s^{\min}$  sẽ cho phép động cơ có thể duy trì được chế độ làm việc ổn định.

Dưới đây sẽ trình bày phương pháp xác định các giá trị  $k_s^*$  và  $k_s^{\min}$  dựa trên mô hình toán của động cơ hai buồng đốt liên hợp, áp dụng cụ thể vào động cơ mẫu đã xây dựng. Khi đó, toàn bộ các thông số của động cơ mẫu đều được giữ không đổi, chỉ thay đổi giá trị  $F_{lt}$  tương ứng với các trường hợp khảo sát.

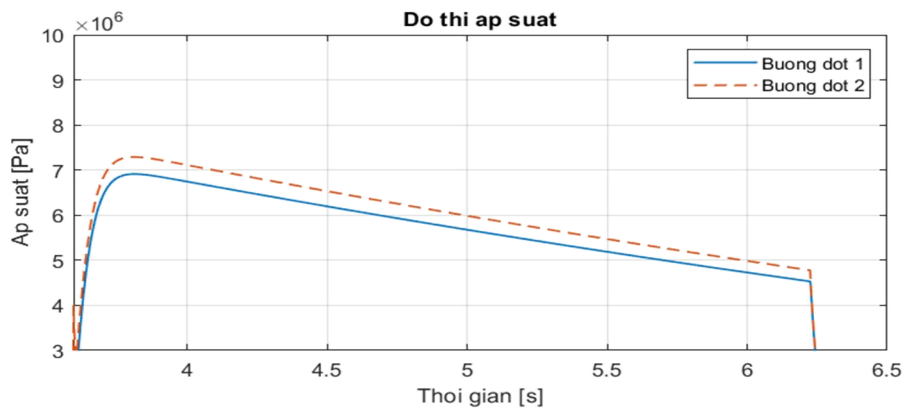
#### **4.1.1. Xác định giá trị tới hạn $k_s^*$**

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  $k_s = 1; 2; 3; 4; 5; 6$ .

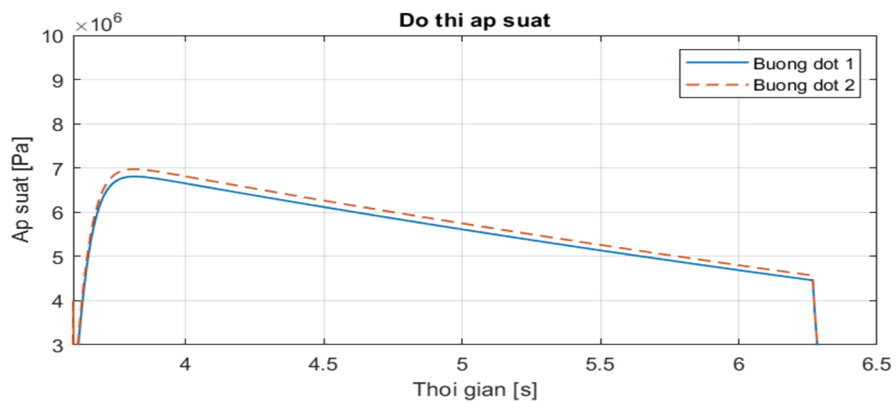
Kết quả tính toán giai đoạn 2 của động cơ được trình bày trên các hình 4.1, 4.2, 4.3 và bảng 4.1.



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



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



Hình 4.3. Đồ thị áp suất giai đoạn 2 của động cơ, khi  $k_s = 3$

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

Tỷ số $k_s$	Áp suất $p_{12\max}$ , MPa	Áp suất $p_{22\max}$ , MPa	Độ chênh áp $p_{22\max} - p_{12\max}$ , 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%

Từ các kết quả nhận được, có thể nhận thấy, với  $k_s=5$ , độ chênh lệch áp suất giữa hai buồng đốt không vượt quá 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, có thể xem 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.

Từ biểu thức tính toán lưu lượng, ta có:

$$\dot{m}_{tr.d} = \rho_1 \cdot F_{lt} \cdot w_1 \quad (4.1)$$

Tốc độ của khí thuốc đi vào buồng đốt 1 từ buồng đốt 2 sẽ là:

$$w_1 = \frac{\dot{m}_{tr.d}}{\rho_1 \cdot F_{lt}} = \frac{\dot{m}_{tr.d} \cdot RT_{g.1}}{p_1 \cdot F_{lt}} \quad (4.2)$$

Mặt khác, tốc độ truyền âm cục bộ của khí thuốc là:

$$a_1 = \sqrt{kRT_{g.1}} \quad (4.3)$$

Từ đó có thể xác định được số Mach tại cửa vào buồng đốt 1 là:

$$M = \frac{w_1}{a_1} \quad (4.4)$$

Kết quả tính toán được thể hiện trên bảng 4.2.

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

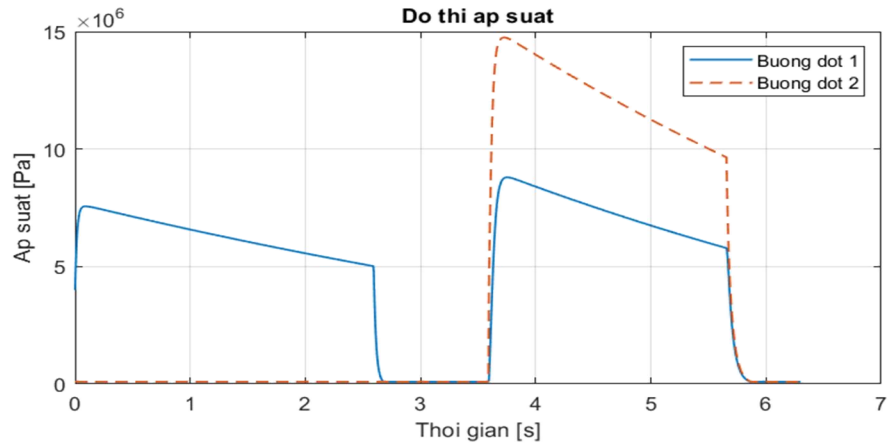
Từ các kết quả nhận được trong bảng 4.2, nhận thấy với giá trị  $k_s = 0,56$  tương ứng với  $M \approx 1$ . Nếu  $k_s < 0,56$  dòng khí sẽ có tốc độ  $M > 1$ , điều này dẫn đến sự xuất hiện hệ thống các bước nhảy nén trong buồng đốt 1. Vì vậy, có thể xem như  $k_s^{\min} = 0,56$ .

#### **4.1.3. Khảo sát các chế độ làm việc của động cơ hai buồng đốt liên hợp trong vùng $k_s^{\min} < k_s < k_s^*$**

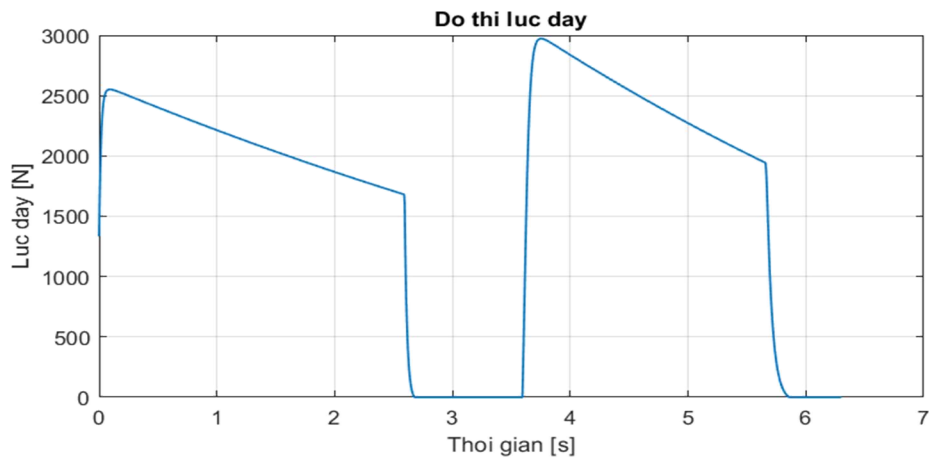
Khi  $k_s$  trong khoảng  $0,56 < k_s < 5$ , lựa chọn các giá trị sau của tỷ số  $k_s$  để tiến hành khảo sát: 0,6; 0,8, 1; 1,5; 3.

Thực hiện 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. Kết quả tính toán được trình bày trên các đồ thị từ 4.4 đến 4.13 và bảng 4.3.

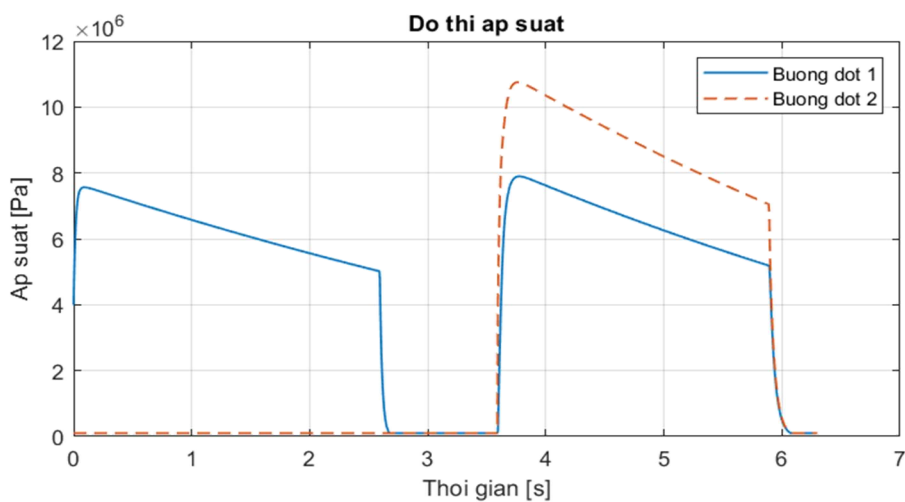




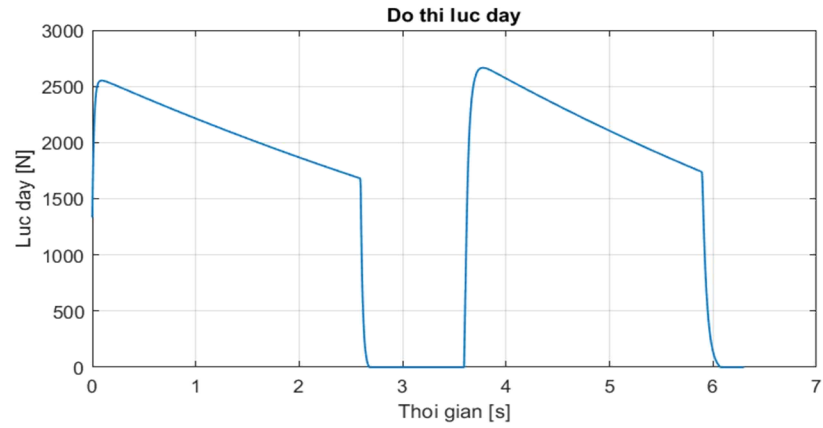
Hình 4.4. Đồ thị áp suất trong các buồng đốt của động cơ, khi  $k_s = 0,6$



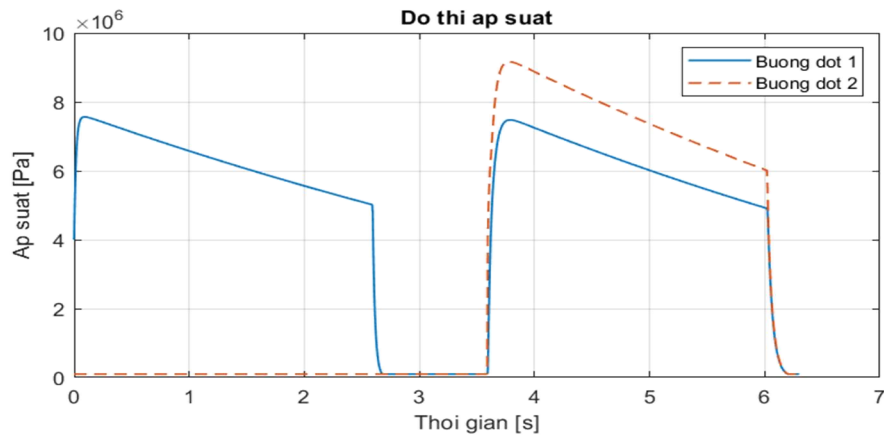
Hình 4.5. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi  $k_s = 0,6$



Hình 4.6. Đồ thị áp suất trong các buồng đốt của động cơ, khi  $k_s = 0,8$



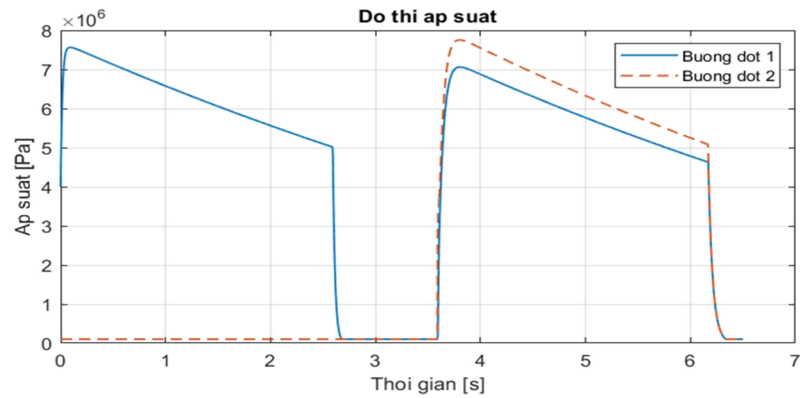
Hình 4.7. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi  $k_s = 0,8$



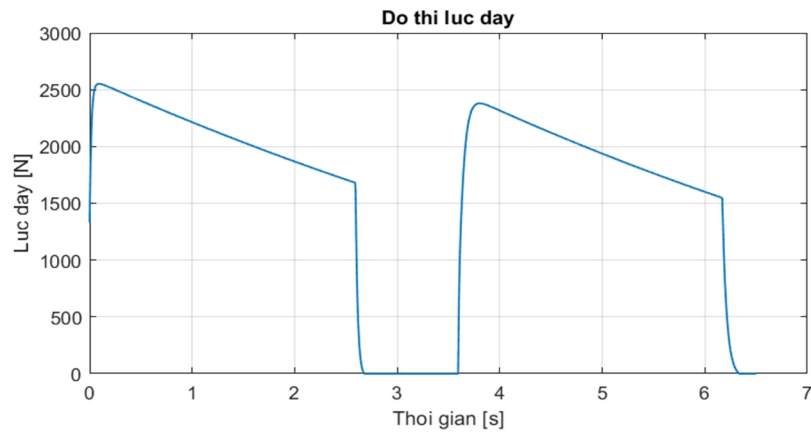
Hình 4.8. Đồ thị áp suất trong các buồng đốt của động cơ, khi  $k_s = 1$



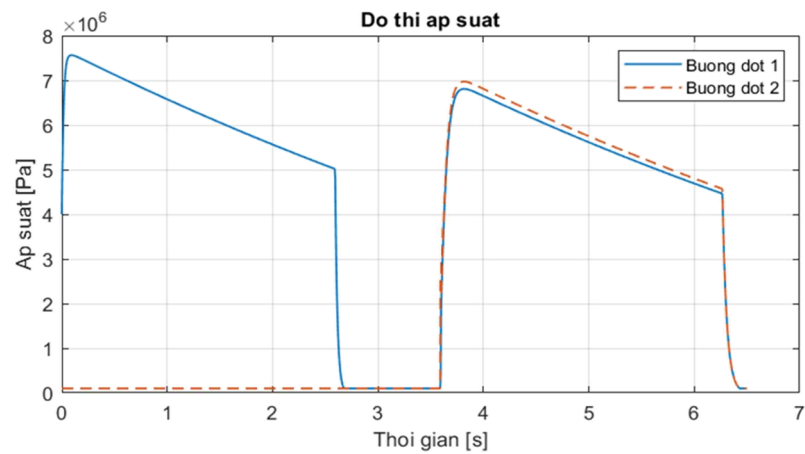
Hình 4.9. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi  $k_s = 1$



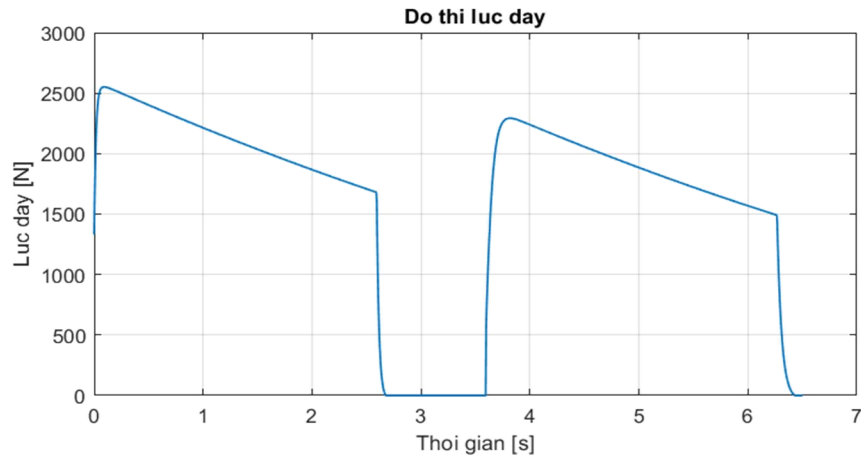
Hình 4.10. Đồ thị áp suất trong các buồng đốt của động cơ, khi  $k_s = 1,5$



Hình 4.11. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi  $k_s = 1,5$



Hình 4.12. Đồ thị áp suất trong các buồng đốt của động cơ, khi  $k_s = 3$



Hình 4.13. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi  $k_s = 3$

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

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:

Trong giai đoạn làm việc thứ 2 của động cơ, khi thay đổi diện tích thông khí giữa hai buồng đốt (tỷ số  $k_s$ ), có thể rút ra một số nhận xét như sau:

1. Khi giảm diện tích thông khí giữa hai buồng đốt, áp suất trong buồng đốt 2 tăng lên, sự chênh lệch áp suất giữa hai buồng đốt cũng tăng lên. Tương ứng với đó, giá trị lực đẩy của động cơ tăng lên và thời gian làm việc giảm đi, cụ thể như sau:

- Khi giảm tỷ số  $k_s$  tăng từ 3 đến 0,6, giá trị lực đẩy trung bình của động cơ tăng từ 1892 N đến 2428 N (tương ứng tăng 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 %).

2. Bằng việc thay đổi diện tích thông khí giữa hai buồng đốt, có thể điều chỉnh được lực đẩy và thời gian làm việc của động cơ trong giai đoạn 2.

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

Như đã trình bày trong mục 3.1, thời điểm kích hoạt buồng đốt 2 có ý nghĩa rất quan trọng đến các chế độ làm việc của ĐTRHBD liên hợp. Tùy theo thời điểm kích hoạt buồng đốt 2, sẽ nhận được chế độ làm việc khác nhau của động cơ. Dưới đây trình bày nghiên cứu ảnh hưởng của yếu tố thời điểm kích hoạt buồng đốt 2 đến quy luật biến đổi áp suất, lực đẩy và thời gian làm việc của động cơ.

##### **4.2.1. Phương pháp khảo sát**

Lựa chọn động cơ mẫu thử nghiệm với sơ đồ kết cấu và thông số như trong chương 3, mục 3.1 để tiến hành khảo sát. Khi đó tỷ số  $k_s=5$  (cố định diện tích thông khí). Như đã giả thiết trong chương 2, tại thời điểm bất kỳ, khi kích hoạt buồng đốt 2, vách ngăn được mở thông tức thời.

Gọi  $t_{c1}$  - thời gian thuốc phóng trong buồng đốt 1 cháy hết khi chưa mở thông vách ngăn giữa hai buồng đốt.

Gọi  $t_{k1}$ - thời gian kết thúc quá trình phụt khí tự do của buồng đốt 1 khi chưa mở thông vách ngăn giữa hai buồng đốt.

Từ kết quả tính toán lý thuyết cho động cơ mẫu trên hình 2.8, đối với động cơ mẫu được xây dựng, nhận được:  $t_{c1}=2,59s$  và  $t_{k1}=2,68s$ .

Gọi  $t_{mt}$  - thời gian kích hoạt buồng đốt 2, đồng thời cũng là thời gian mở thông vách ngăn giữa hai buồng đốt.

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 -  $t_{mlt}$  trong các trường hợp sau:

- Khi  $0 < t_{mlt} < t_{c1}$ : Buồng đốt 2 được kích hoạt khi thuốc phóng trong buồng đốt 1 chưa cháy hết hay nói cách khác buồng đốt 2 được kích hoạt sớm một khoảng thời gian  $\Delta t_1 = t_{c1} - t_{mlt}$

- Khi  $t_{mlt} = t_{c1}$ : Buồng đốt 2 được kích hoạt khi thuốc phóng trong buồng đốt 1 vừa cháy hết

- Khi  $t_{c1} < t_{mlt} \leq t_{k1}$ : Buồng đốt 2 được kích hoạt trong thời kỳ phụt khí tự do của buồng đốt 1

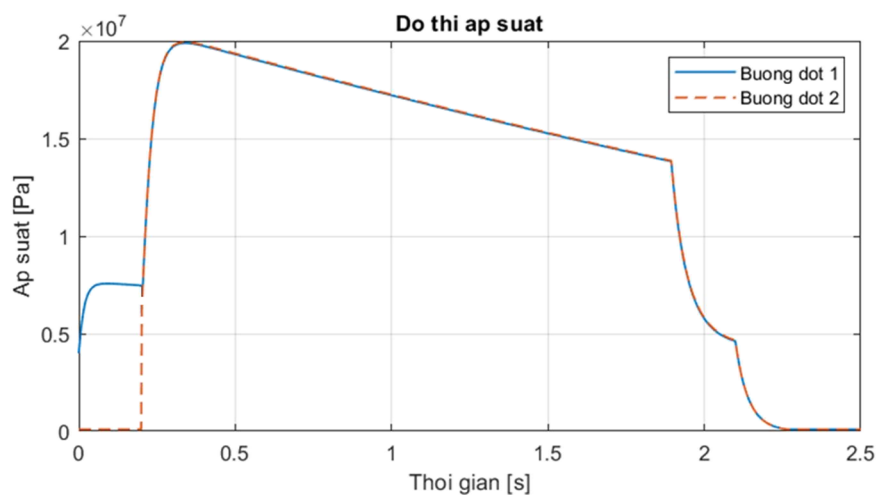
- Khi  $t_{mlt} > t_{k1}$ : Buồng đốt 2 được kích hoạt khi buồng đốt 1 đã kết thúc quá trình phụt khí tự do hay nói cách khác buồng đốt 2 được kích hoạt trễ một khoảng thời gian  $\Delta t_2 = t_{mlt} - t_{k1}$ .

#### 4.2.2 Kết quả khảo sát ảnh hưởng của thời điểm kích hoạt buồng đốt 2

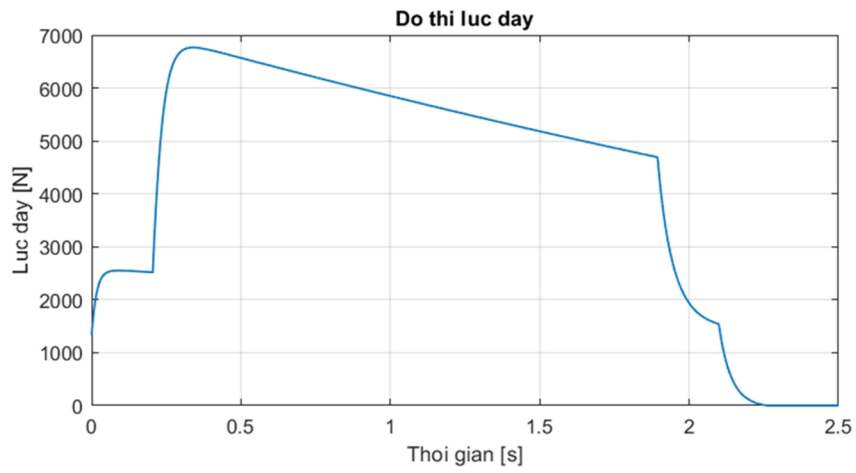
Thực hiện giải hệ phương trình (2.60) với các thời điểm khác nhau của  $t_{mlt}$ , thu được các kết quả như sau:

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

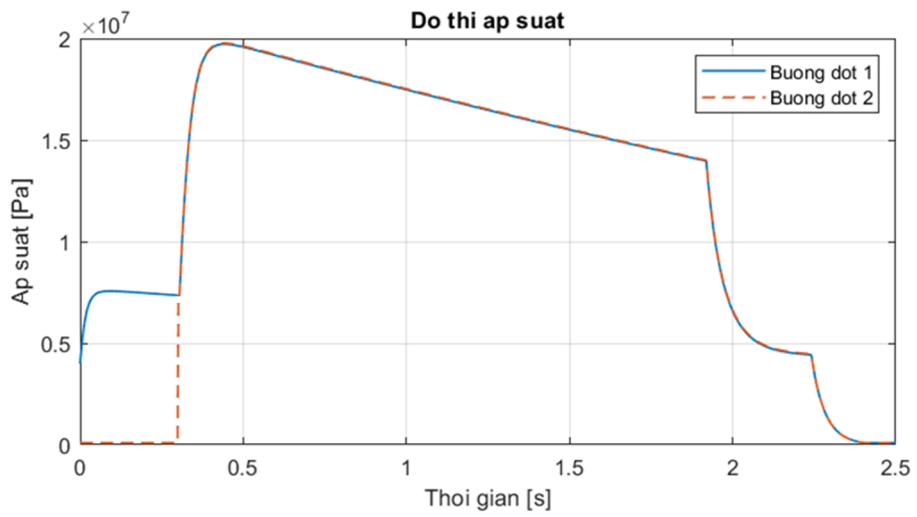
Các kết quả được trình bày trên các đồ thị từ 4.14 đến 4.19 và bảng 4.4.



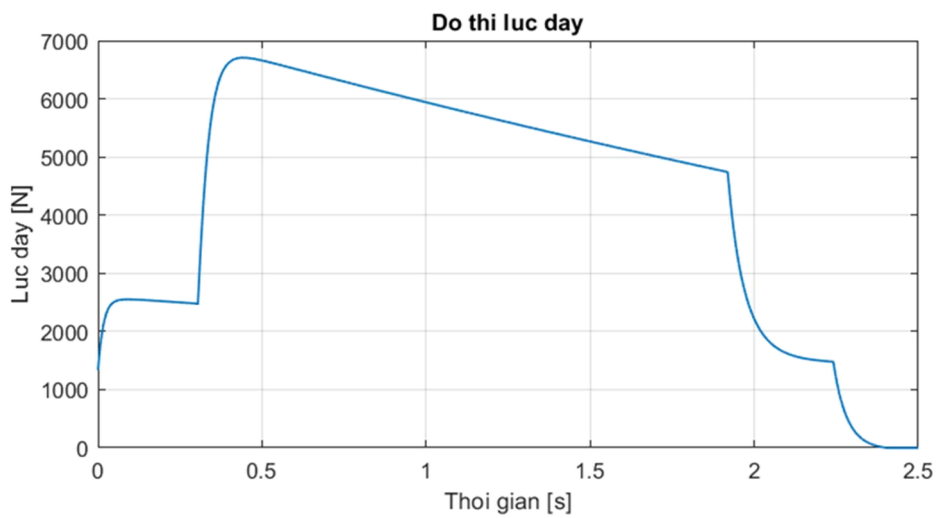
Hình 4.14. Đồ thị áp suất của động cơ, khi  $t_{mlt} = 0,2$ s



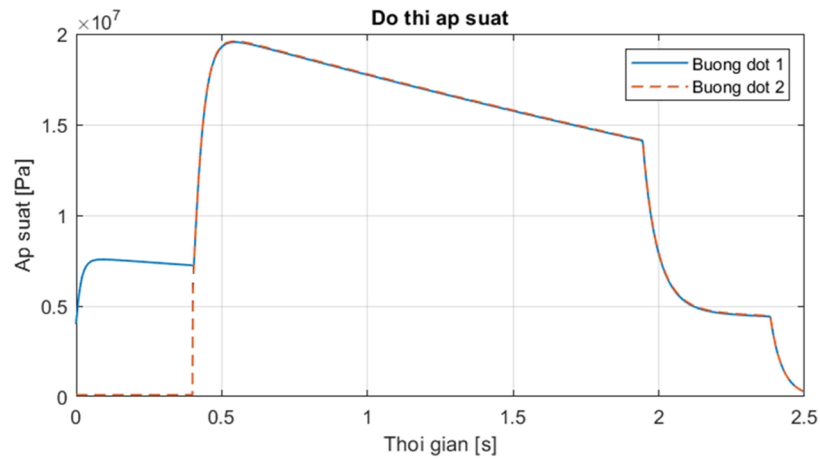
Hình 4.15. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi  $t_{mlt} = 0,2s$



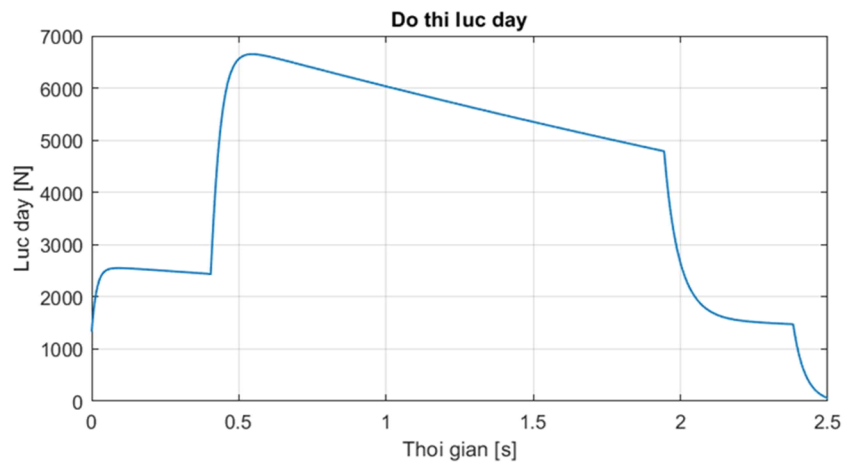
Hình 4.16. Đồ thị áp suất của động cơ, khi  $t_{mlt} = 0,3s$



Hình 4.17. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi  $t_{mlt} = 0,3s$



Hình 4.18. Đồ thị áp suất của động cơ, khi  $t_{mlt} = 0,4s$



Hình 4.19. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi  $t_{mlt} = 0,4s$

Bảng 4.4. Các tham số đặc trưng của động cơ khi  $0 < t_{mlt} \leq 0,4 s$

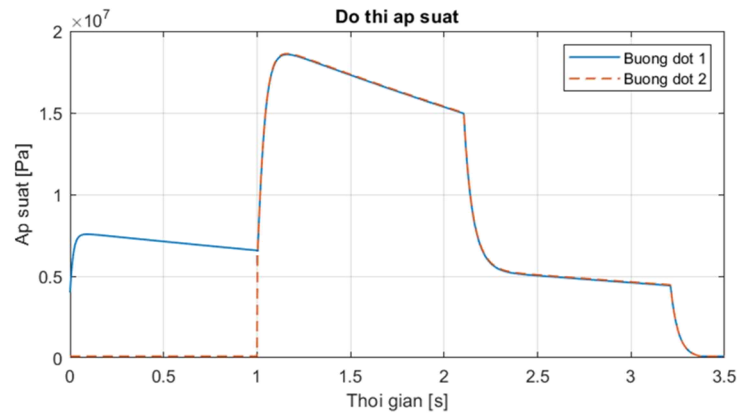
Thời gian kích hoạt BD 2, $t_{mlt}$ , s	Áp suất $p_{2max}$ , MPa	Lực đẩy $P_{max}$ , N	Thời gian làm việc của ĐC, $t_{dc}$ , s
0,2	19,8	6724	2,11
0,3	19,6	6667	2,25
0,4	19,5	6608	2,39

**Nhận xét:** Khi  $0 < t_{mlt} < 0,4 s$ , động cơ có chế độ đơn xung với hai chế độ lực đẩy khác nhau, tuy nhiên áp suất trong giai đoạn 2 của động cơ tăng rất cao, áp suất lớn nhất trong các buồng đốt xấp xỉ 20 MPa, có thể phá hủy thuốc phóng và kết cấu động cơ.

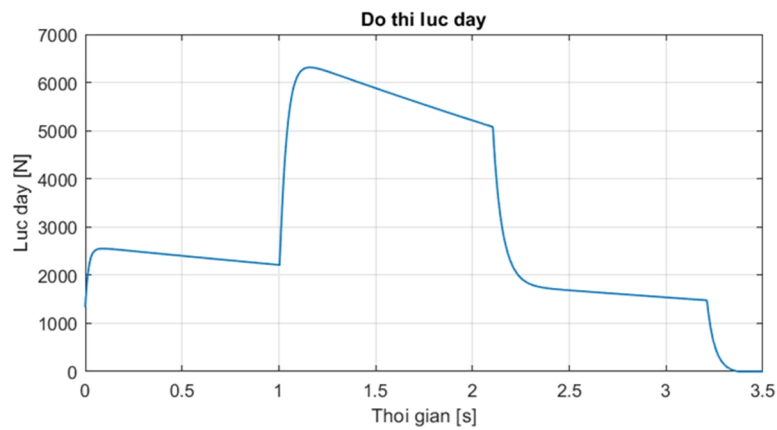


\* Khi  $0,4 < t_{mlt} < 2,3$  s

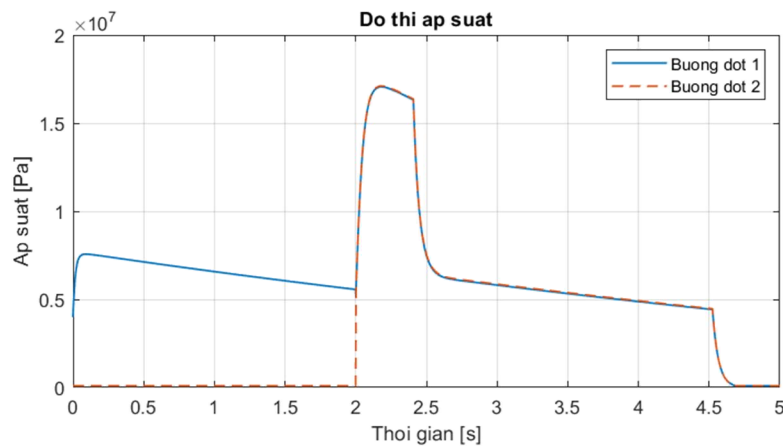
Các kết quả được trình bày trên các đồ thị từ 4.20 đến 4.23 và bảng 4.5.



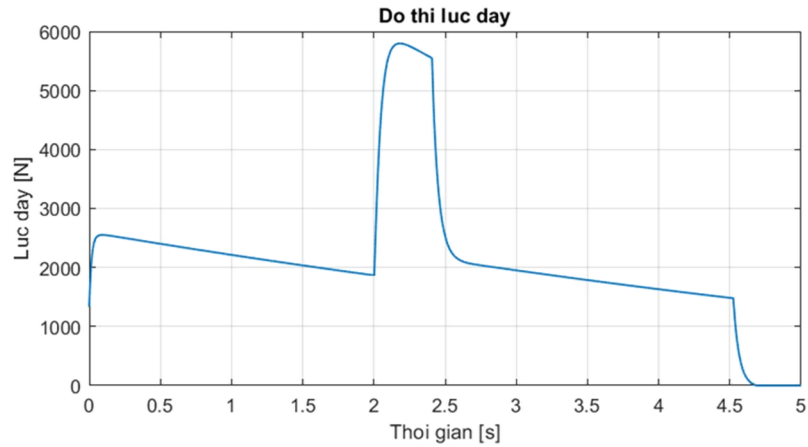
Hình 4.20. Đồ thị áp suất của động cơ, khi  $t_{mlt} = 1$  s



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



Hình 4.22. Đồ thị áp suất của động cơ, khi  $t_{mlt} = 2$  s



Hình 4.23. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi  $t_{mlt} = 2s$

Các giá trị đặc trưng cho các chế độ lực đẩy được trình bày trên bảng 4.5.

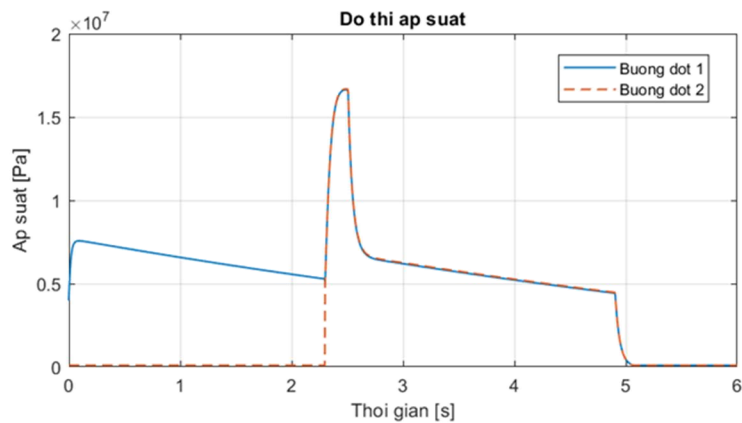
Bảng 4.5. Các tham số đặc trưng của động cơ khi  $0,4 < t_{mlt} < 2,3 s$

Thời gian kích hoạt BD 2 $t_{mlt}, s$	Thời gian làm việc của ĐC, s	Chế độ lực đẩy 1		Chế độ lực đẩy 2		Chế độ lực đẩy 3	
		Thời gian, s	$P_{1tb}, N$	Thời gian, s	$P_{2tb}, N$	Thời gian, s	$P_{3tb}, N$
0,5	2,52	0,5	2456	1,47	5700	0,55	1857
0,6	2,67	0,6	2443	1,4	5678	0,67	1803
0,7	2,8	0,7	2429	1,32	5698	0,78	1791
0,8	2,94	0,8	2414	1,25	5678	0,89	1783
0,9	3,08	0,9	2398	1,18	5656	1	1778
1	3,22	1	2381	1,11	5634	1,11	1775
1,1	3,34	1,1	2364	1,03	5666	1,21	1789
1,2	3,48	1,2	2347	0,96	5646	1,32	1787
1,3	3,61	1,3	2330	0,89	5626	1,42	1800
1,4	3,74	1,4	2313	0,82	5606	1,52	1811
1,5	3,88	1,5	2295	0,75	5585	1,63	1811
1,6	4,01	1,6	2278	0,68	5562	1,73	1822
1,7	4,13	1,7	2261	0,61	5539	1,82	1842
1,8	4,26	1,8	2243	0,54	5514	1,92	1852
1,9	4,4	1,9	2226	0,48	5373	2,02	1860
2	4,53	2	2209	0,41	5323	2,12	1869
2,1	4,65	2,1	2192	0,34	5260	2,21	1885
2,2	4,77	2,2	2175	0,27	5174	2,3	1901

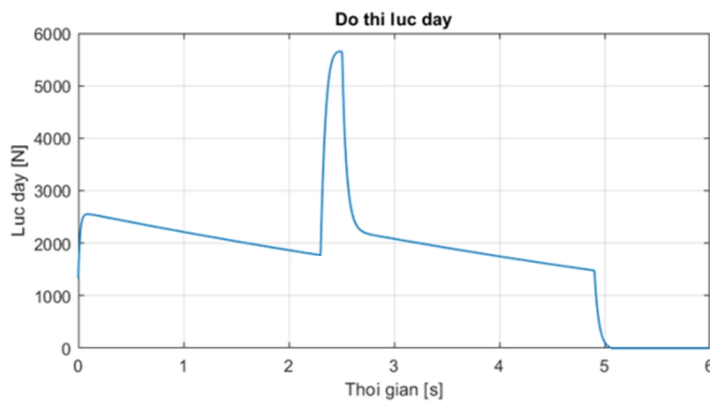
**Nhận xét:** Khi  $0,4 < t_{mlt} < 2,3$  s, động cơ có chế độ đơn xung với ba chế độ lực đẩy khác nhau. Từ số liệu trong bảng 4.5, nhận thấy khi tăng thời gian kích hoạt buồng đốt 2  $t_{mlt}$ , thời gian của động cơ làm việc trong chế độ lực đẩy 1 và 3 đều tăng, thời gian động cơ làm việc trong chế độ 2 giảm dần, thời gian làm việc tổng thể của động cơ tăng lên (từ 2,52 s đến 4,77 s). Trong chế độ lực đẩy 2, tương ứng với thời gian khi liệu nhiên liệu trong buồng đốt 1 và buồng đốt 2 cùng cháy, áp suất trong các buồng đốt và lực đẩy của động cơ đều ở mức cao (áp suất trên 15 MPa và lực đẩy trên 5000 N).

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

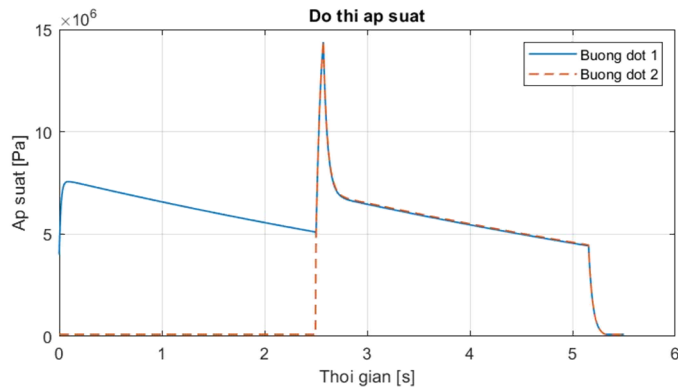
Các kết quả được trình bày trên các đồ thị từ 4.24 đến 4.27.



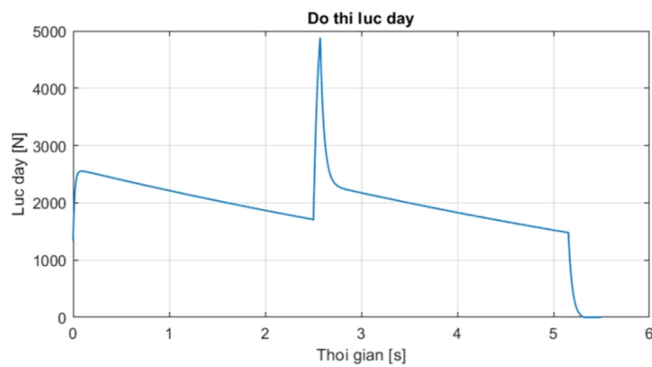
Hình 4.24. Đồ thị áp suất của động cơ, khi  $t_{mlt} = 2,3$ s



Hình 4.25. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi  $t_{mlt} = 2,3$ s



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

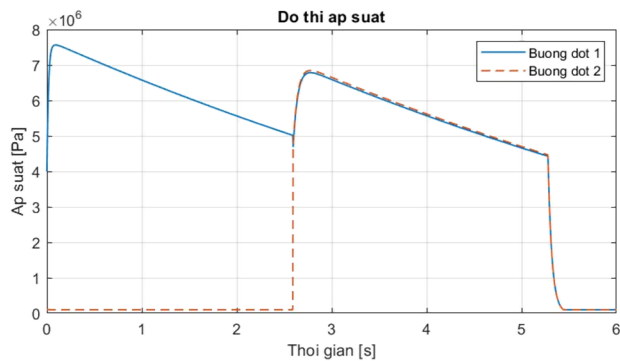


Hình 4.27. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi  $t_{mlt} = 2,5s$

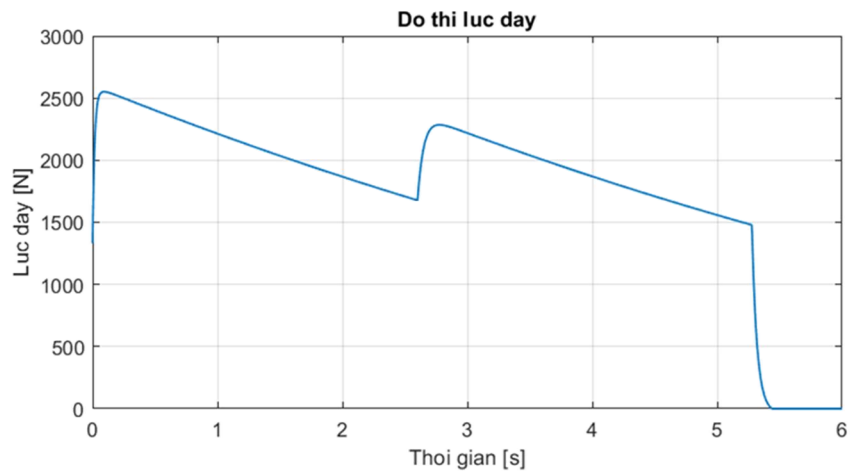
**Nhận xét:** Khi thời điểm kích hoạt buồng đốt 2 trong khoảng  $2,3s < t_{mlt} < 2,59s$ , động cơ có pick áp suất cao, điều này không có lợi cho động cơ về mặt độ bền, có thể phá hủy thuộc phóng và kết cấu của động cơ.

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

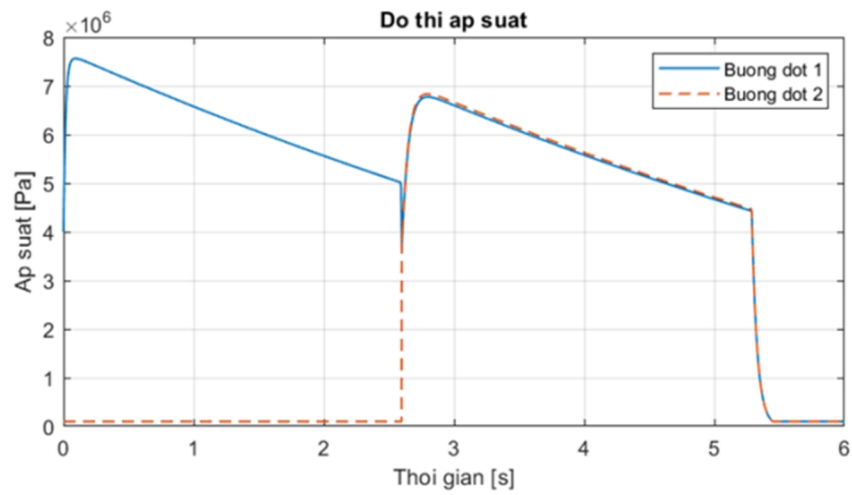
Các kết quả được trình bày trên các đồ thị từ 4.28 đến 4.31 và bảng 4.6.



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



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



Hình 4.30. Đồ thị áp suất của động cơ, khi  $t_{mlt} = 2,6s$



Hình 4.31. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi  $t_{mlt} = 2,6s$

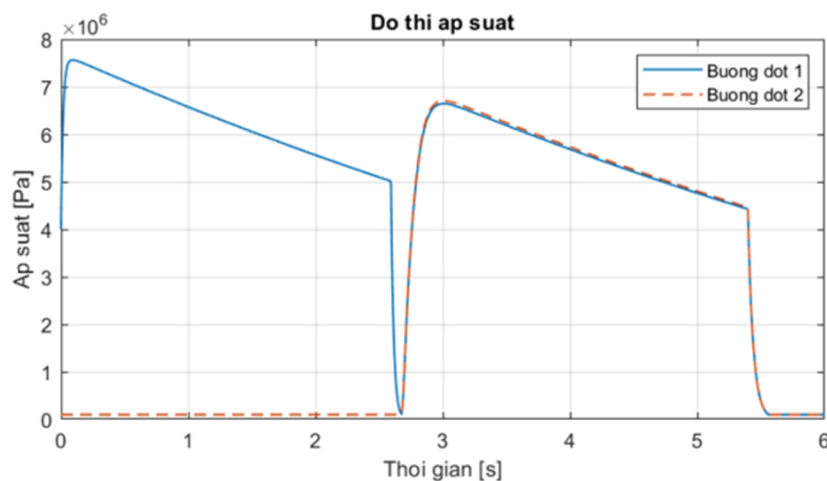
Bảng 4.6. Các tham số đặc trưng của động cơ khi  $2,59 \leq t_{mlt} < 2,68$  s

Thời gian $t_{mlt}$ , s	Thời gian làm việc của ĐC, s	Chế độ lực đẩy 1		Chế độ lực đẩy 2	
		Thời gian, s	$P_{1tb}$ , N	Thời gian, s	$P_{2tb}$ , N
2,59	5,271	2,59	2110	2,681	1864
2,60	5,285	2,6	2107	2,685	1854

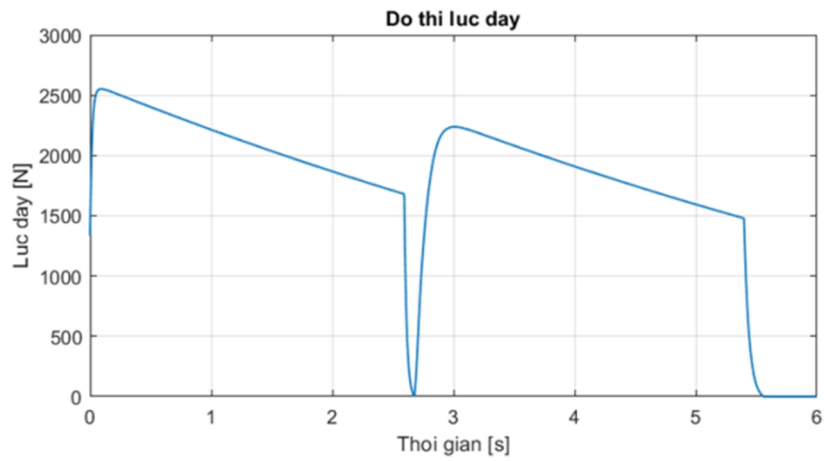
**Nhận xét:** Khi thời điểm kích hoạt buồng đốt 2 nằm trong khoảng  $2,59 \leq t_{mlt} < 2,68$  s, động cơ có chế độ đơn xung với hai chế độ lực đẩy khác nhau. Áp suất trong các buồng đốt nằm trong giới hạn ổn định, áp suất lớn nhất nhỏ hơn 8 MPa. Thời gian làm việc và giá trị lực đẩy của hai chế độ lực đẩy không thay đổi nhiều khi thay đổi thời điểm kích hoạt buồng đốt 2.

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

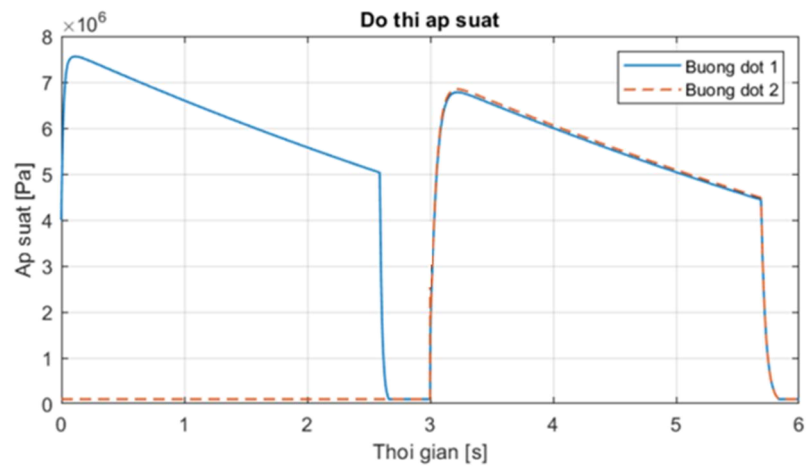
Các kết quả được trình bày trên các đồ thị từ 4.32 đến 4.37 và bảng 4.7.



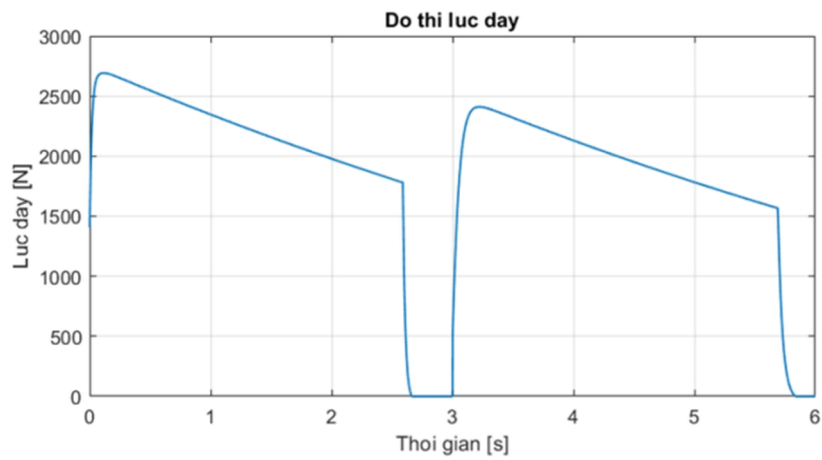
Hình 4.32. Đồ thị áp suất của động cơ, khi  $t_{mlt} = 2,68$ s



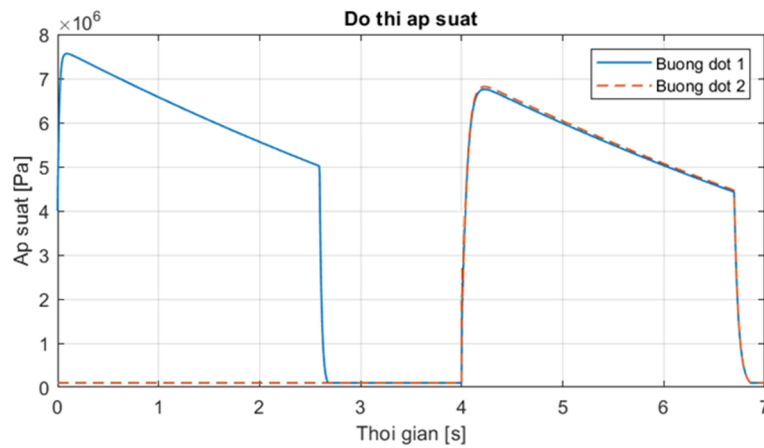
Hình 4.33. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi  $t_{mlt} = 2,68$  s



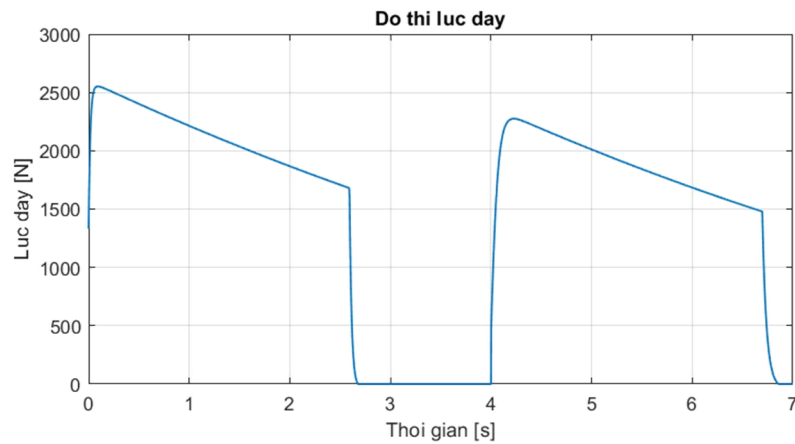
Hình 4.34. Đồ thị áp suất của động cơ, khi  $t_{mlt} = 3$  s



Hình 4.35. Đồ thị lực đẩy của động cơ, khi  $t_{mlt} = 3$  s



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



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

Bảng 4.7. Các tham số đặc trưng của động cơ khi  $t_{mlt} \geq 2,68$  s

Thời gian $t_{mlt}$ , s	Thời gian giãn cách giữa hai xung, s	Xung lực đẩy 1		Xung lực đẩy 2	
		Thời gian, s	$P_{1tb}$ , N	Thời gian, s	$P_{2tb}$ , N
2,68	0	2,68	2053	2,84	1774
3	0,32	2,68	2053	2,84	1774
4	1,32	2,68	2053	2,84	1774

**Nhận xét:** Khi  $t_{mlt} \geq 2,68$ , động cơ có làm việc ở chế độ hai xung gián đoạn. Khoảng thời gian giãn cách giữa hai xung bằng 0 khi  $t_{mlt} = 2,68$  và tăng lên khi  $t_{mlt} > 2,68$ . Giá trị áp suất và lực đẩy của động cơ trong từng xung không thay đổi, mà chỉ tăng thời gian giãn cách giữa 2 xung lực đẩy của động cơ.



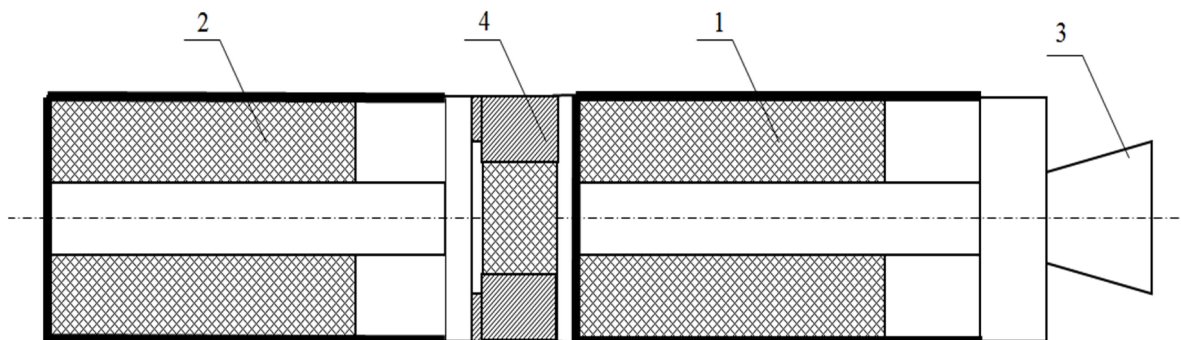
### 4.3. Khả năng ứng dụng một số chế độ làm việc của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt liên hợp trong điều kiện hiện nay của nước ta

Từ yêu cầu chương trình hóa lực đẩy của tên lửa có điều khiển, trong điều kiện hiện nay của nước ta, có thể định hướng một số chế độ làm việc khả dụng ĐTRHBD liên hợp dựa trên những thành tựu đã đạt được trong nghiên cứu liệu nhiên liệu làm từ thuốc phóng keo RSI-12M có đường kính 104mm.

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

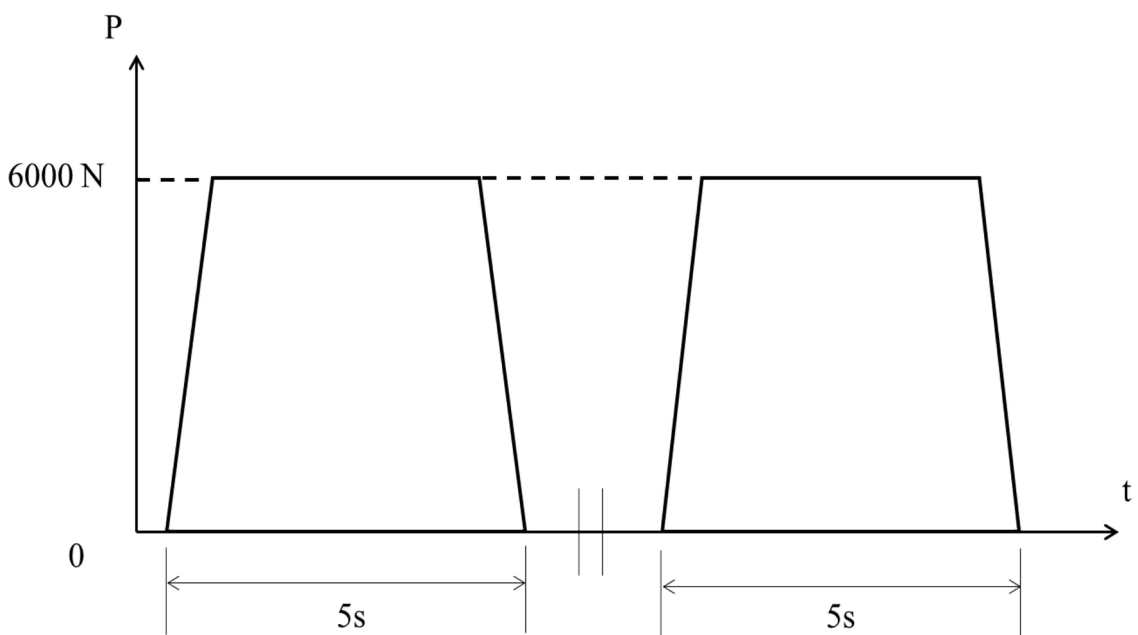
Việc ứng dụng chế độ lực đẩy hai xung tạo ra động cơ có hai xung cho tên lửa siêu thanh có thể mô phỏng theo động cơ ĐTR-160 của tên lửa Kh-15 (Nga). Theo sơ đồ cấu tạo của tên lửa Kh-15 (hình 1.10 trang 14), có thể nhận thấy hai liệu nhiên liệu của động cơ không khác biệt nhau nhiều, đều được lắp kẹp chặt vỏ buồng đốt và cháy trên bề mặt trong của thuốc phóng.

Hiện nay, chúng ta đã làm chủ được công nghệ chế tạo 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  $L=1300\text{mm}$ . Do vậy, hoàn toàn có khả năng thực tế tạo ra động cơ hai xung 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

Các tính toán sơ bộ cho thấy, 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, sẽ nhận được đặc trưng lực đẩy của động cơ dạng hai xung như trên hình 4.39.

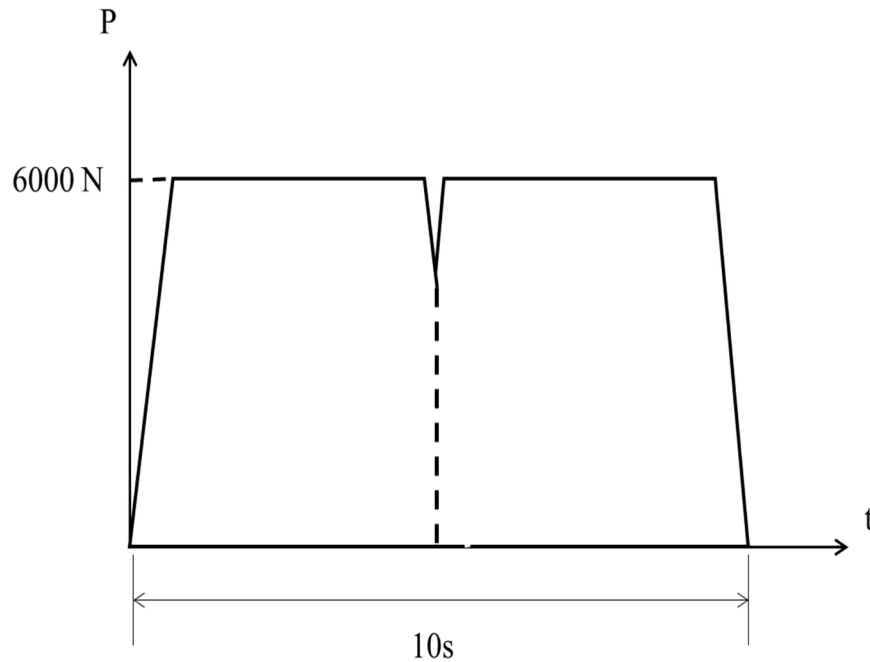


Hình 4.39. Đồ thị lực đẩy dạng hai xung của động cơ

Như vậy, có thể tạo ra động cơ hai xung riêng biệt với lực đẩy  $P=6000$  N và thời gian tác dụng của mỗi xung là 5s.

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

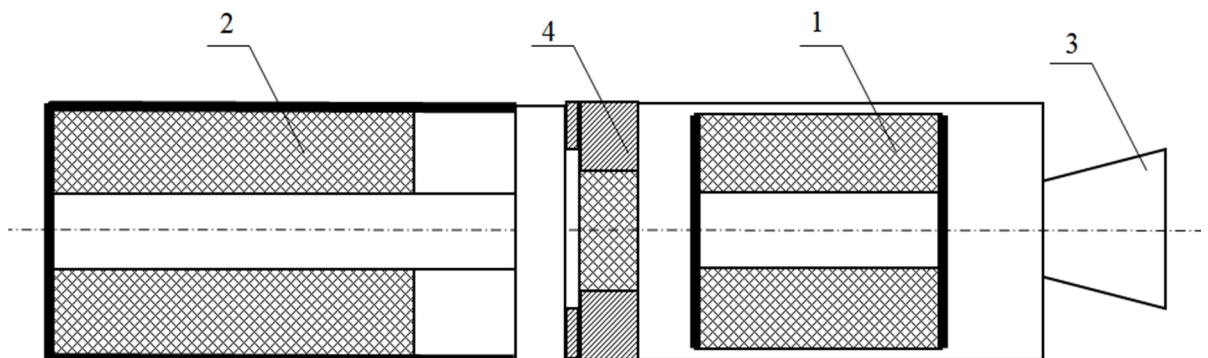
Với phương án động cơ như đã trình bày trên hình 4.38, bằng cách lựa chọn thời điểm kích hoạt buồng đốt 2 trong vùng kết thúc hoạt động của buồng đốt 1, có thể tạo ra động cơ đơn xung với lực đẩy  $P=6000$  N, tác dụng trong thời gian khoảng 10s (hình 4.40).



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

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

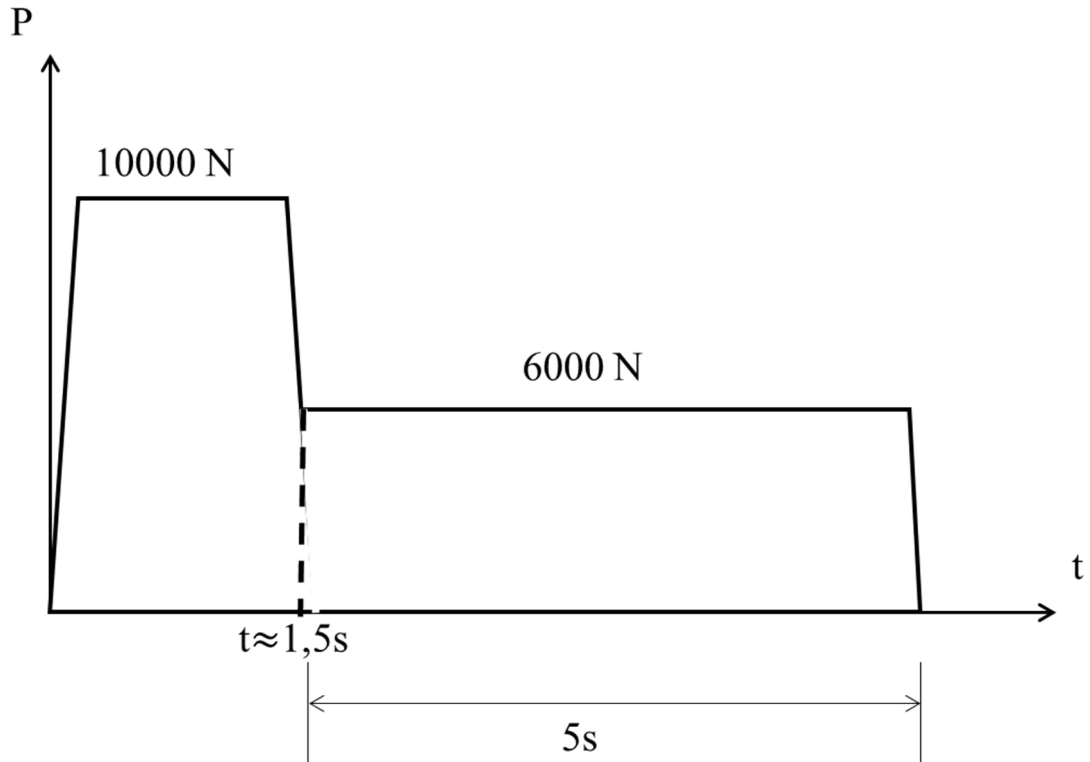
Lựa chọn động cơ có sơ đồ như trên hình 4.41, trong đó liệu nhiên liệu của buồng đốt 1 làm từ thuốc phóng keo RSI-12M đường kính 104mm, cháy đẳng diện từ mặt trong và mặt ngoài, hạn chế cháy hai bề mặt đầu. Liệu nhiên liệu của buồng đốt 2 là liệu dạng hình khe, tương tự như trong mục 4.3.1.



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

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 động cơ có chế độ lực đẩy đơn xung như trên hình 4.42.

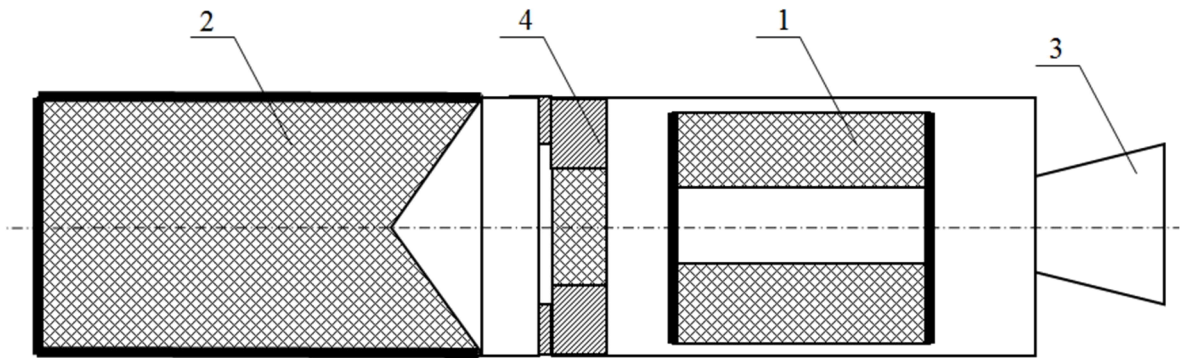


Hình 4.42. Đồ thị lực đẩy dạng đơn xung của động cơ hành trình

Động cơ hành trình nhận được có lực đẩy dạng đơn xung, với hai chế độ lực đẩy khác nhau, trong giai đoạn đầu, lực đẩy khoảng 10000 N, thời gian 1,5s và giai đoạn sau, lực đẩy khoảng 6000 N, thời gian 5s.

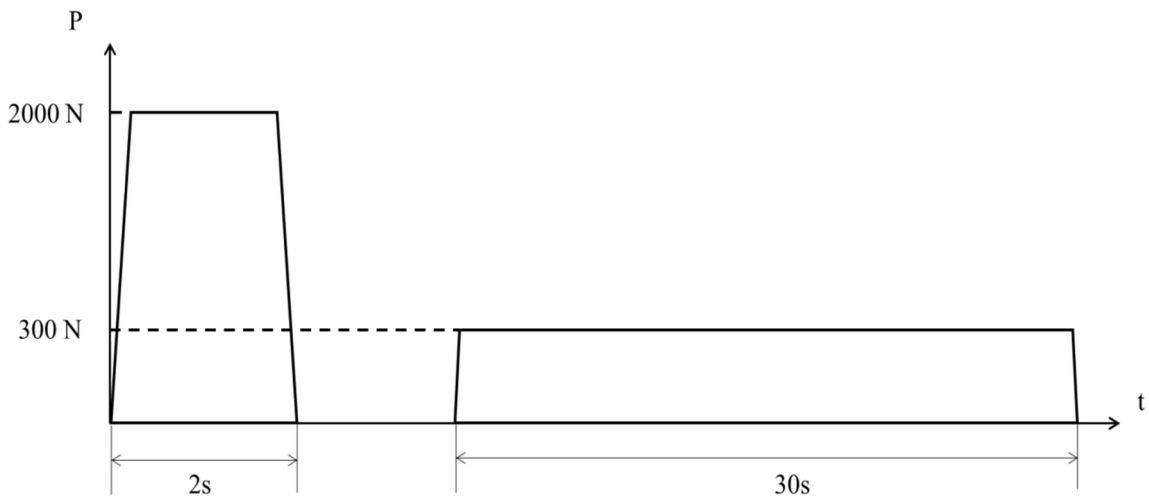
#### ***4.3.4. Ứng dụng chế độ lực đẩy hai xung tạo ra động cơ phóng và động cơ hành trình trong một động cơ hai buồng đốt liên hợp.***

Lựa chọn động cơ có sơ đồ như trên hình 4.43, trong đó liệu nhiên liệu của buồng đốt 1 làm từ thuốc phóng keo RSI-12M đường kính 104mm, cháy đẳng diện từ mặt trong và mặt ngoài, hạn chế cháy hai mặt đầu. Liệu nhiên liệu của buồng đốt 2 cũng được làm từ thuốc phóng keo RSI-12M đường kính 104mm, 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  
 3-Loa phụt, 4-Vách ngăn

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.



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

Động cơ hai xung nhận được có lực đẩy tích hợp động cơ phóng, với giá trị khoảng 2000 N, thời gian 2s và động cơ hành trình, với giá trị khoảng 300 N, thời gian khoảng 30s và có thể dài hơn. Với lực đẩy được tạo ra, động cơ này hoàn toàn có thể tương ứng hệ thống hai động cơ của một số tên lửa chống tăng, như tên lửa B72, Fagot.

#### 4.4. Kết luận chương 4

Chương 4 đã khảo sát sự ảnh hưởng của hai yếu tố diện tích lỗ thông trên vách ngăn và thời điểm kích hoạt buồng đốt 2 đến các chế độ làm việc của của động cơ, đồng thời đưa ra một số chế độ làm việc khả dụng của ĐTRHBD liên hợp trong điều kiện nước ta. Qua đó, có thể kết luận như sau:

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.

Với động cơ mẫu đã xây dựng, việc khảo sát tỷ số  $k_s$  có thể rút ra như sau:

- Khi tỷ số  $k_s < 0,56$ , động cơ làm việc không ổn định do xảy ra các bước nhảy nén lan truyền dưới dạng sóng xung kích trong không gian buồng đốt 1 khi buồng đốt 2 hoạt động;

- Khi tỷ số  $k_s > 5$ , sự khác biệt áp suất giữa các buồng đốt không đáng kể, có thể xem như động cơ một buồng đốt thông thường.

- Khi  $0,56 < k_s < 5$ , có thể điều chỉnh được lực đẩy và thời gian làm việc trong giai đoạn 2 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.

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  $0 \leq t_{mt} \leq 0,4$ , 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 rất cao, xấp xỉ 200 amt, 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 lực đẩy khác nhau

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

3. Với điều kiện hạn chế về công nghệ sản xuất thuốc phóng trong nước, sơ đồ ĐTRHBĐ 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 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: liều 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).

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

### Tiếng Việt:

1. Ngô Tuấn Anh (2001), *Nghiên cứu khai thác phần mềm ASTRA áp dụng cho tính toán các đặc trưng nhiệt động học và xác định một số đặc trưng thuật phóng của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn*, Báo cáo tổng kết đề tài khoa học công nghệ cấp Trung tâm KHKT- CNQS.
2. Ngô Tuấn Anh (2006), *Nghiên cứu thiết kế, chế tạo tên lửa phục vụ mục đích dân dụng*, Báo cáo tổng kết đề tài khoa học công nghệ cấp Bộ Quốc Phòng.
3. Trịnh Hồng Anh (2008), *Nghiên cứu thiết kế, chế tạo động cơ nhiên liệu rắn cỡ nhỏ cho T-05*, Báo cáo tổng kết đề tài cấp Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự.
4. Trịnh Hồng Anh (2014), *Nghiên cứu thiết kế, chế tạo vũ khí phá vật cản mở cửa mở cho bộ binh FMV-B1*, Báo cáo tổng kết đề tài khoa học công nghệ cấp Bộ Quốc Phòng.
5. Hoàng Bá Chư (2003), *Thủy khí động lực ứng dụng*, Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội.
6. Phan Văn Chương (2011), *Nghiên cứu ảnh hưởng của một số tham số kết cấu đến các đặc trưng động lực học của hệ thống tên lửa kéo chuỗi lượng nổ mềm liên tục*, Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự, Hà Nội.
7. Phan Văn Chương, “*Nghiên cứu thiết kế, chế tạo tổ hợp tên lửa chống tăng có điều khiển tầm gần (CTVN.18)*”, Báo cáo kết quả đề tài, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, 2019
8. Nguyễn Ngọc Du (1992), *Vũ khí FR*, Báo cáo tổng kết đề tài cấp Bộ Quốc Phòng, Hà Nội, 131 tr.

9. Nguyễn Ngọc Du, Ngô Tuấn Anh và Đặng Hồng Triền, *Xác định qui luật tốc độ cháy  $u = f(p)$  của thuốc phóng tên lửa RSI-12M*, Tạp chí nghiên cứu Khoa học Kỹ thuật và Công nghệ Quân sự, số 23, 9-2003, tr. 16-23.
10. Hà Đình Dương (2000), *Ảnh hưởng của cấu trúc hệ thống môi đến các đặc trưng chuyển tiếp vào chế độ làm việc ổn định của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn*, Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Trung tâm Khoa học Kỹ thuật và Công nghệ Quân sự, Hà Nội.
11. Nguyễn Quang Duy (2010), *Khảo sát quá trình chuyển tiếp vào các chế độ làm việc ổn định của động cơ tên lửa phòng không tầm thấp*, Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự, Hà Nội.
12. Nguyễn Hương Đoàn (2011), *Nghiên cứu chế tạo thử nhiên liệu tên lửa hỗn hợp 9X195 cho động cơ hành trình tên lửa I*, Báo cáo tổng kết đề tài cấp Nhà nước.
13. Trần Tiến Đạt (2000), *Nghiên cứu, thiết kế chế thử vũ khí mở cửa mở cho xe tăng*, Báo cáo tổng kết đề tài khoa học công nghệ cấp Bộ Quốc Phòng.
14. Ngô Văn Giao (1999), *Công nghệ sản xuất thuốc phóng và nhiên liệu tên lửa*, Học viện Kỹ thuật Quân sự, Hà Nội.
15. Ngô Văn Giao (2005), *Tính chất thuốc phóng và nhiên liệu tên lửa*, Học viện Kỹ thuật Quân sự, Hà Nội.
16. Vũ Thanh Hải (2016), *Tiếp cận kỹ thuật phóng tên lửa đẩy tầm thấp bằng mô hình vật lý dựa trên cơ sở mẫu tên lửa thử nghiệm TV-01*, Đề tài NCKH, Học viện KTQS, Hà Nội.
17. Nguyễn Đức Long (2011), *Nghiên cứu chế thử thử nhiên liệu 9X196M cho động cơ xuất phát tên lửa phòng không I*, Báo cáo kết quả đề tài, Viện Thuốc phóng Thuốc nổ.
18. Bào Đình Ngọc (1973), *Thuật phóng trong của vũ khí đặc biệt*, Trường Đại học Kỹ thuật Quân sự.

19. Phạm Thế Phiệt (1995), *Lý thuyết động cơ tên lửa*, Học Viện Kỹ thuật Quân sự, Hà Nội.
20. Phạm Thế Phiệt (2006), *Cơ sở tính toán đạn phản lực không điều khiển*, Học viện Kỹ thuật Quân sự, Hà Nội, 203 tr.
21. Bùi Đình Tân (2019), *Nghiên cứu ảnh hưởng của một số tham số kết cấu đến chế độ làm việc của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn hai buồng đốt làm việc nối tiếp*, Luận án Tiến sĩ kỹ thuật - Trung tâm KHKT-CNQS.
22. Đặng Hồng Triền (2009), *Nghiên cứu xác định quy luật tốc độ cháy của nhiên liệu rắn tên lửa trên cơ sở đo đặc tuyến làm việc của động cơ mẫu*, Luận án Tiến sĩ kỹ thuật, Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự, Hà Nội.
23. Đặng Hồng Triền (1995), *Phân tích các đặc trưng làm việc của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn có nhiều buồng đốt thông nhau làm việc không độc lập*, Luận văn Thạc sĩ kỹ thuật, Học viện Kỹ thuật Quân sự.
24. Lê Song Tùng và các tác giả (2013), *Tính toán thiết kế động cơ tên lửa nhiên liệu rắn*, Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự, Hà Nội.
25. Phạm Thế Phiệt, Ảnh hưởng của diện tích lỗ thông khí tới lực đẩy trong hệ thống nhiều động cơ tên lửa nhiên liệu rắn, Tạp chí Khoa học và Kỹ thuật Quân sự, số 130, tháng 10/2009.

**Tiếng Anh:**

26. Aglifi B.A. (9/1985), "Prediction of heat transfer for decaying turbulent swirl flow in tube", Int.J. Heat and Mass Transfer -28,
27. NASA Lewis Research Center (1971), *Solid Rocket Motor Igniters*, Rocket Science Institute.
28. Corner J. (1950), *Theory of interior ballistics of guns*, New York-London.
29. Davenas A. (1992), *Solid Rocket Propulsion Technology*, Pergamon.

30. Oscar Biblarz George P. Sutton (2000), *Rocket Propulsion Elements, 7th Edition*, Wiley-Interscience.
31. Schick H.L. (1966), *Thermodynamics of certain refractory compounds*, London, Acad. Press.
32. K. W. Naumann, L. Stadler, P. Trouillot, A. Weigand, D. Zanelli, S. Schilling (2006), *double-pulse solid rocket technology at bayern-chemie / protac*, Aschau am Inn, Germany.
33. L.J. Stadler, P. Trouillot, C. Rienäcker, H. Niedermaier, D. Audri, S. Ruiz, A. Hacker, K.W. Naumann (2006), *the dual pulse motor for lfk ng*, Aschau am Inn, Germany.
34. P. Trouillot , D. Audri, S. Ruiz, K.W. Naumann , L. Stadler, H. Niedermaier (2006), *design of internal thermal insulation and structures for the lfk-ng double-pulse motor*, La Ferté St Aubin, France
35. A. Hacker, R. Stingl, H. Niedermaier, K. W. Naumann (2006), *the safety and delay device for the lfk-ng double-pulse motor demonstrator*, Aschau am Inn, Germany.
36. L.J. Stadler, S. Hoffmann, H. Niedermaier, A. Hacker, G. Bénayon, P. Trouillot, K.W. Naumann (2006), *testing and verification of the lfk ng dual pulse motor*, Aschau am Inn, Germany.
37. Chang-Hui Wang, Yu Liu, Ya Bing Liu (2011), *Design and experimental studie on ceramic port cover for dual pulse motor*, Beijing, China.
38. K. W. Naumann, L. Stadler (2010), *double-pulse solid rocket motor technology – applications and technical solutions*, Aschau am Inn, Germany.
39. L.J. Stadler, S. Hoffmann, J. Huber, R. Stingl, K.W. Naumann (2010), *the flight demonstration of the double pulse motor demonstrator msa*, Aschau am Inn, Germany.

40. K. W. Nauman, P. Candas Pinto, A. Weigand, A. Ringeisen (2016), *Propulsion technologies for De-/Re-orbiting and active debris Removal*, Noordwijk, NL
41. K. W. Naumann (2003), *solid rocket propulsion for the german hfk (hyperschallflugko rper) hypervelocity missile program - an overview*, Aschau am Inn, Germany.
42. S. Schilling, P. Trouillot and A. Weigand (2004), *On the Development and Testing of a 120 mm Caliber Double Pulse Motor (DPM)*, Aschau am Inn, Germany.
43. [https://en.wikipedia.org/wiki/AGM-69\\_SRAM](https://en.wikipedia.org/wiki/AGM-69_SRAM)
44. <https://en.wikipedia.org/wiki/PL-12>
45. <https://www.ausairpower.net/APA-PLA-AAM.html>
46. Fisher, R.D. , *China's Emerging 5th Generation Air-to-Air Missiles (Recommended)*, IASC, Washington, DC, 2008

### **Tiếng Nga:**

47. Абугов Д.И. và Бобылев В.М. (1987), *Теория и расчет ракетных двигателей твердого топлива*, Издательство Машиностроение, Москва.
48. Раиберг Б.А. (1972), *Основы теорий рабочих процессов в ракетных системах на твёрдом топливе*, Издательство Машиностроение,, Москва.
49. Бобылев В. М. (1992), *Ракетный двигатель твердого топлива как средство управления движением ракет*, Издательство Машиностроение, Москва, 161 с.
50. Борисенко А.И. (1962). *Газовая динамика двигателей*, Москва : Оборонгиз, 1962. – 794 с.
51. Васильев А.П. và Кудрявцев В.М. (1991), *Основы теории и расчета ракетных двигателей*, Издательство Высшая школа, Москва.

52. Гейтс và Пинто (1960), *Регулирование тяги ракетных двигателей твердого топлива механическими средствами* // Вопросы ракетной техники. № 6.С.53- 70.
53. Ерохин В.Т. và Липанов А. М. (1980), *Стационарные и квазистационарные режимы работы ракетных двигателей на твердом топливе*, Издательство Машиностроение, Москва.
54. Кимяев А.А. và các cộng sự (1999), *Регулируемые энергетические установки на твердом топливе: Учеб, пособие*, / Перм. гос. техн. ун-т. Пермь, 168 с.
55. Кувеко А.Е. và Миропольский Ф.П. (1987), *Внутренняя баллистика ствольных систем и РДТТ*, Издание ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, Москва.
56. Липанов А. М. (1995), *Проектирование ракетных двигателей твердого топлива*, Издательство Машиностроение, Москва.
57. Министерство Обороны СССР (1987), *Переносный зенитный ракетный комплекс "Игла" (9К38)-Техническое описание и инструкция по эксплуатации*, Москва.
58. Николаев Ю. М. (1979), *Инженерное проектирование управляемых баллистических ракет с РДТТ*, Воениздат, Москва, 240 tr.
59. Орлов Б. В. (1968), *Термодинамические и баллистические основы проектирования РДТТ*, Издательство Машиностроение, Москва.
60. Пирс К.В. (1961), *Некоторые методы регулирования тяги ракетных двигателей на твердом топливе*, Aeronaut Soc. Vol. 65. № 610.
61. Рыжков К. В. (1971), *Теплотехника и внутренняя баллистика*, Пенза.



62. Соколовский М.И., Петренко В.И. và Зыков Г.А. (2003), *Управляемые энергетические установки на твердом ракетном топливе*, Издательство Машиностроение, Москва.
63. Соркин Р. Е. (1983), *Теория внутрикамерных процессов в ракетных системах на твердом топливе*, Издательство Наука, Москва.
64. Соркин Р.Е. (1967), *Газодинамика ракетных двигателей на твердом топливе*, Издательство Наука, Москва.
65. Фахрутников И. Х. (1987), *Конструкция и проектирование РДТТ*, Издательство Машиностроение, Москва.
66. Wojciech Szmidt. *Balistyka doswiadczalna*. Warszawa, 1981.
67. <https://en.wikipedia.org/wiki/Kh-15>
68. Ракеты типа Х-15. // *Авиация и космонавтика*. №9 / 2005 г
69. <http://rbase.new-factoria.ru/missile/wobb/x15/x15.shtml>

## PHỤ LỤC

---

**Phụ lục 1: Tính toán các đặc trưng nhiệt động học thuốc phóng bằng phần mềm ASTRA.**

**Phụ lục 2: Chương trình tính toán các đặc trưng làm việc của động cơ hai buồng đốt liên hợp.**

**Phụ lục 3: Kết quả thử nghiệm xác định bề dày liều thuốc phóng trong vách ngăn.**

**Phụ lục 4: Kết quả thử nghiệm đo áp suất, lực đẩy trên động cơ mẫu**

## Phụ lục 1: TÍNH TOÁN CÁC ĐẶC TRƯNG NHIỆT ĐỘNG HỌC THUỐC PHÒNG BẰNG PHẦN MỀM ASTRA

### Исходные данные

$i=0,$   
 $p=7,$   
 $p_a=KP, 0.1,$   
 $(56\%C22.74H29.33O36.08N8.57[-2811]),$   
 $(26.7\%C3H5O9N3[-1633]),$   
 $(10.5\%C7H6O4N2[-374.5]),$   
 $(3\%C17H20N2O1[-391.5]),$   
 $(1.2\%C20H42[-404.9]),$   
 $(0.9\%PB1O1[-983]),$   
 $(1.7\%CA1C1O3[-12110]),$   
 $(0.7\%H2O1[-15880]);$

Брутто-формула раб.тела: C 23.0556 H 30.347 O 33.9058 N 9.63566  
 PB .040042 CA .168668

### Характеристики равновесия - СИ

P=7	T=2186.5	V=0.111913	S=9.94516	I=-2375.35
U=-3158.74	M=43.2542	Cp=1.77052	k=1.2537	Cp''=1.82579
k''=1.24537	A=987.653	Mu=0.0000656	Lt=0.212133	Lt''=0.18989
MM=23.1191	Cr.r=1.77748	k.r=1.25539	MM.r=22.9944	R.r=361.595
Z=0.009147	Pl=0	Vm=0.128229		

### Содержание компонентов - моль/кг

O	0.1455e-5	H	0.0115246	H2	7.9061
OH	0.0014331	H2O	7.2526	N2	4.81698
NO	0.0000495	NH2	0.6404e-5	NH3	0.0012092
CO	19.6329	CO2	3.42196	CH3	0.1662e-5
CH4	0.0000593	CHO	0.0000886	CHO2	0.0000135
CH2O	0.0001038	CH2O2	0.0000836	HCN	0.0004408
Pb	0.0388404	Pb2	0.0000251	PbO	0.0003395
PbH	0.0008123	Ca	0.1192e-5	k*CaO	0.163108
CaOH	0.0000515	CaO2H2	0.0055069		

### Характеристики равновесия - СИ

(кр.сечение)

P=3.88333	T=1945.01	V=0.179435	S=9.94516	I=-2811
U=-3507.81	M=43.2547	Cp=1.74288	k=1.25874	Cp''=1.79072
k''=1.25054	A=933.436	Mu=0.0000607	Lt=0.193945	Lt''=0.1567
MM=23.1189	Cr.r=1.74989	k.r=1.26052	MM.r=22.9905	R.r=361.656
Z=0.0094102	Pl=0	Vm=0.128287	n=1.24811	W=933.437
W/A=1	F/F*=1	F''=0.0001922	Iудп=171.318	B=137.237

### Содержание компонентов - моль/кг

H	0.0033429	H2	8.20969	OH	0.0002528
H2O	6.95892	N2	4.81717	NO	0.5900e-5
NH2	0.1398e-5	NH3	0.0010357	CO	19.3335
CO2	3.72161	CH4	0.0000936	CHO	0.0000237
CHO2	0.3296e-5	CH2O	0.0000598	CH2O2	0.0000469
HCN	0.0002737	Pb	0.0393725	Pb2	0.0000266
PbO	0.0001396	PbH	0.0004771	k*CaO	0.167801
CaOH	0.3656e-5	CaO2H2	0.0008626		

### Характеристики равновесия - СИ

(вых.сечение)

P=0.1	T=982.431	V=3.46645	S=9.94516	I=-4622.06
U=-4968.71	M=42.6447	Cp=1.57995	k=1.28754	Cp''=3.40203
k''=1.20172	A=639.607	Mu=0.0000384	Lt=0.120356	Lt''=0.286349
MM=23.4496	Cr.r=1.59796	k.r=1.29281	MM.r=22.9736	R.r=361.922
Z=0.0250828	Pl=0	Vm=0.128918	n=1.23749	W=2119.77
W/A=3.31417	F/F*=8.50696	F''=0.0016353	Iудп=232.835	

### Содержание компонентов - моль/кг

H2	11.2797	H2O	3.45083	N2	4.81717
NH3	0.0012924	CO	15.3839	CO2	7.2825
CH4	0.220491	CH2O	0.2349e-5	CH2O2	0.1603e-5
HCN	0.0000262	k*Pb	0.0395801	Pb	0.0004622

## Phụ lục 2: CHƯƠNG TRÌNH TÍNH TOÁN CÁC ĐẶC TRƯNG LÀM VIỆC CỦA ĐỘNG CƠ HAI BUỒNG ĐỐT LIÊN HỢP

---

```

clear all;
clc;
%% 1. Lua chon tinh toan
tmlt = 4;
tdc = 7;
btg=0.000001;
%% 2. Khai bao bien hinh hoc buong dot va lieu phong
DK1=0.114;           DK2=0.114;
LK1=0.292;           LK2=0.292;
dth1=0.018;          dth2=0.01;
dlpa=0.034;
slp1=1;              slp2=16;
dn1=0.104;           dn2=0.104;
dtr1=0.018;          dtr2=0.018;
L1=0.2;              L2=0.2;
Fk1=pi/4*DK1^2;      Fk2=pi/4*DK2^2;
Fxq1 = pi*DK1*LK1;   Fxq2 = pi*DK2*LK2;
VK1=pi/4*DK1^2*LK1;
VK2=pi/4*DK2^2*LK2;
Fth1=slp1*pi*dth1^2/4;
Fth2=slp2*pi*dth2^2/4;
cosilp=dlpa/dth1;
elp11=(dn1-dtr1)/4;   elp12=(dn2-dtr2)/4;
%% 3. Khai bao tham so chay cua lieu phong
kn=1.25;
Rg=362;
T11=2731;             T12=2731;
u11=4.344e-5;         u12=4.344e-5;
nuy1=0.3456;          nuy2=0.3456;
roT=1570;
Kt=0.0034;
T0=298;
Tn=293;
kvkh1=0.000006;      kvkh2=0.000006;
a=0.3;                b=5.0;
phi1=0.95;            phi2=0.95;
cp=kn*Rg/(kn-1);
omT1=pi/4*(dn1^2-dtr1^2)*L1*roT;
omT2=pi/4*(dn2^2-dtr2^2)*L2*roT;
k0k=sqrt(2*kn/(kn+1))*(2/(kn+1))^(1/(kn-1));
Fw = 2.149;

```

```

tmt = 301;
pmt = 1e5;
pmoi = 40e5;
%% 4. Cac thong so xac dinh he so truyen nhiet
Ddtr1 = DK1;                                Ddtr2 = DK2;
g = 9.81;
muy = 6.65e-5;
lamda = 16.341e-2;
Pr = 0.74;
epsilon = 0.5;
c0 = 5.773;
lamdaK = 43.297;
epsilonK = 0.8;
cK = 0.5468e3;
Tk1 = 1350;                                Tk2 = 300;
%% 5. Khai bao he phuong trinh giai doan 1 (Buong dot 1
hoat dong)
    tg=0.0;  spt=12;  k=1;
    %---Dieu kien ban dau-B1:
    x(1)=0.0001;
    x(2)=0.061;
    x(3)=0.0;
    x(4)=0.0;
    x(5)=2000;
    x(6)=pmoi;
    x(11)=0;
    %---Dieu kien ban dau-B2:
    x(7)=0.0001;
    x(8)=0.061;
    x(9)=tmt;
    x(10)=pmt;
    x(12)=0;
    ec1 = x(1); ec2 = x(7); delta1 = 1;
%% 6. Giai he phuong trinh
while tg<=tdc
    if x(6) < pmt
        x(6) = pmt;
    end
    if x(10) < pmt
        x(10) = pmt;
    end
    % Xac dinh su hoat dong cua lieu phong 1
    if ec1 < elp1
        delta1=1;

```

```

else
    delta1=0;
end
% Xac dinh su hoat dong cua lieu phong 2
if tg<=tmlt
    delta2=0;
    if tg>(tmlt-btg)
        Tk2=1350;
        x(9)=2000;
        x(10)=pmoi;
        delta2=1;
    end
else
    if ec2 < elp12
        delta2=1;
    else
        delta2=0;
    end
end
% Thu tuc ham runge kuta
w1=[0 0.5 0.5 1];
for ir=1:spt
    sr(1,ir)=0;
end
for jr=1:4
    nr=jr+1;
    for kr=1:spt
        y(kr)=x(kr)+w1(jr)*sr(jr,kr);
    end
end
% Gan bien de de hieu
ec1 = y(1); ec2 = y(7); p1 = y(6); p2 = y(10); Tg1 =
y(5); Tg2 = y(9);

% Xac dinh chieu chuyen dong cua dong khi tai lo thong
if tg <=tmlt
    delta3 = 0;
else
    if p2>=p1
        delta3=1;
    else
        delta3=-1;
    end
end
% Khai bao ve phai he phuong trinh

```

```

% Tinh toc do chay lieu phong 1:
Fcc=0.0063;
Smd1=delta1*pi/4*((dn1-2*ec1)^2-(dtr1+2*ec1)^2);
Ftd1=Fk1-Smd1;
fp1=delta1*u11*p1^nuy1;
f1Tbd=1/(1-Kt*(T0-Tn));
wlm=phi1*k0k*Fth1*sqrt(Rg*Tg1)/Ftd1;
philw=1; % +kvkh1*wlm^2;
ulp1=delta1*fp1*f1Tbd*philw;
% Tinh toc do chay lieu phong 2:
Smd2=delta2*pi/4*((dn2-2*ec2)^2-(dtr2+2*ec2)^2);
Ftd2=Fk2-Smd2;
fp2=delta2*u12*p2^nuy2;
f2Tbd=1/(1-Kt*(T0-Tn));
w2m=phi2*k0k*Fth1*sqrt(Rg*Tg2)/Ftd2;
phi2w=1; % +kvkh2*w2m^2;
ulp2=delta2*fp2*f2Tbd*phi2w;
% Tinh kich thuoc cua lieu phong 1
S1 = delta1*pi*(dn1+dtr1)*(L1-ec1)+2*Smd1+Fcc;
    if delta1 == 1
        S1 = S1;
    else
        S1 = 0;
    end
V1 = Smd1*(L1-2*ec1);
omg1 = V1*roT;
VK1t = VK1-V1;
% Tinh kich thuoc cua lieu phong 2
S2 = delta2*pi*(dn2+dtr2)*(L2-ec2)+2*Smd2;
    if delta2 == 1
        S2 = S2;
    else
        S2 = 0;
    end
V2 = Smd2*(L2-2*ec2);
omg2 = V2*roT;
VK2t = VK1-V2;
% Bieu thuc h(1)=d(e1)/dt:
h(1)=delta1*ulp1;
% Bieu thuc h(2)=dm+_b1/dt:
h(2)=delta1*S1*ulp1*roT;
% Bieu thuc h(3)=dm-_b1/dt:
if p1>pmt
    h(3)=phi1*k0k*Fth1*p1/sqrt(Rg*Tg1);

```

```

else
    h(3) = 0;
end
% Bieu thuc h(4)=dmtr/dt theo cac dieu kien cu the:
if delta3 == 0
    h(4)=0;
    dItrd=0;
else
    if (p2>p1) && ((p2/p1)<((kn+1)/2)^(kn/(kn-1)))
        h411=phi2*Fth2*p2/sqrt(Rg*Tg2);
        h412=sqrt(2*kn/(kn-1)*((p1/p2)^(2/kn)-
(p1/p2)^((kn+1)/kn)));
        h(4)=delta3*h411*h412;
        dItrd=cp*Tg2*h(4);
    elseif (p2>p1) && ((p2/p1)>=((kn+1)/2)^(kn/(kn-
1)))
        h(4)=delta3*phi2*k0k*Fth2*p2/sqrt(Rg*Tg2);
        dItrd=cp*Tg2*h(4);
    elseif (p2<p1) && ((p1/p2)<((kn+1)/2)^(kn/(kn-
1)))
        h431=phi2*Fth2*p1/sqrt(Rg*Tg1);
        h432=sqrt(2*kn/(kn-1)*((p2/p1)^(2/kn)-
(p2/p1)^((kn+1)/kn)));
        h(4)=delta3*h431*h432;
        dItrd=cp*Tg1*h(4);
    elseif (p2<p1) && ((p1/p2)>=((kn+1)/2)^(kn/(kn-1)))
        h(4)=delta3*phi2*k0k*Fth2*p1/sqrt(Rg*Tg1);
        dItrd=cp*Tg1*h(4);
    else
        h(4)=0;
        dItrd=0;
    end
end
% Bieu thuc h(11), Tinh nhiet luong hao tan
adlcb1 = 0.023*lamda/Ddtr1*(Ddtr1*abs(y(2)+y(4)-
y(3))/(Ftd1*muy))^0.8*Pr^0.4;
adltd1 =
0.327*lamda*sqrt(sqrt(g*y(6)^2/(Ddtr1*(muy*Rg)^2*y(5)^2
));
adl1 = adlcb1 + adltd1;
abx1 = c0*epsilon*(epsilonK+1)/2*(y(5)/100)^4*(1-
(Tk1/y(5))^4)/(y(5)*(1-Tk1/y(5)));
hstn1 = adl1+abx1;
Fxq1 = pi*DK1*LK1;

```



```

h(11) = Fxq1*hstn1*(y(5)-Tk1);
% Bieu thuc h(5)=dTg1/dt:
h51=abs(1/(y(2)-y(3)+y(4)));
h52=h(2)*T11+(0*h(4)-h(3))*kn*Tg1;
h53=(h(2)-h(3)+h(4))*Tg1;
h54=(kn-1)/Rg*dItrd;
h(5)=h51*(h52-h53+h54)-(kn-1)/(Rg)*h(11);
% Bieu thuc h(6)=dp1/dt:
h61=Rg*Tg1*(h(2)-h(3)+h(4));
h62=delta1*p1*S1*ulp1;
h63=(p1*VK1t/Tg1)*h(5);
h(6)=1/VK1t*(h61-h62+h63);
% Bieu thuc h(7)=dec2/dt:
h(7)=delta2*ulp2;
% Bieu thuc h(8)=dm+_b2/dt:
h(8)=delta2*S2*ulp2*roT;
% Bieu thuc h(12): Xac dinh nhiet luong hao tan
adlcb2 = 0.023*lamda/Ddtr2*(Ddtr2*(y(8)-
y(4))/(Ftd2*muy))^0.8*Pr^0.4;
adltd2 =
0.327*lamda*sqrt(sqrt(g*y(10)^2/(Ddtr2*(muy*Rg)^2*y(9)^2
)));
adl2 = adlcb2 + adltd2;
abx2 = c0*epsilon*(epsilonK+1)/2*(y(9)/100)^4*(1-
(Tk2/y(9))^4)/(y(9)*(1-Tk2/y(9)));
hstn2 = adl2+abx2;
Fxq2 = pi*DK2*LK2;
h(12) = Fxq2*hstn2*(y(9)-Tk2);
% Bieu thuc h(9)=dTg2/dt:
h91=abs(1/(y(8)-y(4)));
h92=h(8)*T12-0*h(4)*Tg2;
h93=(h(8)-h(4))*Tg2;
h94=(kn-1)/Rg*dItrd;
h(9)=h91*(h92-h93-h94)-(kn-1)/(Rg)*h(12);
% Bieu thuc h(10)=dp2/dt:
h101=Rg*Tg2*(h(8)-h(4));
h102=delta2*p2*S2*ulp2;
h103=(p2*VK2t/Tg2)*h(9);
h(10)=(1/VK2t)*(h101-h102+h103);
for lr=1:spt
    sr(nr,lr)=btg*h(lr);
end
end
% Thu tuc phuong phap so runge kuta

```

```

    for                                                    lr=1:spt
x(lr)=x(lr)+(sr(2,lr)+2*sr(3,lr)+2*sr(4,lr)+sr(5,lr))/6;
    end
% Trich ket qua theo thoi gian
    Q1(k+1) = x(11);
    Tk1 = x(5) - (Q1(k+1)-Q1(k))/(btg*Fxq1*hstn1);
    Q2(k+1) = x(12);
    Tk2 = x(9) - (Q2(k+1)-Q2(k))/(btg*Fxq2*hstn2);
    tgt(k)=tg;
    ec1t(k)=x(1);
    ec2t(k)=x(7);
    p1t(k)=x(6);
    p2t(k)=x(10);
    t1t(k)=x(5);
    t2t(k)=x(9);
    tsas(k) = x(10)/x(6);
    hsld(k) = phil*k0k*Fw;
    P(k)=hsld(k)*Fth1*abs(p1t(k)-pmt)+delta2*(p2t(k)-
p1t(k))*Fth2;
    tg=tg+btg;
    k=k+1;
end
%% 7. Xuat ket qua duoi dang do thi
figure('color','white');
subplot(2,2,1)
plot (tgt,p1t,tgt,p2t,'--','LineWidth',1);
title('Do thi ap suat');
xlabel('Thoi gian [s]');
ylabel('Ap suat [Pa]');
legend('Buong dot 1','Buong dot 2');
grid;
subplot(2,2,2)
plot (tgt,P,'LineWidth',1);
title('Do thi luc day');
xlabel('Thoi gian [s]');
ylabel('Luc day [N]');
grid;
subplot(2,2,3)
plot (tgt,ec1t,tgt,ec2t,'--','LineWidth',1);
title('Do thi be day chay');
xlabel('Thoi gian [s]');
ylabel('Be day chay [m]');
legend('buong dot 1','Buong dot 2');
grid;

```

### Phụ lục 3: KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM XÁC ĐỊNH BỀ DÀY LIỀU THUỐC PHÒNG TRONG VÁCH NGĂN

VIỆN KH-CN QUÂN SỰ  
VIỆN TÊN LỬA  
Số 27/VTL-P14

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM  
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

Hà Nội, ngày 16 tháng 4 năm 2020

#### BÁO CÁO KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM

##### I. THÔNG TIN CHUNG:

- Ngày thử nghiệm: 16/04/2020
- Tên, kí hiệu mẫu: Động cơ mẫu 1
- Phương tiện đo: Thiết bị đo động lực tên lửa DEWE-4000
- Tiêu chuẩn áp dụng: TCQS 333:2014/VKHCNQS, TCQS 334:2014/VKHCNQS
- Địa điểm tiến hành thử nghiệm: Trường bắn TB4, Bộ Tư lệnh Thủ đô
- Điều kiện môi trường: Nhiệt độ: 31,2 °C Độ ẩm: 70,8 %

##### II. KẾT QUẢ:

TT	Đặc điểm động cơ	Buồng đốt 1		Buồng trung gian	
		$P_{1tb}$ (bar)	$t_1$ (s)	$P_{1gb}$ (bar)	$t_{1g}$ (s)
1	1 buồng đốt, liều đơn, $\Delta g_c = 23$ mm	62.15	2.60	43.79	0.73
2	1 buồng đốt, liều đơn, $\Delta g_c = 24$ mm	61.76	2.61	38.67	0.24
3	1 buồng đốt, liều đơn, $\Delta g_c = 25$ mm	59.71	2.65	0	0

Ghi chú:  $F_{1tb}$   $P_{1tb}$   $t_1$  lần lượt là lực đẩy trung bình, áp suất trung bình và thời gian làm việc của buồng đốt 1,  $P_{1gb}$   $t_{1g}$  lần lượt là áp suất trung bình tại buồng trung gian. Ký hiệu "x" thể hiện tham số không đo.

Đồ thị đo áp suất theo thời gian được đính kèm phiếu báo kết quả.

##### III. KẾT LUẬN:

NGƯỜI KIỂM SOÁT



Trung tá Phạm Quang Minh



THỬ NGHIỆM VIÊN



Thiếu tá Phạm Nhật Quang



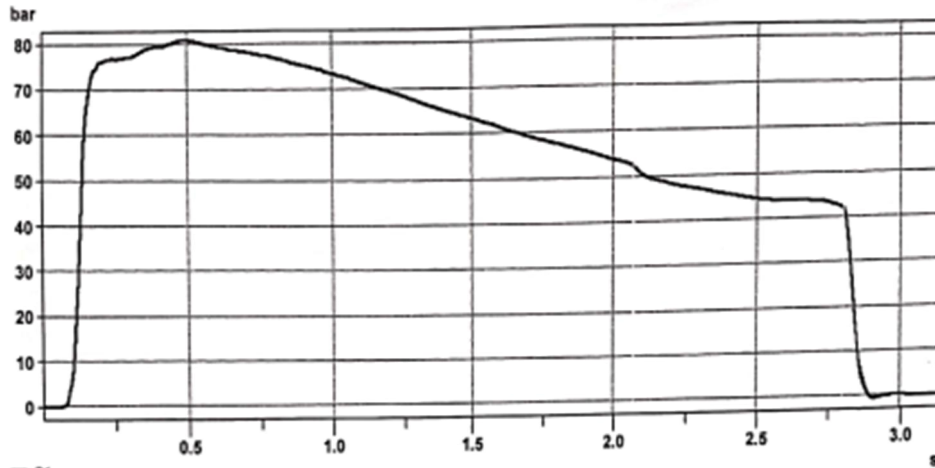
Thượng tá Đoàn Văn Thúy

PTN ĐO LƯỜNG ĐỘNG HỌC BAY  
SDT: 069516098

HỆ THỐNG ĐO ĐỘNG LỰC TÊN LỬA

**DASYLab**  
PHÁT SỐ: 01

**ĐỒ THỊ ÁP SUẤT P1**



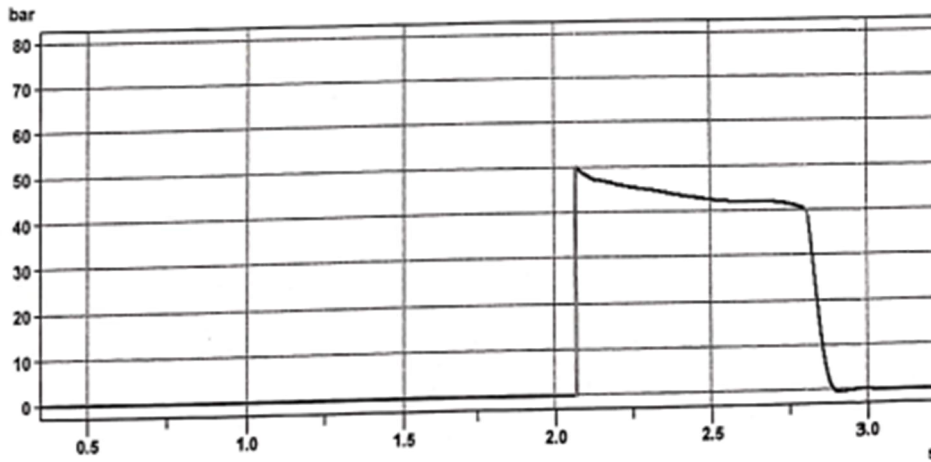
— P1

Channel:P1

Y1: 52.2300 bar  
t1: 18:13:43.0694  
dt: 0.7336 s  
dY: -10.4100  
Min: 41.8200  
Int: 33.6054

Y2: 41.8200 bar  
t2: 18:13:43.8030  
f: 1.3631 Hz  
dY/dt: -14.1903  
Max: 52.2300  
RMS: 45.8673

**ĐỒ THỊ ÁP SUẤT BƯỚC TRUNG GIAN**



— Pq

Channel:Pq

Y1: 0.0000 bar  
t1: 18:13:43.0688  
dt: 0.7336 s  
dY: 40.0187  
Min: 0.0000  
Int: 32.0729

Y2: 40.0187 bar  
t2: 18:13:43.8024  
f: 1.3631 Hz  
dY/dt: 54.5511  
Max: 49.8896  
RMS: 43.7983

**ĐIỀU KIỆN MÔI TRƯỜNG**  
Nhiệt độ: 31,2 oC Độ ẩm: 70,8 %



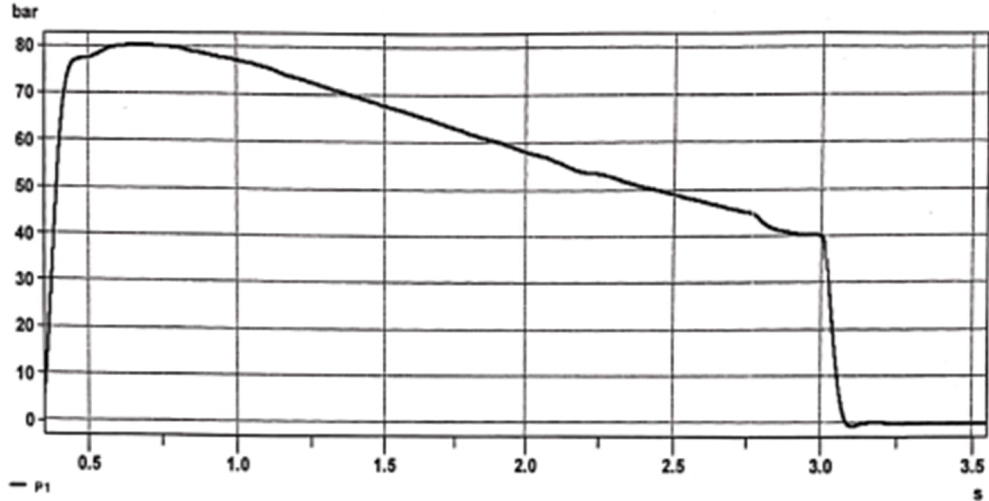
PTN ĐO LƯỜNG ĐỘNG HỌC BAY  
SĐT: 069516098

HỆ THỐNG ĐO ĐỘNG LỰC TÊN LỬA

**DASYLab**  
Dynamic Acquisition System Laboratory

PHÁT SỐ: 02

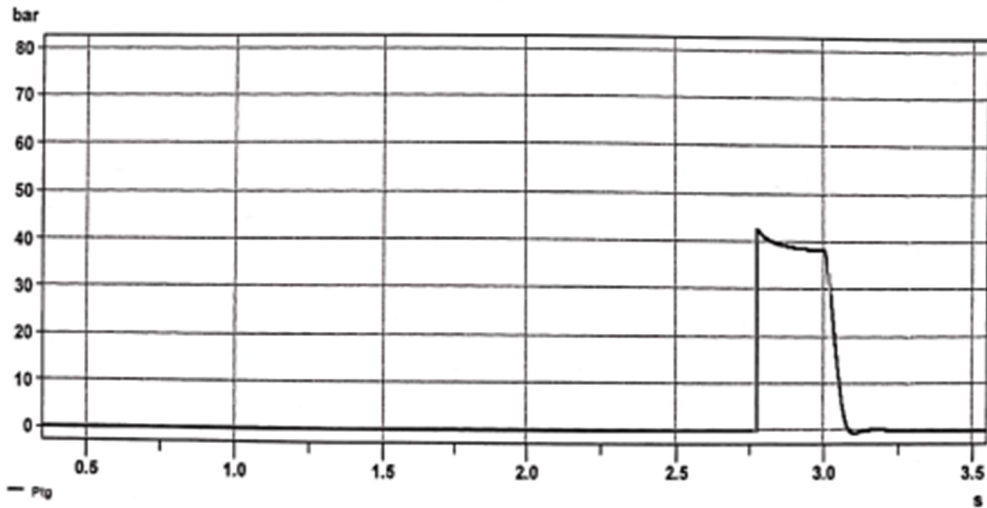
**ĐỒ THỊ ÁP SUẤT P1**



Channel:P1

Y1: 44.7100 bar	Y2: 34.2100 bar
t1: 17:29:54.7704	t2: 17:29:55.0174
dt: 0.2470 s	f: 4.0488 Hz
dY: -10.5000	dY/dt: -42.5101
Min: 34.2100	Max: 44.7100
Int: 10.1376	RMS: 41.0708

**ĐỒ THỊ ÁP SUẤT BUÔNG TRUNG GIAN**



Channel:Ptg

Y1: 0.0000 bar	Y2: 32.6550 bar
t1: 17:29:54.7704	t2: 17:29:55.0174
dt: 0.2470 s	f: 4.0488 Hz
dY: 32.6550	dY/dt: 132.2065
Min: 0.0000	Max: 42.4582
Int: 9.4426	RMS: 38.8766

**ĐIỀU KIỆN MÔI TRƯỜNG**  
Nhiệt độ: 31,2 oC    Độ ẩm: 70,8 %

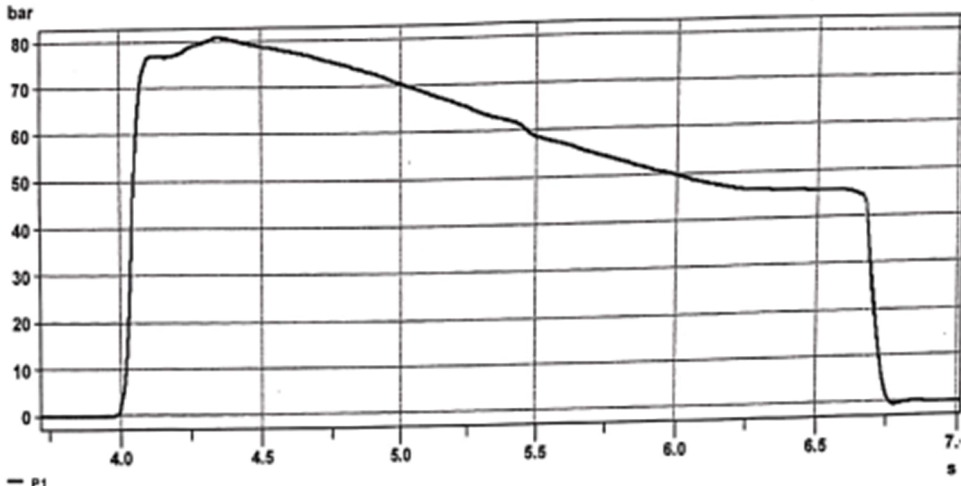


PTN ĐO LƯỜNG ĐỘNG HỌC BAY  
SĐT: 069516098

HỆ THỐNG ĐO ĐỘNG LỰC TÊN LỬA

**DASYLab**  
PHÁT SỐ: 03

**ĐỒ THỊ ÁP SUẤT P1**



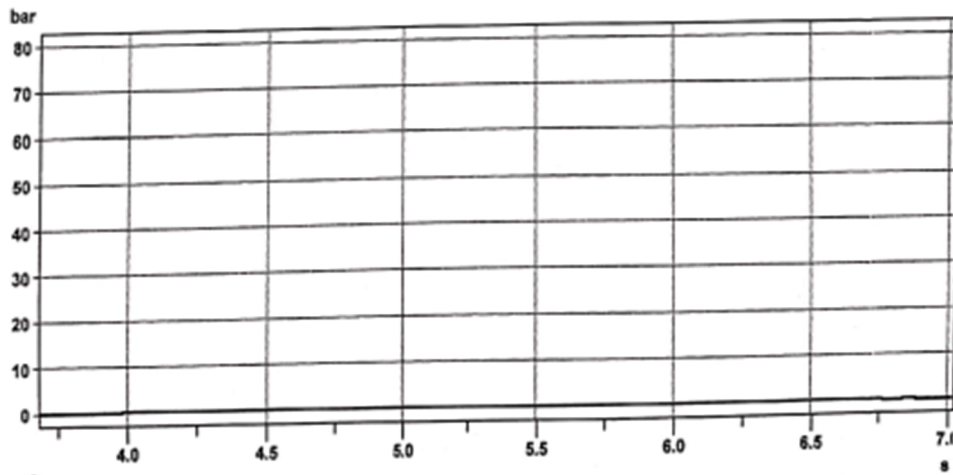
— P1

Channel:P1

Y1: 49.8916 bar  
t1: 18:23:09.0506  
dt: 2.6224 s  
dY: -6.2830  
Min: 43.6087  
Int: 163.1050

Y2: 43.6087 bar  
t2: 18:23:11.6730  
f: 0.3813 Hz  
dY/dt: -2.3959  
Max: 80.7045  
RMS: 63.4487

**ĐỒ THỊ ÁP SUẤT BUÔNG TRUNG GIAN**



— Ptg

Channel:Ptg

Y1: 0.0000 bar  
t1: 18:23:08.6780  
dt: 3.3406 s  
dY: 0.0000  
Min: -0.0001  
Int: 0.0307

Y2: 0.0000 bar  
t2: 18:23:12.0186  
f: 0.2993 Hz  
dY/dt: 0.0000  
Max: 0.0150  
RMS: 0.0105

**ĐIỀU KIỆN MÔI TRƯỜNG**  
Nhiệt độ: 31,2 oC Độ ẩm: 70,8 %



## Phụ lục 4: KẾT QUẢ THỬ NGHIỆM ĐO ÁP SUẤT, LỰC ĐẨY TRONG ĐỘNG CƠ MẪU

VIỆN KH-CN QUÂN SỰ  
VIỆN TÊN LỬA  
Số 30/VTL-PINIL

CỘNG HÒA XÃ HỘI CHỦ NGHĨA VIỆT NAM  
Độc lập - Tự do - Hạnh phúc

Hà Nội, ngày 20 tháng 5 năm 2020

### PHIẾU KẾT QUẢ ĐO ÁP SUẤT, LỰC ĐẨY

#### I. THÔNG TIN CHUNG:

- Ngày thử nghiệm: 20/5/2020
- Tên, kí hiệu mẫu: Động cơ mẫu 2
- Phương tiện đo: Thiết bị đo động lực tên lửa DEWE-4000
- Tiêu chuẩn áp dụng: TCQS 333:2014/VKHCNQS, TCQS 334:2014/VKHCNQS
- Địa điểm tiến hành thử nghiệm: Trường bắn TB4, Bộ Tư lệnh Thủ đô
- Điều kiện môi trường: Nhiệt độ: 33,1 °C Độ ẩm: 72,0 %

#### II. KẾT QUẢ:

TT	Đặc điểm động cơ	Động cơ sơ cấp			Động cơ thứ cấp			
		F <sub>1tb</sub> (N)	P <sub>1tb</sub> (bar)	t <sub>1</sub> (s)	F <sub>2tb</sub> (N)	P <sub>2tb</sub> (bar)	P <sub>21tb</sub> (bar)	t <sub>2</sub> (s)
1	2 buồng đốt, liều đơn, Δgc = 25 mm	2031	63.77	2.67	1892	61.83	59.29	2.61
2	2 buồng đốt, liều đơn, Δgc = 25 mm	2113	64.08	2.60	1909	58.81	57.89	2.63

*Ghi chú: F<sub>1tb</sub> P<sub>1tb</sub> t<sub>1</sub> lần lượt là lực đẩy trung bình, áp suất trung bình và thời gian làm việc của động cơ sơ cấp, F<sub>2tb</sub> P<sub>2tb</sub> t<sub>2</sub> lần lượt là lực đẩy trung bình, áp suất trung bình và thời gian làm việc của động cơ thứ cấp, P<sub>12tb</sub> là áp suất trung bình cấp do cảm biến áp suất gắn tại động cơ sơ cấp đo được khi động cơ thứ cấp làm việc. Ký hiệu "x" thể hiện tham số không đo.*

Đồ thị đo áp suất, lực đẩy theo thời gian được đính kèm phiếu báo kết quả.

NGƯỜI KIỂM SOÁT



Trung tá Phạm Quang Minh



THỬ NGHIỆM VIÊN



Thiếu tá Phạm Nhật Quang



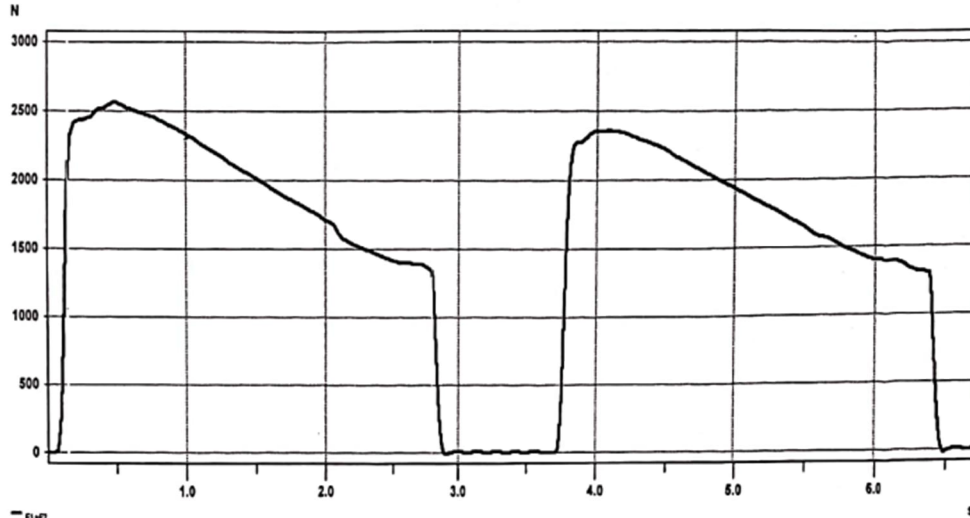
Thượng tá Đoàn Văn Thúy

PTN ĐO LƯỜNG ĐỘNG HỌC BAY  
SDT: 069516098

HỆ THỐNG ĐO ĐỘNG LỰC TÊN LỬA

**DASYLab**  
PHÁT SỐ: 01

ĐỒ THỊ LỰC ĐÁY



F1+F2

Channel:F1+F2

Y1: 2001.65 N	Y2: 1325.56 N
t1: -199.85 s	t2: -197.20 s
dt: 2.65 s	f: 0.38 Hz
dY: -676.09	dY/dt: -254.84
Min: 1325.56	Max: 2561.06
Int: 5278.73	RMS: 2031.04

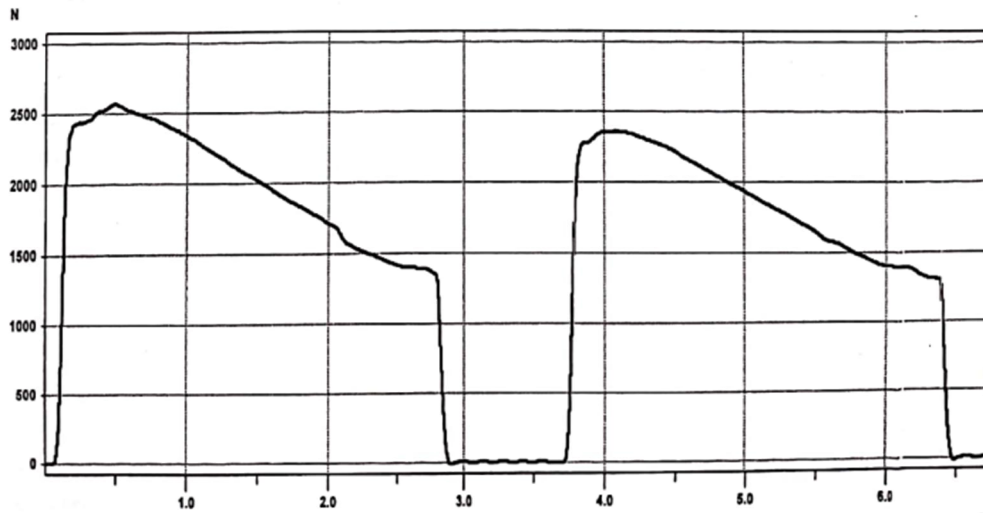
11/04/2011 10:27:41

PTN ĐO LƯỜNG ĐỘNG HỌC BAY  
SDT: 069516098

HỆ THỐNG ĐO ĐỘNG LỰC TÊN LỬA

**DASYLab**  
PHÁT SỐ: 01

ĐỒ THỊ LỰC ĐÁY



F1+F2

Channel:F1+F2

Y1: 1588.49 N	Y2: 1243.62 N
t1: -198.21 s	t2: -193.60 s
dt: 2.61 s	f: 0.38 Hz
dY: -344.87	dY/dt: -132.28
Min: 1243.62	Max: 2363.11
Int: 4844.77	RMS: 1892.09

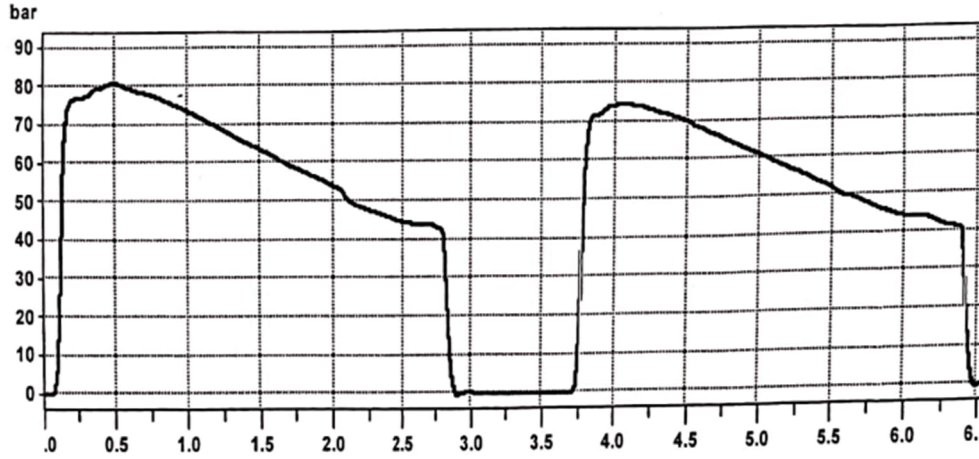


PTN ĐO LƯỜNG ĐỘNG HỌC BAY  
SDT: 069516098

HỆ THỐNG ĐO ĐỘNG LỰC TÊN LỬA

**DASYLa**  
Data Acquisition Systems Laboratory  
PHÁT SỐ: 01

ĐỒ THỊ ÁP SUẤT P1

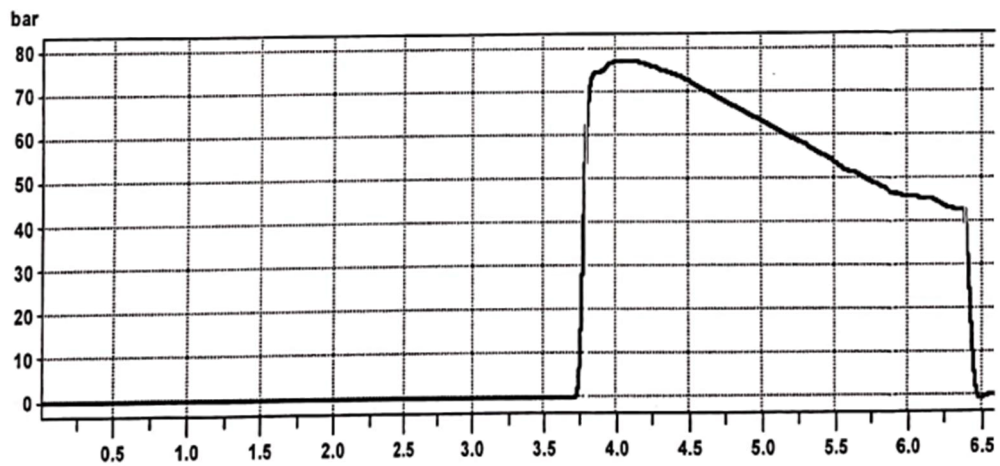


— P2  
Channel:P2

Y1: 26.61 bar	Y2: 23.38 bar
t1: -26.23 s	t2: -23.58 s
dt: 2.65 s	f: 0.38 Hz
dY: -3.23	dY/dt: -1.22
Min: 23.38	Max: 74.15
Int: 154.28	RMS: 59.29



ĐỒ THỊ ÁP SUẤT P2



— P1  
Channel:P1

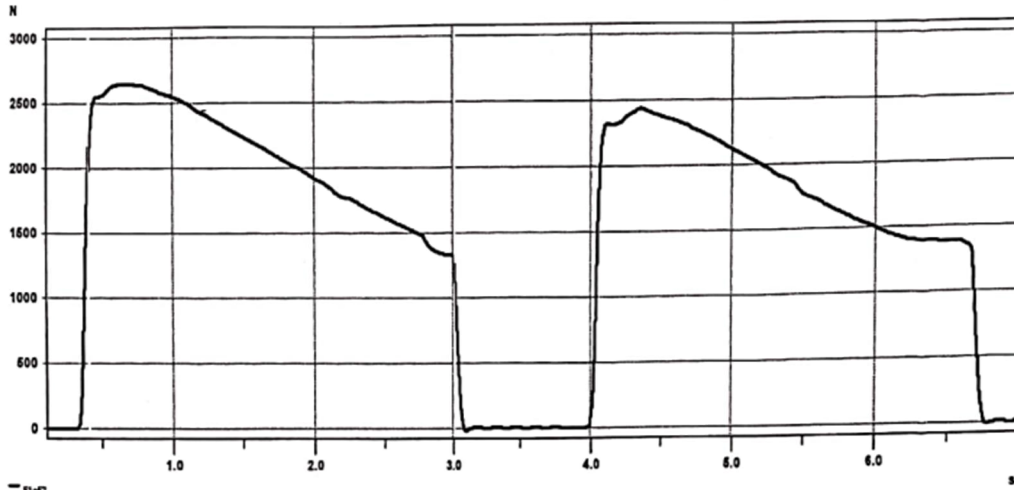
Y1: 58.91 bar	Y2: 40.80 bar
t1: 10:39:44.80	t2: 10:39:47.40
dt: 2.60 s	f: 0.38 Hz
dY: -18.12	dY/dt: -6.97
Min: 40.80	Max: 76.87
Int: 157.80	RMS: 61.83

PTN ĐO LƯỜNG ĐỘNG HỌC BAY  
SPT: 069516098

HỆ THỐNG ĐO ĐỘNG LỰC TÊN LỬA

**DASYLab**  
PHÁT SỐ: 02

ĐỒ THỊ LỰC ĐẨY



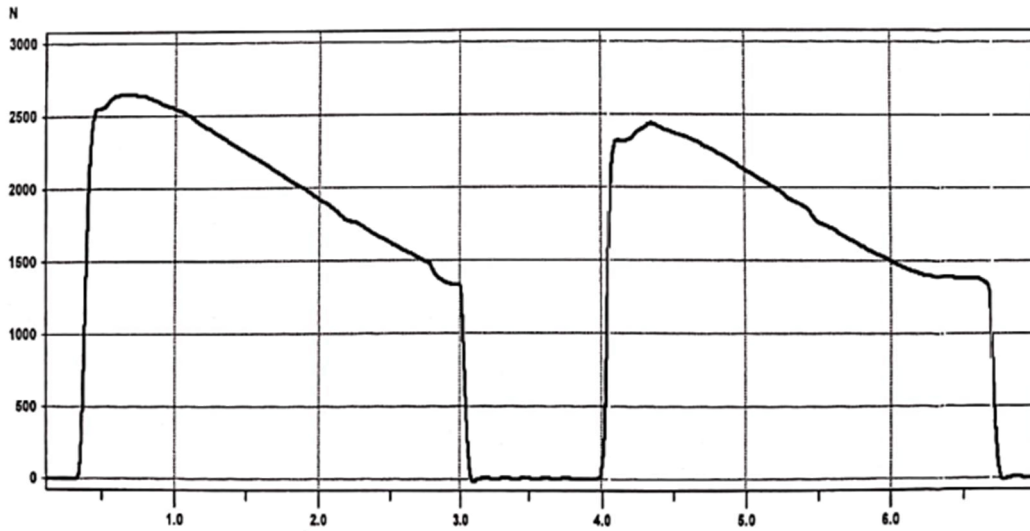
Channel: F1+F2  
 Y1: 2115.86 N                      Y2: 1182.80 N  
 t1: -199.59 s                      t2: -196.99 s  
 dt: 2.61 s                              f: 0.38 Hz  
 dY: -933.06                          dY/dt: -358.16  
 Min: 1182.80                          Max: 2642.63  
 Int: 6391.04                          RMS: 2112.74

PTN ĐO LƯỜNG ĐỘNG HỌC BAY  
SPT: 069516098

HỆ THỐNG ĐO ĐỘNG LỰC TÊN LỬA

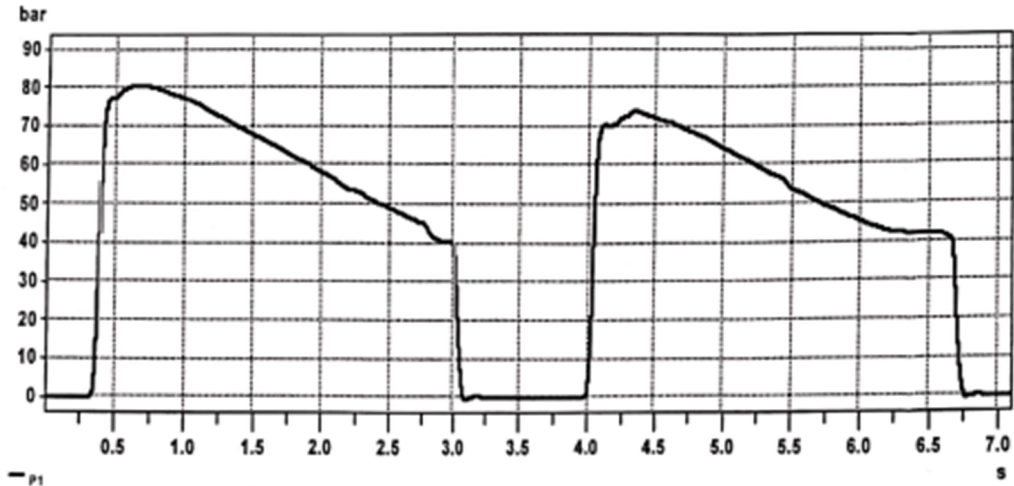
**DASYLab**  
PHÁT SỐ: 02

ĐỒ THỊ LỰC ĐẨY



Channel: F1+F2  
 Y1: 1762.95 N                      Y2: 957.90 N  
 t1: -195.94 s                      t2: -193.31 s  
 dt: 2.64 s                              f: 0.38 Hz  
 dY: -806.06                          dY/dt: -306.50  
 Min: 957.90                          Max: 2432.95  
 Int: 4928.39                          RMS: 1908.83

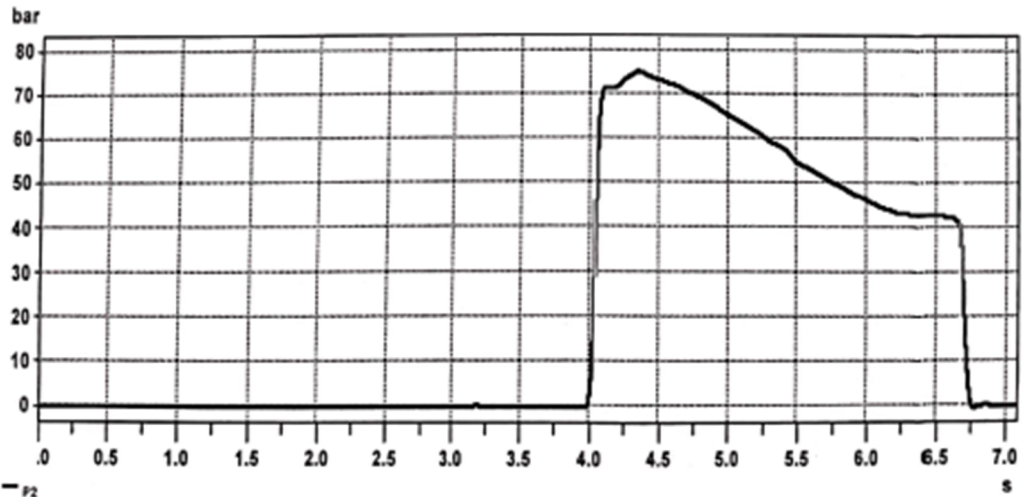
ĐỒ THỊ ÁP SUẤT P1



— P1  
Channel:P1

Y1: 50.01 bar	Y2: 39.92 bar
t1: -29.61 s	t2: -27.00 s
dt: 2.61 s	f: 0.38 Hz
dY: -10.09	dY/dt: -3.87
Min: 39.92	Max: 80.08
Int: 163.82	RMS: 64.08

ĐỒ THỊ ÁP SUẤT P2

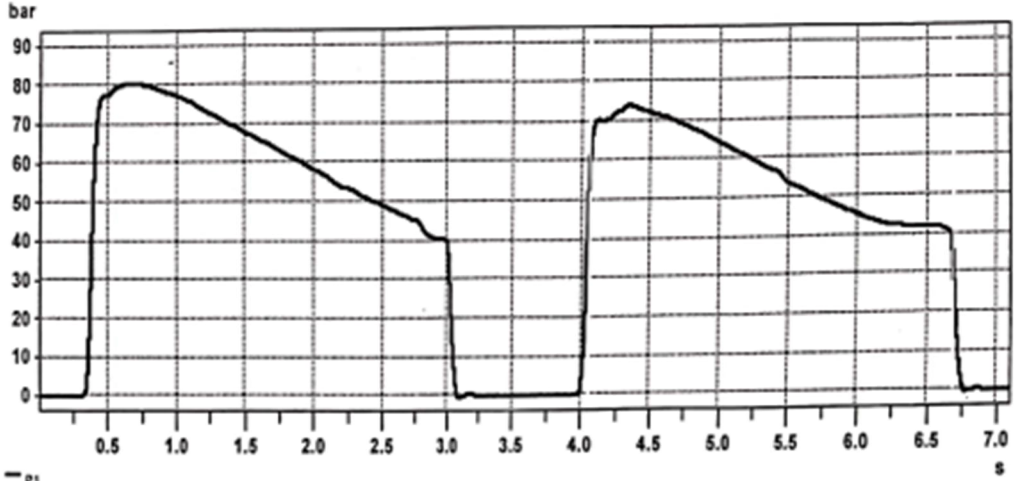


— P2  
Channel:P2

Y1: 44.35 bar	Y2: 37.00 bar
t1: 11:06:05.05	t2: 11:06:07.68
dt: 2.63 s	f: 0.38 Hz
dY: -7.35	dY/dt: -2.79
Min: 37.00	Max: 74.88
Int: 151.76	RMS: 58.81

ĐỒ THỊ ÁP SUẤT P1

ĐỒ THỊ ÁP SUẤT P1



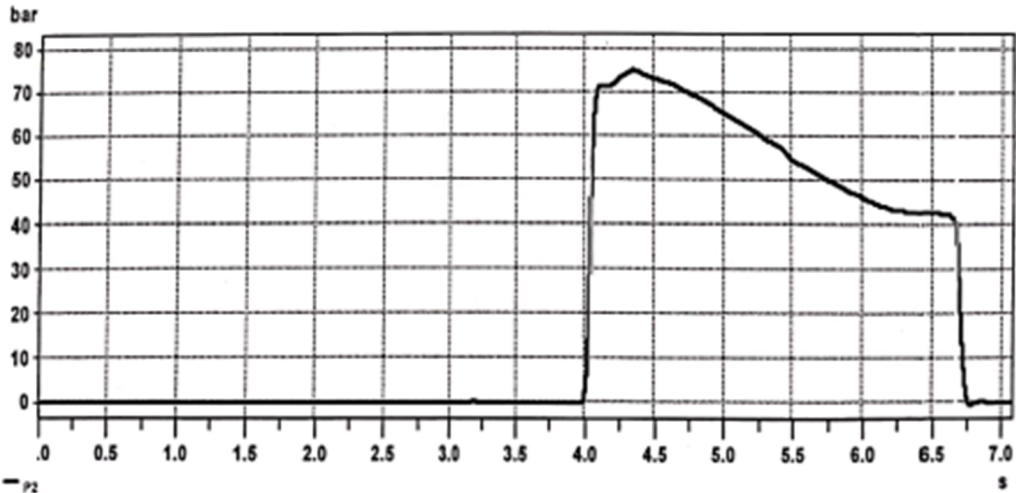
— P1

Channel:P1

Y1: 54.10 bar  
t1: -25.94 s  
dt: 2.63 s  
dY: -21.10  
Min: 33.00  
Int: 149.12

Y2: 33.00 bar  
t2: -23.31 s  
f: 0.38 Hz  
dY/dt: -8.03  
Max: 73.73  
RMS: 57.89

ĐỒ THỊ ÁP SUẤT P2



— P2

Channel:P2

Y1: 44.35 bar  
t1: 11:06:05.05  
dt: 2.63 s  
dY: -7.35  
Min: 37.00  
Int: 151.76

Y2: 37.00 bar  
t2: 11:06:07.68  
f: 0.38 Hz  
dY/dt: -2.79  
Max: 74.88  
RMS: 58.81