Nghiên cứu ảnh hưởng của một số tham số kết cấu liều nhiên liệu đến đặc trưng lực đẩy của động cơ hành trình kiểu "F-K"

Bùi Đình Tân[1*], Nguyễn Thế Lực[2], Trịnh Xuân Hữu[2]

[1]Viện Tên lửa, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự;
[2]Khoa Vũ khí, Học viện Kỹ thuật Quân sự.
[*]Email: buidinhtantb@gmail.com.
Nhận bài: 31/8/2022; Hoàn thiện: 07/11/2022; Chấp nhận đăng: 03/4/2023; Xuất bản: 25/6/2023.
DOI: https://doi.org/10.54939/1859-1043.j.mst.88.2023.162-168

TÓM TẮT

Động cơ hành trình kiểu "F-K" sử dụng liều nhiên liệu có kết cấu phức tạp tạo ra hai chế độ lực đẩy (tăng tốc và hành trình). Việc làm chủ tính toán thiết kế dạng liều phóng này là cơ sở làm chủ thiết kế động cơ hành trình tạo ra hai chế độ lực đẩy theo nguyên lý tổ hợp "F-K". Bài báo sử dụng các công cụ toán học xây dựng được mối quan hệ giữa tham số kết cấu với diện tích bề mặt cháy theo các chế độ cháy, trên cơ sở đó xác định bộ tham số thiết kế liều phù hợp với yêu cầu đặt ra.

Từ khóa: Động cơ; Nhiên liệu; Hai chế độ; Hành trình.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

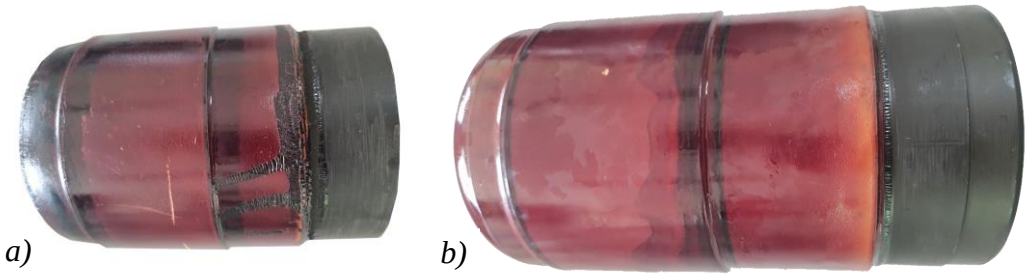
Hệ thống động lực của tổ hợp "F" và "K" gồm động cơ phóng và động cơ hành trình (ĐCHT) [5]. Sau khi ra khỏi ống phóng một khoảng cách nhất định sẽ khởi động ĐCHT. ĐCHT tiếp tục tăng tốc cho đạn, sau đó duy trì lực đẩy cho đến khi tiếp cận mục tiêu [3, 4].

Kết cấu loa phụt của ĐCHT của tổ hợp "F" và "K" (gọi tắt ĐCHT kiểu "F-K") có dạng cố định, không thay đổi trong quá trình động cơ làm việc, vì vậy, việc tạo ra hai chế độ lực đẩy (chế độ tăng tốc và hành trình) của động cơ hoàn toàn nhờ sự tự động thay đổi diện tích bề mặt cháy ngay trong quá trình động cơ làm việc [2]. Với phương pháp tạo hai chế độ lực đẩy dạng này, các thông số kết cấu liều nhiên liệu có vai trò quyết định đến giá trị và thời gian của mỗi chế độ lực đẩy. Việc làm chủ tính toán xác định diện tích bề mặt cháy của liều phóng phức tạp kiểu "F-K" là cơ sở làm chủ thiết kế, chế tạo ĐCHT hai chế độ lực đẩy dạng này.

2. XÂY DỰNG MÔ HÌNH VÀ TÍNH TOÁN

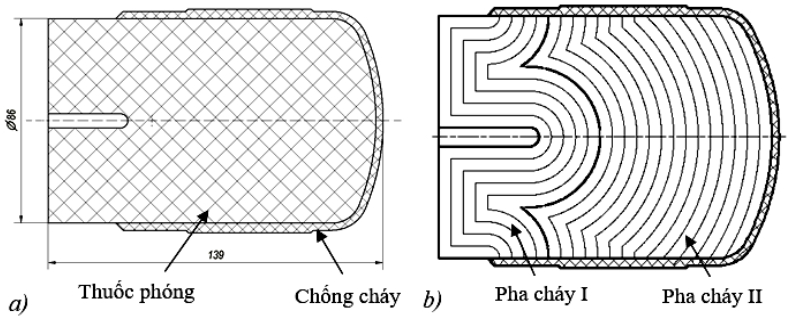
2.1. Kết cấu liều nhiên liệu ĐCHT và nguyên lý tạo hai chế độ lực đẩy

Liều nhiên liệu ĐCHT của tổ hợp "F" và "K" được mô tả trên hình 1. Kết cấu cả hai liều nhiên liệu đều gồm vỏ bọc chống cháy (bọc một phần hình trụ và phần chỏm cầu ngoài) và phần thuốc không bọc chống cháy. Bài báo tập trung nghiên cứu liều nhiên liệu ĐCHT của tổ hợp "F" (hình 2) làm cơ sở tính toán, thiết kế.



Hình 1. *Liều nhiên liệu ĐCHT của tổ hợp "F" và "K":*
a. Liều nhiên liệu ĐCHT của tổ hợp "F"; b. Liều nhiên liệu ĐCHT của tổ hợp "K".

Giai đoạn đầu, liều nhiên liệu có diện tích bề mặt cháy lớn dẫn đến lượng sinh khí lớn, tạo ra áp suất cao, sinh ra lực đẩy lớn (tương ứng chế độ tăng tốc)- Pha cháy I. Sau một khoảng thời gian, một số bề mặt cháy bị huỷ diện dẫn đến chỉ còn cháy trên một số bề mặt cháy. Các bề mặt cháy này dịch chuyển theo hướng trục dọc động cơ- Pha cháy II (có tổng diện tích bề mặt cháy gần như không đổi và nhỏ hơn nhiều so với Pha cháy I), tạo ra lực đẩy hành trình hay chế độ hành trình.



Hình 2. *Kết cấu liều nhiên liệu ĐCHT của tổ hợp "F" và các pha cháy:*
a) Hình dạng kết cấu; b) Các pha cháy cơ bản.

2.2. Xây dựng biểu thức xác định quy luật thay đổi diện tích bề mặt cháy

Quy luật cháy của liều nhiên liệu của động cơ tên lửa nhiên liệu rắn được xây dựng trên cơ sở coi thuốc phóng cháy theo các lớp song song và sử dụng quy tắc cháy hình học [1]. Dạng biến đổi $S_{ch}(t)$ hay $S_{ch}(e)$ theo các pha cháy của liều nhiên liệu ĐCHT của tổ hợp "F" được mô tả trên hình 2b gồm có hai pha cháy chính: pha cháy I và pha cháy II. Các ký hiệu kích thước d_{ng}, d_{tr}, l_{ng}, l_{tr}, l và quy ước các diện tích bề mặt cháy thành phần S_1, S_2, S_3, S_4, S_5 được mô tả trên hình 3.

Pha cháy I kết thúc khi bề mặt trụ ngoài tiếp xúc với bề mặt trụ trong, hủy diệt mặt đầu. Khi đó, bề dày cháy lớn nhất khi kết thúc Pha cháy I e_I được xác định:

$$d_{ng} - 2.e_I = d_{tr} + 2e_I$$
$$e_I = \frac{d_{ng} - d_{tr}}{4} \quad (1)$$

Tại thời điểm t trong Pha cháy I, thuốc phóng cháy được bề dày cháy $e = u.t$, các diện tích cháy thành phần S_i ($i = 1, 2, 3, 4, 5$) được xác định:

$$S_1 = 2\pi \cdot \int_{l-l_{ng}-e}^{l-l_{ng}} \left[\frac{d_{ng}}{2} + \sqrt{e^2 - \left(y - l + l_{ng}\right)^2} \right] \cdot \sqrt{1 + \frac{\left(y - l + l_{ng}\right)^2}{e^2 - \left(y - l + l_{ng}\right)^2}}\, dy$$

$$S_2 = 2\pi \cdot \left(\frac{d_{tr}}{2} + e \right) \cdot \left(l_{tr} - e \right)$$

$$S_3 = \pi \cdot \left[\left(\frac{d_{ng}}{2} - e \right)^2 - \left(\frac{d_{tr}}{2} + e \right)^2 \right] \quad (2)$$

$$S_4 = 2\pi \cdot \left(\frac{d_{ng}}{2} - e \right) \cdot \left(l_{ng} - e \right)$$

$$S_5 = \pi \frac{\left(d_{tr} + 2.e \right)^2}{2}$$

$$S_I(e) = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5$$

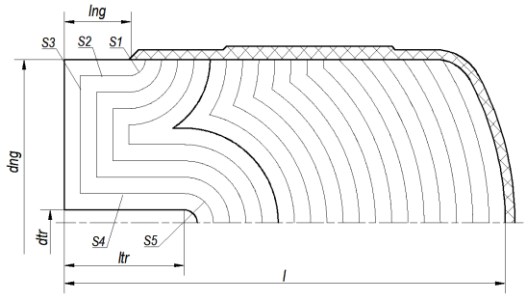
Tương tự, bề dày cháy lớn nhất của Pha cháy II được xác định:

$$e_{II} = l - l_{tr} - e_I - d_{tr} / 2 \tag{3}$$

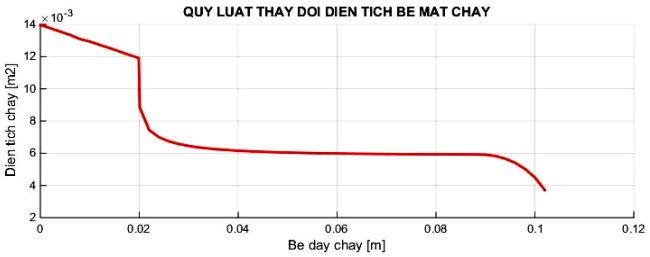
Trong pha cháy II, chỉ còn diện tích thành phần S_1 *và* S_5 các phần diện tích S_4, S_5, S_6 bị hủy diện; $S_{II}(e) = S_1 + S_5$, trong đó:

$$S_1 = 2\pi \cdot \int_{l-l_{ng}-e}^{l-l_{ng}} \left[\frac{d_{ng}}{2} + \sqrt{e^2 - \left(y - l + l_{ng}\right)^2} \right] \cdot \sqrt{1 + \frac{\left(y - l + l_{ng}\right)^2}{e^2 - \left(y - l + l_{ng}\right)^2}}\, dy$$

$$S_5 = \pi \frac{\left(d_{tr} + 2.e\right)^2}{2} \tag{4}$$



Hình 3. *Pha cháy và các diện tích thành phần.*



Hình 4. *Quy luật $S_{ch}(e)$ liều ĐCHT của tổ hợp "F".*

Từ các biểu thức trên, đưa bộ thông số kích thước liều nhiên liệu d_{ng} *= 86 mm,* d_{tr} *= 6 mm,* l_{ng} *= 28 mm, ltr = 33 mm, l = 136 mm* vào tính toán, xác định được đồ thị $S_{ch}(e)$ được mô tả trên hình 4.

2.3. Xây dựng hệ phương trình thuật phóng

Phù hợp với các giả thiết cơ bản, các tham số làm việc của động cơ tên lửa VKPLĐKTG được tính toán bởi hệ phương trình vi phân [2]:

$$\begin{cases} \dfrac{dp}{dt} = \dfrac{(k-1)}{V} Q_{\Sigma} - \dfrac{p}{V}\dfrac{dV}{dt}; \\ \dfrac{dT}{dt} = \dfrac{T}{pV}(k-1)\left[Q_{\Sigma} - \dfrac{RT}{k-1}.\left(\dot{m}_{m+} + \dot{m}_{+} - \dot{m}_{-}\right)\right]; \\ \dfrac{dV}{dt} = \dfrac{\dot{m}_{m+}}{\rho_m} + \dfrac{\dot{m}_{+}}{\rho_T}; \\ \dfrac{de}{dt} = u_1.p^{\nu}; \\ \dfrac{de_m}{dt} = u_m = u_{1m} p^{\nu_m}. \end{cases} \tag{5}$$

Điều kiện đầu đối với hệ, khi t = 0:

$$p = p_0;\ T = T_0;\ V = V_0;\ e_m = 0;\ e = 0 \quad (6)$$

Các biểu thức, phương trình bổ sung:

+ Nhiệt lượng toàn phần của động cơ:

$$Q_{\Sigma} = Q_m \dot{m}_{m+} + Q_e \dot{m}_{+} - k\varepsilon \dot{m}_{-} \quad (7)$$

+ Biểu thức xác định lưu lượng sinh khí của liều nhiên liệu:

$$\dot{m}_{+} = \frac{dm}{dt} = \rho_T . S_{ch}(e) . u_1 . p^{\nu} \quad (8)$$

+ Biểu thức xác định lưu lượng sinh khí của liều mồi:

$$\dot{m}_{m+} = \frac{dm_m}{dt} = \begin{cases} \dfrac{3m_{0m}(e_{0m} - e_m)^2}{e_{0m}^3} u_m \quad khi\ e_m \le e_{m0} \\ 0 \quad khi\ e_m > e_{m0} \end{cases} \quad (9)$$

+ Biểu thức xác định lưu lượng phụt khí:

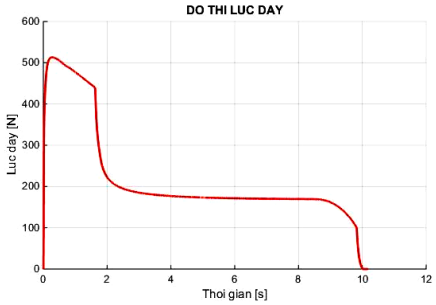
$$\dot{m}_{-} = \frac{\varphi_2 K_o(k) F_{th} p}{\sqrt{RT}} \quad (10)$$

+ Lực đẩy của động cơ:

$$P = C_p . F_{th} . p \quad (11)$$

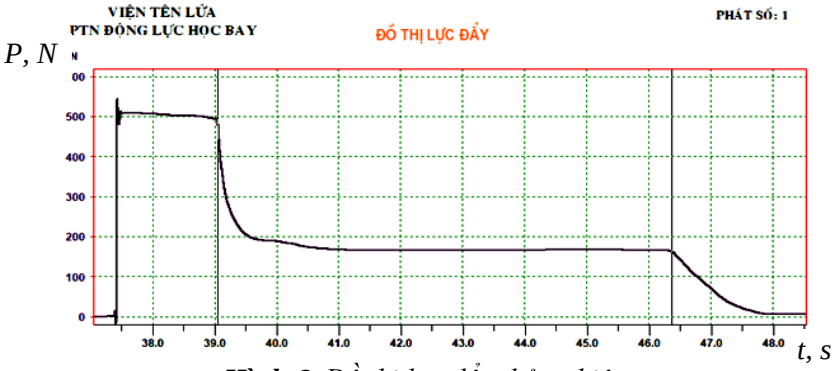
Trong đó: C_p - Hệ số lực đẩy của động cơ; T_0, T_n - Nhiệt độ ban đầu và nhiệt độ tiêu chuẩn; p, V - Áp suất và thể tích tự do của buồng đốt; p_0, V_0 - Áp suất ban đầu và thể tích tự do ban đầu của buồng đốt; e, e_m lần lượt là bề dày cháy của thuốc phóng và thuốc mồi tại thời điểm t; m_{0m}, e_{0m}, u_m tương ứng là khối lượng ban đầu, bề dày dáy lớn nhất và tốc độ cháy của thuốc mồi;

Giải hệ phương trình (5) bằng phương pháp Runge-Kutta với điều kiện đầu (6) và các thông số kết cấu ĐCHT của tổ hợp "F". Đồ thị lực đẩy tính toán *P(t)* mô tả trên hình 5.



Hình 5. *Đồ thị áp suất và lực đẩy tính toán.*

Tiến hành thử nghiệm ĐCHT Đồ thị lực đẩy thử nghiệm của ĐCHT của tổ hợp "F" được mô tả trên hình 6.



Hình 6. *Đồ thị lực đẩy thử nghiệm.*

Nhận xét: Các tham số tính toán lực đẩy của động cơ khá phù hợp với kết quả thử nghiệm. Như vậy, mô hình tính toán xác định sự thay đổi diện tích bề mặt cháy nêu trên có thể sử dụng để tính toán, thiết kế liều nhiên liệu cho ĐCHT kiểu "F-K".

3. KHẢO SÁT ẢNH HƯỞNG VÀ XÁC ĐỊNH KÍCH THƯỚC LIỀU NHIÊN LIỆU ĐCHT KIỂU "F-K"

Các chỉ tiêu đặt ra đối với một dạng ĐCHT kiểu "F-K" như sau: Đường kính *120 mm*; Lực đẩy trung bình giai đoạn tăng tốc: *480±20 N*; Lực đẩy trung bình giai đoạn hành trình: *160±10 N*; Thời gian làm việc giai đoạn tăng tốc: t_{lv1} = *1,8±0,1 s*; Thời gian làm việc giai đoạn hành trình: t_{lv2}> *10,5 s*; Áp suất trung bình giai đoạn tăng tốc: *110±10 bar*; Áp suất trung bình giai đoạn hành trình: *40±5 bar*. Liều sử dụng thuốc phóng RSI-12M do Việt Nam chế tạo.

Nghiên cứu, khảo sát bộ tham số kết cấu liều nhiên liệu d_{ng}, d_{tr}, l_{ng}, l_{tr}, l :

- Đường kính ngoài của liều d_{ng}: để tạo ra lực đẩy lớn, nhất là giai đoạn hành trình, giá trị d_{ng} tiệm cận kích thước kết cấu lớn nhất. Theo đó, d_{ng} được xác định tùy thuộc đường kính tên lửa:

$$d_{ng} = d_{tl} - 2.(\Delta_{dt} + \delta_v + \delta_{cc} + \delta_{cn}) = 120 - 2(6 + 1{,}5 + 2{,}5 + 3) = 94\ mm \qquad (12)$$

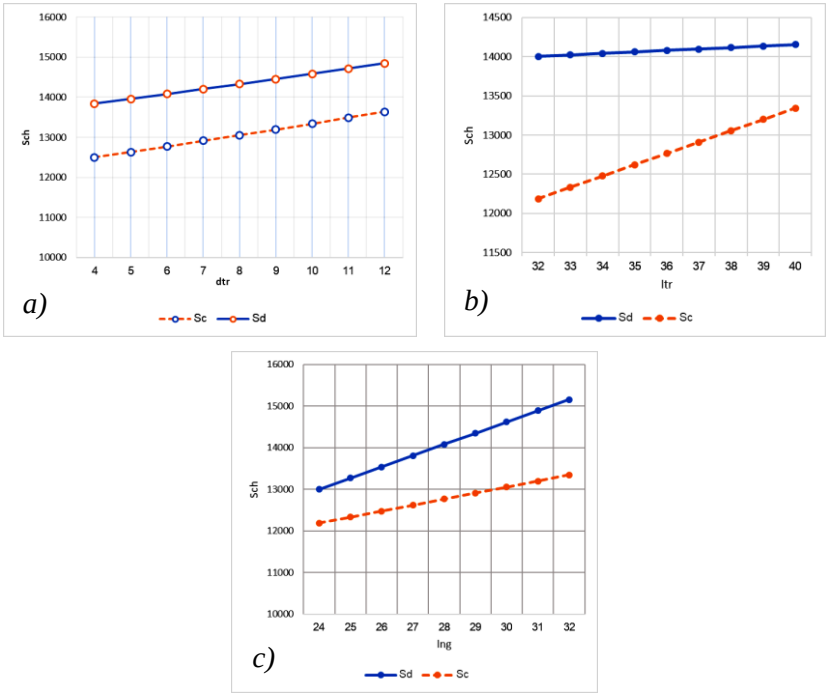
Trong đó, d_{tl}, Δ_{dt}, δ_v, δ_{cc}, δ_{cn} lần lượt là đường kính tên lửa, chiều cao đai định tâm, chiều dày vỏ, chiều dày lớp chống cháy và chiều dày lớp cách nhiệt.

- Chiều dài l ảnh hưởng đến thời gian làm việc của động cơ. Chiều dài l được tính chọn sơ bộ:

$$l = (t_{lv1} + t_{lv2}).u + l_{tr} = (10{,}8 + 1{,}8).9{,}0 + 33 \approx 147\ mm \qquad (13)$$

Trong đó, chiều dài sơ bộ phần trụ lỗ tham khảo giá trị *33 mm* của liều ĐCHT Fagot.

- Trên cơ sở bộ số liệu tham số d_{tr}, l_{ng}, l_{tr} của ĐCHT Fagot, từ công thức (2) tiến hành khảo sát ảnh hưởng của các tham số đến diện tích bề mặt cháy S_I^d ở đầu giai đoạn tăng tốc và S_I^c ở cuối giai đoạn tăng tốc được biểu diễn trên hình 7.



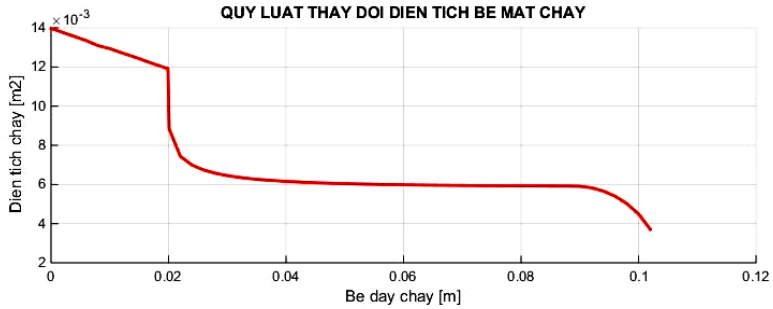
Hình 7. *Khảo sát ảnh hưởng của các tham số liều phóng đến S_I^d , S_I^c :*
a. Thay đổi d_{tr}; b. Thay đổi l_{tr}; c. Thay đổi l_{ng}.

Nhận xét:

- Từ hình 7a cho thấy, khi tăng d_{tr} làm tăng diện tích cháy, điều này kéo theo giảm thời gian t_{lv1}. Ngoài ra, khi giảm d_{tr} đến giá trị tới hạn sẽ xuất hiện hiện tượng xói mòn. Lựa chọn sơ bộ d_{tr} = *8 mm.*

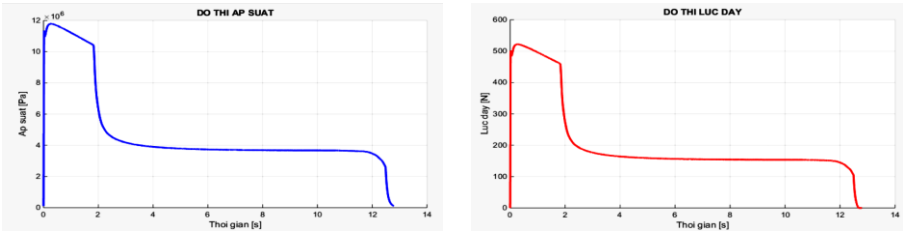
- Từ hình 7b cho thấy, khi l_{tr} nhỏ hơn *36 mm* giá trị $\Delta S_I = S_I^d - S_I^c$ khá lớn, tạo sự thay đổi lớn lực đẩy làm ảnh hưởng đến sự làm việc ổn định của động cơ. Khi l_{tr} lớn dẫn đến lỗ sâu, phải tăng chiều dài liều (theo công thức (13)), đồng thời tăng xu hướng xói mòn phía trong lỗ. Lựa chọn sơ bộ l_{tr} = *36 mm,* khi này *l = 150 mm;*

- Từ hình 7c cho thấy, khi thay đổi l_{ng} diện tích cháy thay đổi không nhiều. Lựa chọn sơ bộ chiều dài phần không bọc chống cháy ngoài tham khảo kết cấu liều ĐCHT Fagot: l_{ng} = *28 mm.*

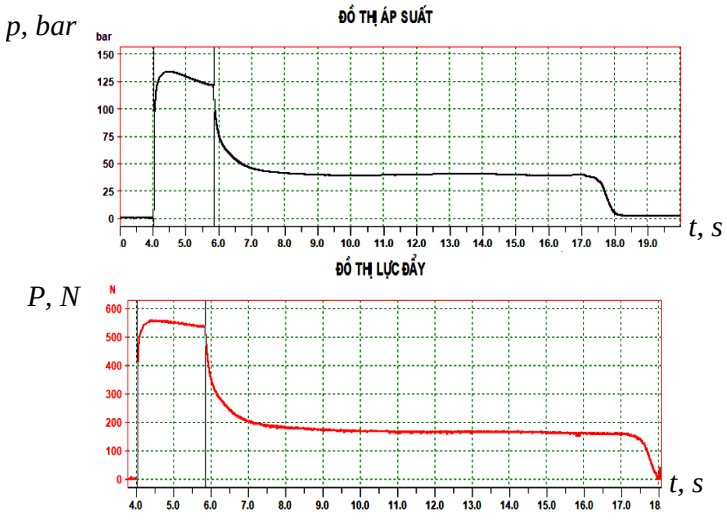


Hình 8. *Quy luật $S_{ch}(e)$ liều ĐCHT tên lửa chống tăng.*

Như vậy, từ kết quả nghiên cứu khảo sát ảnh hưởng và tính chọn sơ bộ kết cấu liều nhiên liệu theo chỉ tiêu đặt ra, nhóm tác giả đã chọn được bộ tham số kết cấu liều nhiên liệu như sau: d_{ng} = *94 mm,* d_{tr} = *8 mm,* l_{ng} = *28 mm,* l_{tr} = *36 mm, l = 150 mm.* Đồ thị thay đổi diện tích bề mặt cháy theo bề dày cháy mô tả trên hình 8.



Hình 9. *Đồ thị áp suất và lực đẩy tính toán.*



Hình 10. *Đồ thị áp suất và lực đẩy thử nghiệm.*

4. KẾT LUẬN

Từ việc khảo sát kết cấu liều nhiên liệu ĐCHT kiểu "F-K", nhóm tác giả đã tiến hành phân chia được các pha cháy và xây dựng được các biểu thức tính toán các phân hình diện tích bề mặt bằng biểu thức giải tích để đưa vào tính toán bằng công cụ máy tính.

Kết quả tính toán xác định các thông số lực đẩy đối chứng khá phù hợp với kết quả thực nghiệm cho thấy phương pháp tính toán diện tích bề mặt cháy là phù hợp với đặc điểm làm việc của ĐCHT của tổ hợp "F". Từ các kết quả khảo sát ảnh hưởng của các tham số kết cấu liều, nhóm tác giả đã xác định được bộ tham số kết cấu phù hợp với chỉ tiêu đặt ra. Kết quả tính toán các thông số áp suất, lực đẩy theo bộ thông số này khá phù hợp với kết quả thử nghiệm đối chứng trên động cơ mẫu.

Do hạn chế về khuôn khổ trình bày của bài báo, rất nhiều nội dung khảo sát và tính toán không thể trình bày hết được. Nhóm tác giả chỉ trình bày được những kết quả chung nhất của quá trình nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. Lê Song Tùng và các tác giả, *"Tính toán thiết kế động cơ tên lửa nhiên liệu rắn"*, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, Hà Nội, (2013).
[2]. Bùi Đình Tân, *"Nghiên cứu ảnh hưởng của một số tham số kết cấu đến chế độ làm việc của động cơ hai buồng đốt làm việc nối tiếp"*, Luận án Tiến sĩ, Viện Khoa học và Công nghệ quân sự, (2019).
[3]. "Техническое описание и инструкция по эксплуатации ПТУРС 9М111М".
[4]. *"Техническое описание и инструкция по эксплуатации ПТУРС 9М113".*
[5]. Орлов А.Р. *"Вариант оценки качества конструкции ПТУР".* Тула: Изд-во ТулГУ, (1999).
[6]. Липанов А.М., Алиев А.В., *"Проектирование ракетных двигателей твёрдого топлива"*, М.: Машиностроение, (1995).

ABSTRACT

Research on the effects of some parameters of structural fuel on the thrust characteristics of cruise engine type "F-K"

The "F-K" type cruise engine uses a complex fuel dose that produces two modes of thrust (acceleration and cruise). This mastery of the design of the dose is the basis for mastering the design of a cruise engine that creates two modes of thrust by the type "F-K". The article uses mathematical tools to build the relationship between the structure parameter and the fire surface area according to the fire modes, on that basis to determine the dose design parameter set suitable for the set requirements.

Keywords: Engine; Fuel; Two modes; Cruise Engine.