

TÍNH TOÁN MÔ PHỎNG DÒNG CHẢY TRONG BUỒNG ĐỐT ĐỘNG CƠ NHIÊN LIỆU RẮN VỚI THUỐC PHÓNG HỖN HỢP HAI LỚP

Nguyễn Tiến Hòa¹, Hoàng Minh Tuấn^{1,*}

¹*Viện Hàng không Vũ trụ Viettel*

Tóm tắt

Bài báo trình bày phương pháp tính toán mô phỏng dòng chảy trong buồng đốt động cơ nhiên liệu rắn, áp dụng cho động cơ sử dụng thuốc phóng hỗn hợp hai lớp, sử dụng phần mềm mô phỏng Ansys Fluent. Quá trình cháy hồi quy của bề mặt cháy của thỏi nhiên liệu được mô phỏng bằng phương pháp mô phỏng số, công cụ Dynamic Meshing kết hợp với các hàm UDF (users define function), được viết trên ngôn ngữ lập trình C++. Các tác giả đề xuất phương pháp tính toán tốc độ cháy trung bình cho loại nhiên liệu rắn hỗn hợp, từ đó đơn giản quá trình tính toán mô phỏng mà vẫn thu được kết quả tương ứng với kết quả thực nghiệm. Kết quả tính toán cho đường cong lực đẩy - thời gian có biên dạng tương đồng với kết quả thực nghiệm. Lực đẩy lớn nhất đạt được trong giai đoạn cháy ổn định là 4,98 kN, giá trị tương ứng thực nghiệm là 5,0 kN.

Từ khóa: Nhiên liệu rắn hỗn hợp; sự cháy hồi quy nhiên liệu rắn; tính toán lưới động; tính toán động lực học chất lưu; Ansys Fluent; hàm người dùng tự định nghĩa; lực đẩy.

1. Đặt vấn đề

Động cơ nhiên liệu rắn sử dụng thuốc phóng hỗn hợp hai lớp là loại động cơ nhiên liệu rắn, trong đó thỏi thuốc phóng được cấu tạo bởi hai loại thuốc phóng có các thông số (tốc độ cháy, áp suất cháy, thời gian cháy...) khác nhau. Thông thường, một loại thuốc phóng sẽ có tốc độ cháy nhanh hơn loại còn lại. Cấu tạo thuốc phóng dạng này thường được sử dụng trong các động cơ nhiên liệu rắn hai chế độ lực đẩy hoặc các động cơ nhiên liệu rắn bị giới hạn về kích thước thỏi thuốc nhưng có yêu cầu đặc biệt về biên đổi đường cong lực đẩy - thời gian cháy, áp suất - thời gian cháy. Thỏi thuốc phóng trong động cơ nhiên liệu rắn loại này thường được chế tạo theo công nghệ cán ép thuốc phóng hỗn hợp.

Động cơ nhiên liệu rắn là loại động cơ sử dụng nhiên liệu rắn có khả năng sinh nhiệt lượng cao và có quá trình cháy diễn ra phức tạp. Tính chất của quá trình cháy phụ thuộc vào nhiệt độ bắt cháy ban đầu, kết cấu của thỏi nhiên liệu, diện tích bề mặt cháy ban đầu và đặc biệt phụ thuộc vào áp suất trong buồng đốt của động cơ. Đặc điểm của

* Email: tuanhoangk38@gmail.com
DOI: 10.56651/lqdtu.jst.v19.n01.733

quá trình cháy được đặc trưng bởi hàm vận tốc cháy của nhiên liệu. Ngoài ra, có những yếu tố khác ảnh hưởng đến quy luật vận tốc cháy như: thành phần nhiên liệu, nhiệt độ ban đầu, vận tốc chảy của dòng khí... Trong các yếu tố trên, áp suất trong buồng đốt đóng vai trò quan trọng, quyết định tới tính chất nhanh hay chậm của quá trình cháy, áp suất càng cao thì vận tốc cháy càng lớn và ngược lại. Do vậy, việc nghiên cứu tính quy luật và mối quan hệ tương hỗ giữa hai đại lượng áp suất trong buồng đốt và vận tốc cháy của nhiên liệu đặt ra vấn đề cần giải quyết trong bài toán thiết kế động cơ sử dụng nhiên liệu rắn.

Trong buồng đốt động cơ nhiên liệu rắn, vùng xảy ra phản ứng nhiệt phân chuyển hóa thuốc phóng rắn thành các sản phẩm khí có kích thước rất mỏng, chỉ khoảng vài milimet tính từ bề mặt thổi thuốc, đồng thời quá trình phản ứng diễn biến rất phức tạp và khó khăn để mô phỏng bằng mô hình toán học. Do đó, để dễ dàng và thuận lợi trong tính toán thì các nghiên cứu được đơn giản hóa bằng cách sử dụng mô hình mô phỏng dòng khí trong buồng đốt, kết hợp với phương trình Euler và phương trình Navier-Stokes để mô tả dòng chảy. Rất nhiều nghiên cứu đã áp dụng phương pháp này để tính toán mô phỏng cho dòng khí cháy trong buồng đốt [1-4].

Trong nghiên cứu này, quá trình xảy ra trong buồng đốt động cơ được mô phỏng sử dụng mô hình 2D dòng sản phẩm cháy được phun từ bề mặt cháy của thỏi nhiên liệu vào buồng đốt động cơ. Dòng sản phẩm khí chuyển động trong buồng đốt và được tăng tốc qua loa phụt (*loa phụt dạng ống Laval*), được thoát ra ngoài tạo lực đẩy. Đồng thời, quá trình cháy của thỏi nhiên liệu rắn (*sự hồi quy của bề mặt cháy*) được mô tả bằng cách dịch chuyển bề mặt cháy theo tốc độ bằng với tốc độ cháy của nhiên liệu.

Các phương trình mô tả dòng chảy (*bảo toàn năng lượng, bảo toàn động lượng, phương trình liên tục, phương trình trạng thái*) được giải bằng cách sử dụng thuật toán của phần mềm thương mại Ansys Fluent. Kết quả phân tích thu được đồ thị phụ thuộc áp suất, nhiệt độ buồng đốt vào tốc độ cháy và thời gian cháy. Tính toán lực đẩy theo thời gian cháy và tốc độ cháy.

2. Cơ sở lý thuyết, phương trình toán học và sơ đồ thuật toán

2.1. Phương trình chủ đạo

Các phương trình chủ đạo cho dòng chảy khí có thể được mô tả ở nhiều dạng khác nhau. Đối với mô hình dòng chảy phản ứng hai chiều sử dụng trong nghiên cứu này được dựa trên những phương trình bảo toàn khối lượng (*phương trình liên tục*), bảo toàn động lượng, bảo toàn năng lượng. Hệ phương trình mô tả chuyển động của một dòng khí bất kỳ được viết dưới dạng tổng quát [5]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \cdot \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \text{div}(\rho \cdot \vec{v} \cdot \vec{v}) = -\nabla p + \text{div}(\vec{\tau}) + \rho \cdot \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \text{div}(\vec{v}(\rho E + p)) = \text{div}\left(k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j\right) + S_n \quad (3)$$

trong đó: ρ - mật độ dòng khí; \vec{v} - vectơ vận tốc dòng khí; S_m - khối lượng được thêm vào pha liên tục từ pha khuếch tán thứ 2 và các nguồn do người dùng tự định nghĩa; $\rho \cdot \vec{g}$ và \vec{F} - lực trọng trường và ngoại lực tác dụng lên hệ; $\vec{\tau}$ - ten-xơ ứng suất, được xác định bởi công thức theo định luật Stokes:

$$\vec{\tau} = \mu \left[(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \text{div}(\vec{v}I) \right] \quad (4)$$

k_{eff} - hệ số dẫn nhiệt hiệu dụng; \vec{J}_j - thông lượng khuếch tán (*diffusion flux*) của thành phần thứ j; S_n - nhiệt lượng người dùng sử dụng, do đó ở đây chúng ta bỏ qua đại lượng S_n ; T - nhiệt độ dòng chất khí; E - tổng năng lượng của dòng khí được định nghĩa như sau: $E = h - \frac{p}{\rho} + \frac{v^2}{2}$; h - enthalpy, được tính theo công thức $h = \int c_p dT$.

2.2. Phương trình tốc độ cháy và bảo toàn khối lượng trong quá trình cháy nhiên liệu rắn trong buồng đốt động cơ

Thực nghiệm và lý thuyết cho thấy tốc độ cháy phụ thuộc vào một loạt các yếu tố. Ở nghiên cứu này, ta chỉ xem xét tốc độ cháy phụ thuộc vào áp suất trong buồng đốt động cơ. Tốc độ cháy được tính theo công thức hàm lũy thừa [6]:

$$\dot{u}_r = u_e \cdot p^v \quad (5)$$

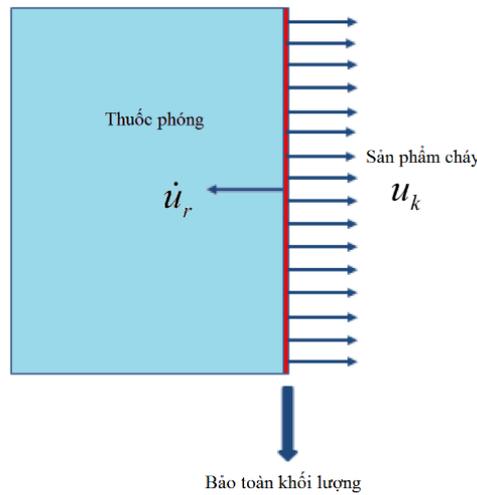
trong đó: \dot{u}_r - tốc độ cháy m/s; p - áp suất trong buồng đốt động cơ; u_e - tốc độ tuyến tính đặc trưng cho hiện tượng tăng tốc độ cháy khi tăng áp suất trong buồng đốt; v - số mũ của quy luật tốc độ cháy. Thực tế, u_e và v là các hệ số chỉ xác định được bằng thực nghiệm.

Quá trình cháy của thỏi nhiên liệu rắn xuất hiện sự dịch chuyển hồi quy bề mặt cháy theo thời gian cháy, do đó bề mặt này cũng sẽ phải được dịch chuyển theo thời gian cháy trong quá trình mô phỏng. Sự dịch chuyển này được mô tả ví dụ như trên hình 1. Khi nhiên liệu rắn cháy, biên màu đỏ sẽ dịch chuyển sang trái theo thời gian với tốc độ ngang bằng với tốc độ cháy \dot{u}_r .

Như sự hồi quy của bề mặt nhiên liệu rắn với tốc độ cháy u_r , thì dòng khí sản phẩm sinh ra sẽ được phụt khỏi bề mặt cháy theo hướng ngược lại với tốc độ u_k . Do mật độ chất rắn ρ_r lớn hơn rất nhiều so với mật độ của sản phẩm khí cháy ρ_k nên vận tốc khí cháy phụt vào buồng đốt sẽ lớn hơn rất nhiều so với tốc độ cháy của nhiên liệu rắn. Do đó, phương trình bảo toàn khối lượng có thể được viết ở dưới dạng xấp xỉ như sau [1, 4, 7]:

$$\dot{u}_r \cdot \rho_r \approx u_k \cdot \rho_k \quad (6)$$

Từ phương trình này ta có thể tính toán được thông số của biên đầu vào, làm cơ sở cho quá trình tính toán.



Hình 1. Mô hình cháy của bề mặt nhiên liệu rắn.

2.3. Mô hình dịch chuyển biên trong bài toán mô phỏng

Giả định quá trình cháy có các bề mặt cháy song song với bề mặt cháy ban đầu của thỏi nhiên liệu. Mô hình mô phỏng sẽ có dạng biên đầu vào dịch chuyển theo thời gian với tốc độ bằng với tốc độ cháy (được xác định theo áp suất trong buồng đốt). Nhóm tác giả sử dụng các hàm UDF để mô tả và thiết lập mô hình dịch chuyển biên theo thời gian như trên. Các hàm UDF lần lượt được sử dụng như sau:

Đầu tiên, ở cuối một bước tính toán, một hàm UDF được sử dụng để tính toán các thông số áp suất buồng đốt, diện tích bề mặt cháy, vận tốc cháy của mô hình.

Sau đó, hàm UDF thứ hai được sử dụng để cập nhật thông số vừa tính toán được trước đó làm điều kiện biên đầu vào cho quá trình tính toán ở bước thời gian tiếp theo.

Tiếp theo, hàm UDF thứ 3 được sử dụng để dịch chuyển biên đầu vào tới vị trí mới theo đúng tốc độ và biên dạng xác định. Kết thúc giai đoạn này, công cụ “Dynamic Remeshing” của Fluent được sử dụng để cập nhật thêm các ô lưới vào vị trí không gian

trồng mới được tạo ra trong quá trình dịch chuyển của biên đầu vào.

Sau khi tất cả các bước đã hoàn tất, mô hình được tiếp tục tính toán với bước thời gian tiếp theo và lặp lại quy trình trên. Quá trình tính toán kết thúc khi thời nhiên liệu được cháy hết. Quá trình tính toán được thể hiện trên sơ đồ hình 2.

3. Mô hình hình học và thông số đầu vào

3.1. Mô hình hình học

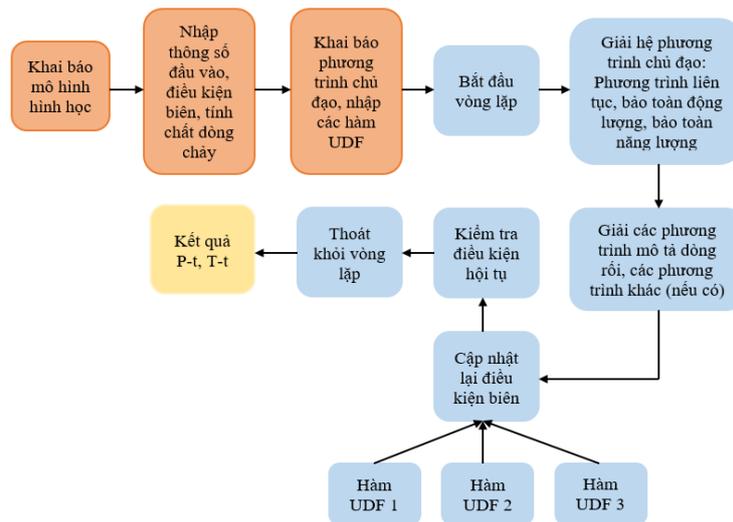
Mô hình nghiên cứu 2D của bài toán có những điều kiện biên như sau:

- Biên đầu vào bao gồm 2 đoạn, là bề mặt của thời nhiên liệu ở tại thời điểm ban đầu, khi chưa bắt đầu cháy. Biên đầu vào này sẽ dịch chuyển trong quá trình cháy (quá trình mô phỏng). Do vận tốc khí phụt ở đầu vào nhỏ nên vùng biên đầu vào được tính toán ở điều kiện cận âm.

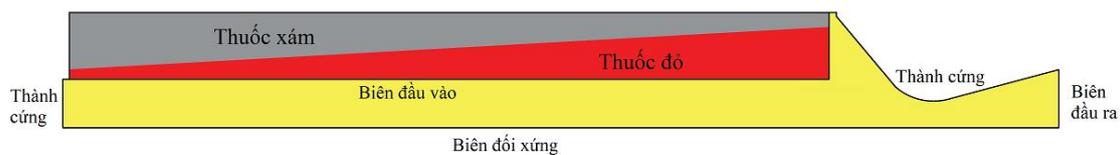
- Biên đầu ra là vùng ngoài cùng của loa phụt. Tại đây dòng khí có vận tốc lớn hơn vận tốc âm thanh nên biên đầu ra này được tính toán ở điều kiện siêu âm.

- Thành cứng là phần vỏ động cơ, vỏ buồng đốt và phần vỏ loa phụt bao quanh miền chuyển động của sản phẩm khí cháy trong quá trình tính toán.

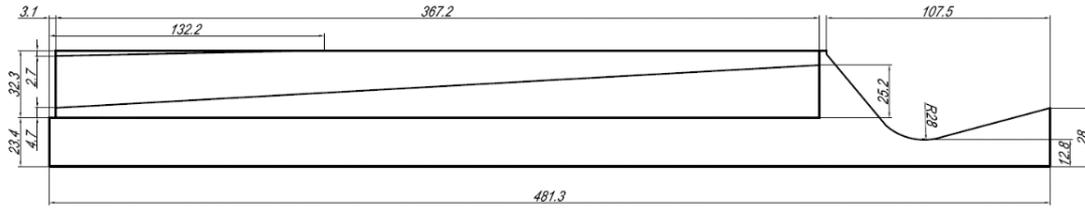
- Biên đối xứng là trục đối xứng của mô hình.



Hình 2. Sơ đồ tính toán.



Hình 3. Minh họa kết cấu thời thuốc phóng trong động cơ.



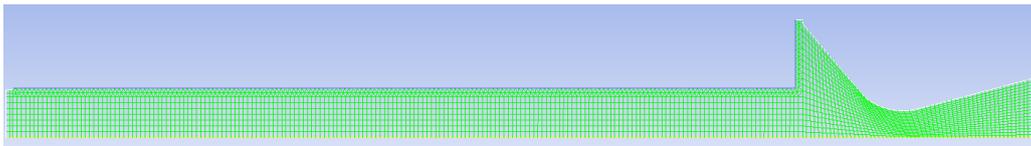
Hình 4. Bản vẽ kích thước thổi thuốc phóng và động cơ (đơn vị mm).

3.2. Chia lưới mô hình

Mô hình được chia thành các phần tử lưới (Hình 5) với thông số:

- Kích thước phần tử lưới: 1,5 mm.
- Chỉ số minimum orthogonal quality: 0,2.
- Chỉ số maximum Aspect Ratio: 8,79.

Lưới được chia làm 2 vùng riêng biệt, vùng gần bề mặt biên đầu vào được chia lưới tam giác, mục đích là để trong quá trình chuyển động của biên đầu vào, quá trình lưới mới được cập nhật vào theo công cụ “Dynamic Remeshing” của Fluent (do công cụ này chỉ hoạt động khi lưới trong khu vực được chia loại lưới tam giác). Phần còn lại được chia thành lưới cấu trúc hình chữ nhật, mục đích để khi quá trình tái tạo lưới diễn ra, phần lưới này sẽ không bị chia lại, để tối ưu hóa quá trình tính toán và giữ nguyên được cấu trúc lưới của mô hình.



Hình 5. Minh họa mô hình lưới tính toán.

3.3. Thông số đầu vào

Bảng 1. Thông số đầu vào

TT	Thông số	Giá trị	Đơn vị	
1	Chiều dài thổi nhiên liệu	367,2	mm	
2	Đường kính tiết diện tối hạn của loa phụt	25,6	mm	
3	Đường kính tiết diện ra của loa phụt	56	mm	
4	Mật độ thổi nhiên liệu	1720	kg/m ³	
5	Áp suất bắt đầu quá trình tính toán	0,2	MPa	
6	Nhiệt dung riêng sản phẩm cháy	1802	J/(kg.K)	
7	Nhiệt độ khí thuốc trong buồng đốt	3000	K	
8	Tốc độ cháy	Thuốc đỏ	$u_1 = 4,98778 \cdot 10^{-5} \cdot P^{0,373}$	m/s
		Thuốc xám	$u_2 = 9,3729 \cdot 10^{-5} \cdot P^{0,505}$	m/s
9	Hằng số khí	291	J/(kg.K)	

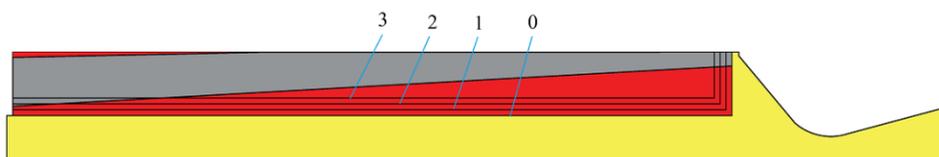
3.4. Tính toán thông số điều kiện biên

Để đơn giản hóa quá trình tính toán, tốc độ cháy sẽ được tính toán theo giá trị trung bình, tương ứng với bề mặt diện tích cháy của từng vùng thuốc có tính chất khác nhau theo công thức tính giá trị trung bình theo các phần tử lưới [5]:

$$\bar{u} = \frac{u_1 \cdot A_1 + u_2 \cdot A_2}{S_T} \text{ (m/s)} \quad (7)$$

trong đó: u_1 (m/s), A_1 (m²) lần lượt là tốc độ cháy và diện tích phần tử lưới tương ứng với bề mặt cháy của lớp thuốc đỏ; u_2 (m/s), A_2 (m²) lần lượt là tốc độ cháy và diện tích phần tử lưới tương ứng với bề mặt cháy của lớp thuốc xám; S_T (m²) - tổng diện tích các phần tử lưới của bề mặt cháy (hay diện tích bề mặt cháy).

Với việc quy đổi diện tích cháy trung bình của toàn bề mặt, quá trình dịch chuyển lưới trở nên đơn giản hơn với việc dịch chuyển 2 bề mặt cháy như hình 6 với tốc độ dịch chuyển bằng với tốc độ cháy trung bình.



Hình 6. Mô hình chia lưới.

Mô hình dịch chuyển biên đầu vào được biểu diễn như hình 6.

Như trên hình vẽ mô tả, ban đầu tại thời điểm đầu tiên, biên đầu vào ở vị trí 0. Sau khi cháy được một khoảng thời gian Δt , với vận tốc cháy \dot{u}_r thì biên đầu vào dịch chuyển tới vị trí 1. Tương tự vậy sau một khoảng thời gian Δt tiếp theo, biên đầu vào dịch chuyển tới vị trí 2.

Do giả thiết quá trình cháy theo các lớp song song với bề mặt cháy nên quá trình dịch chuyển của biên đầu vào được mô tả dưới dạng hệ phương trình cập nhật tọa độ từng điểm nút trên biên đầu vào như sau [1, 5]:

$$\begin{cases} x_{new} = x_{old} + \dot{u}_r \cdot \Delta t \\ y_{new} = y_{old} + \dot{u}_r \cdot \Delta t \end{cases} \quad (8)$$

trong đó: x_{new} , y_{new} - tọa độ của nút mới trên biên đầu vào sau quá trình dịch chuyển; x_{old} , y_{old} - tọa độ nút trên biên đầu vào trước khi dịch chuyển.

Tuy nhiên, trong trường hợp nghiên cứu này, biên đầu vào của mô hình sau mỗi lần dịch chuyển đều bị thu ngắn đi một khoảng độ dài Δl , còn tổng số nút trên biên đầu vào thì vẫn cố định không đổi ngay từ đầu khi chia lưới. Do đó, cần đưa ra các giới hạn và độ dồn nút hợp lý theo các bước thời gian để tránh phát sinh lỗi này trong quá trình tính toán.

Sau đó, công cụ Dynamic Remeshing của Ansys Fluent được sử dụng để cập nhật các phần tử lưới mới vào vùng trống được tạo ra bởi quá trình dịch chuyển.

3.5. Tính toán lực đẩy

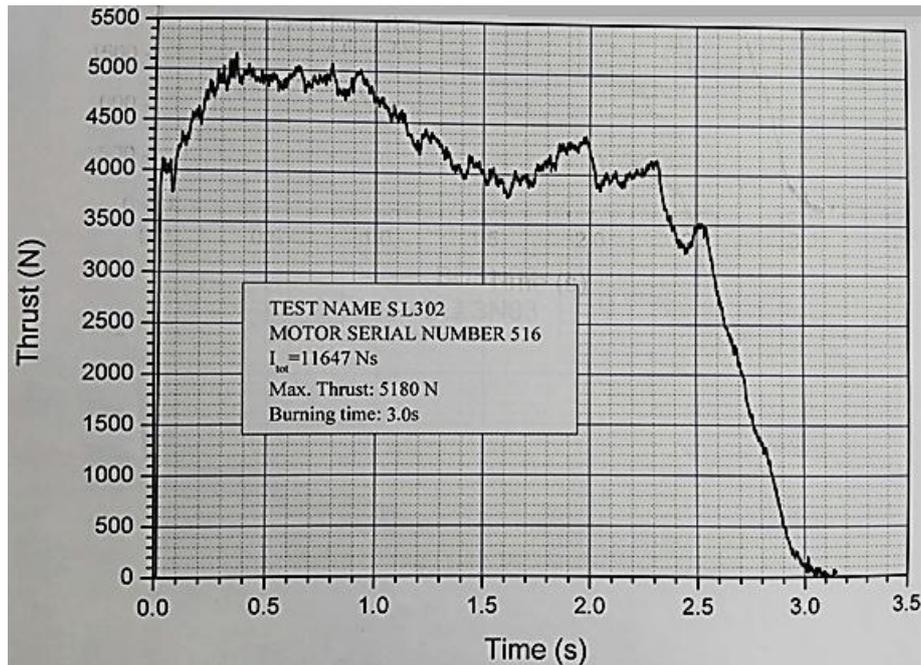
Lực đẩy của động cơ phóng được tính theo công thức [6]:

$$P_{thrust} = \dot{m} \cdot v_a + (p_a - p_{ng}) \cdot F_a \quad (9)$$

trong đó: v_a (m/s) - vận tốc dòng khí tại cửa ra loa phụt; \dot{m} (kg/s) - tốc độ dòng khối tại cửa ra loa phụt; p_a (Pa) - áp suất của dòng khí tại cửa ra loa phụt; p_{ng} (Pa) - áp suất môi trường; F_a (m²) - tiết diện cửa ra loa phụt.

4. Kết quả

Kết quả thử nghiệm thu được thông qua thử nghiệm động cơ nhiên liệu rắn, phương pháp thử nghiệm tĩnh tại mặt đất, trên giá thử phương thẳng đứng. Kết quả lực đẩy thu được thông qua cảm biến Kisler 5 kN, trình bày tại hình 7.



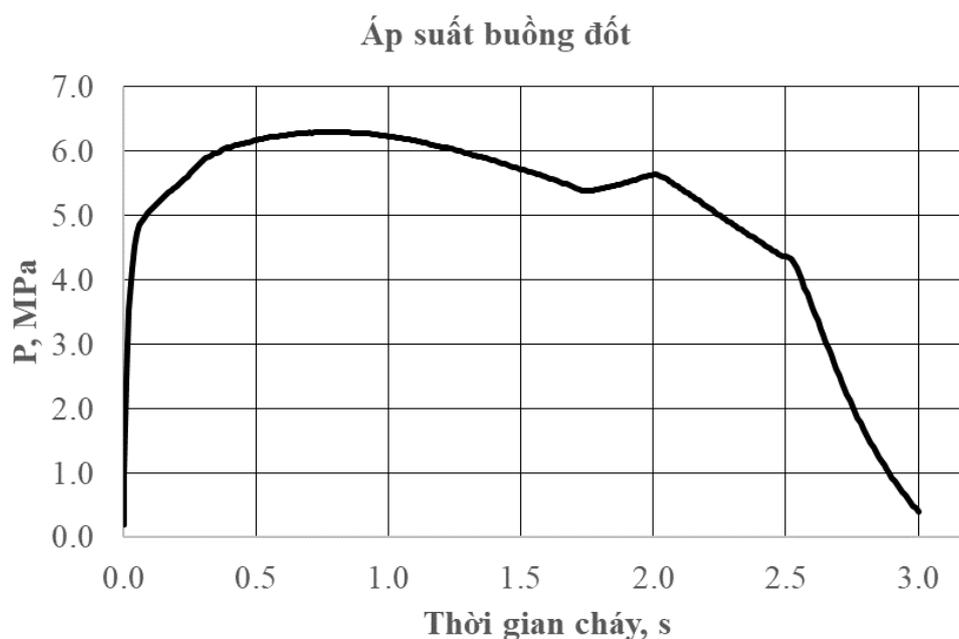
Hình 7. Kết quả thực nghiệm biến đổi lực đẩy theo thời gian cháy.

Kết quả tính toán thu được là sự biến đổi các thông số áp suất buồng đốt, tốc độ cháy trung bình, diện tích bề mặt cháy, vận tốc dòng khí ở cửa ra loa phụt theo từng bước thời gian tính toán, tương ứng với từng khoảng thời gian cháy của thuốc phóng. Sau quá trình xử lý dữ liệu, ta thu được các đồ thị thể hiện quan hệ phụ thuộc của các thông số theo thời gian cháy được mô tả trên các hình 8, 9, 10.

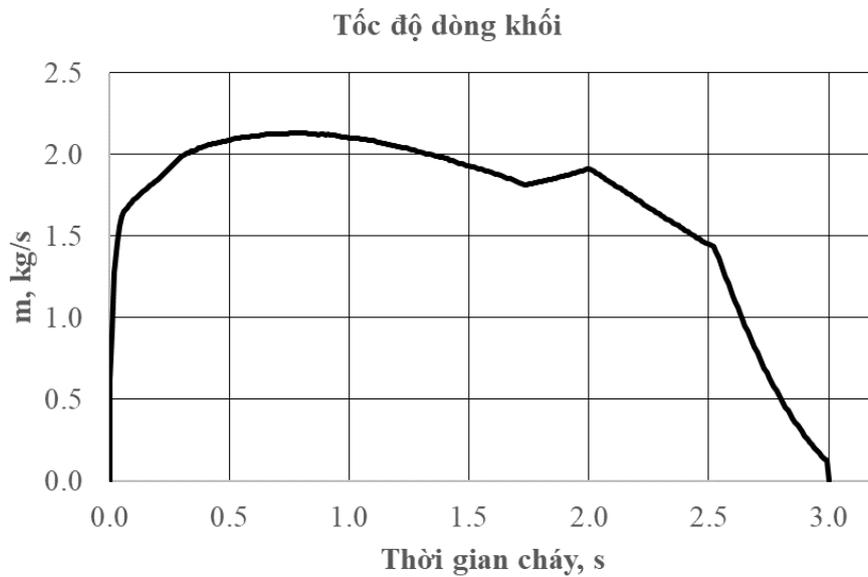
Kết quả tổng hợp như trên bảng 2.

Bảng 2. Kết quả thay đổi các thông số động cơ theo thời gian cháy

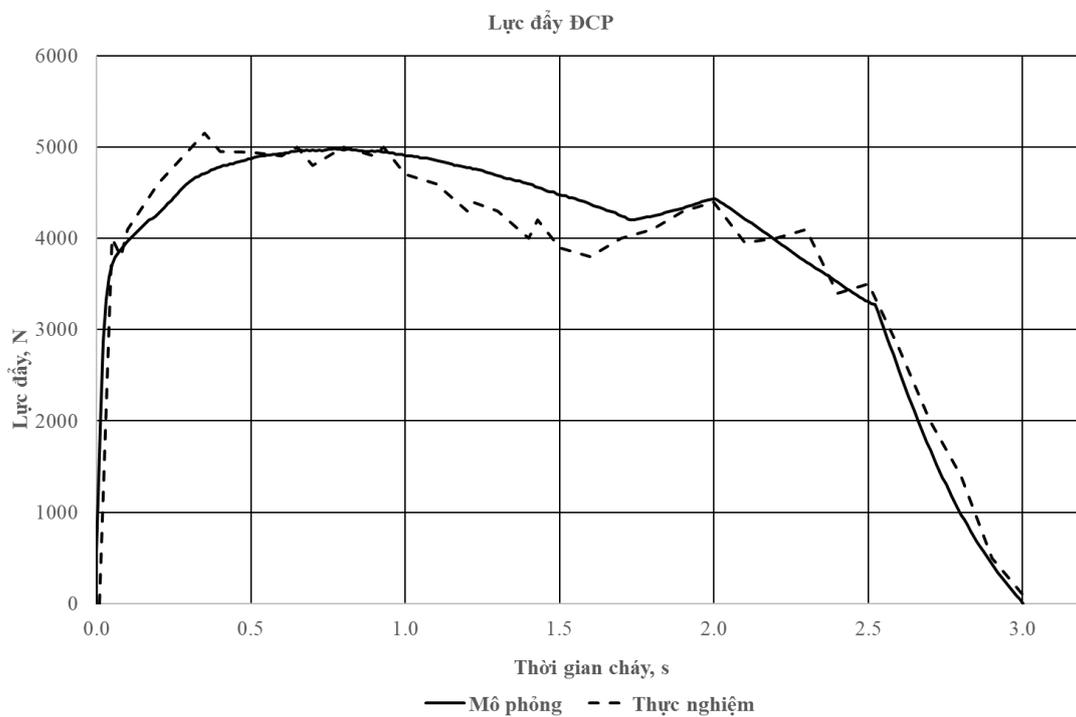
Thời gian cháy t, s	Áp suất buồng đốt, MPa	Tốc độ dòng khối, kg/s	Lực đẩy, KN
Từ 0 đến 0,1	0,2 ÷ 5,08	0 ÷ 1,72	0 ÷ 4
Từ 0,1 đến 1,75	5,08 ÷ 6,303 ÷ 5,38	1,72 ÷ 2,133 ÷ 1,816	4 ÷ 4,98 ÷ 4,2
Từ 1,75 đến 2,5	5,38 ÷ 5,638 ÷ 3,7	1,72 ÷ 1,91 ÷ 1,455	4,2 ÷ 4,43 ÷ 3,32
Từ 2,50 đến 3	3,7 ÷ 0,39	1,455 ÷ 0	3,32 ÷ 0,014



Hình 8. Biến đổi áp suất buồng đốt theo thời gian cháy.

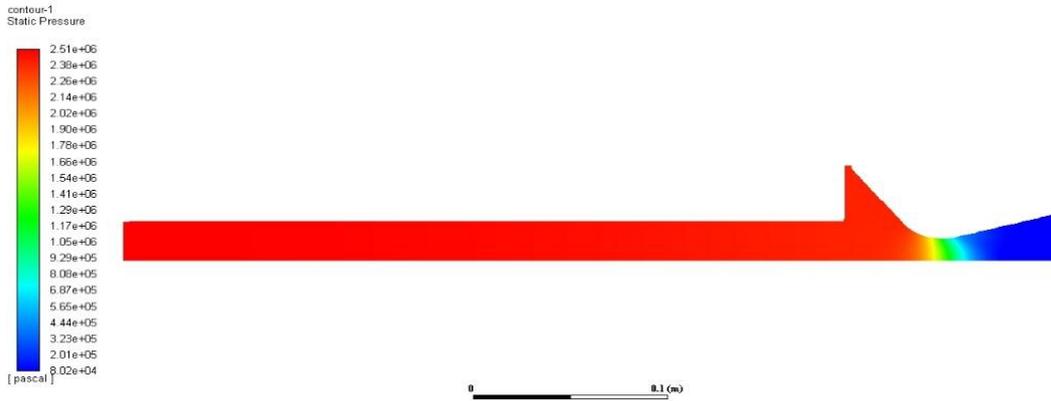


Hình 9. Biến đổi tốc độ dòng khối theo thời gian cháy.

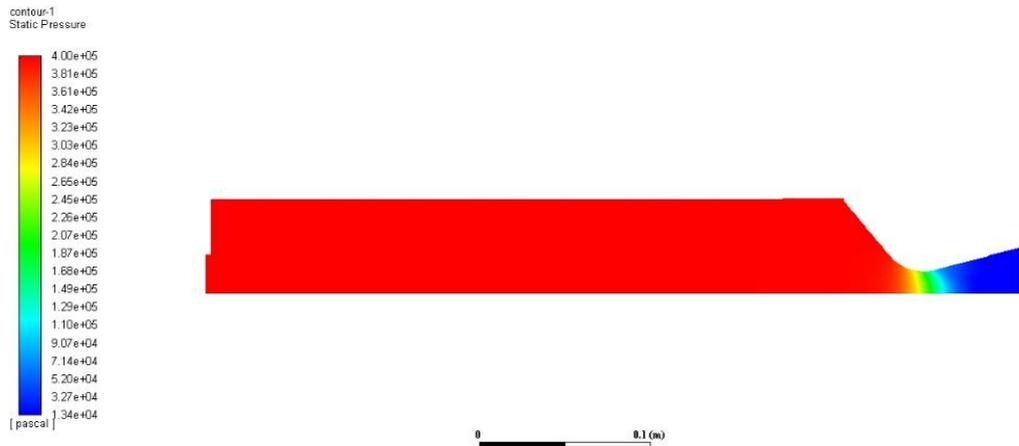


Hình 10. Kết quả mô phỏng và thực nghiệm biến đổi lực đẩy theo thời gian cháy.

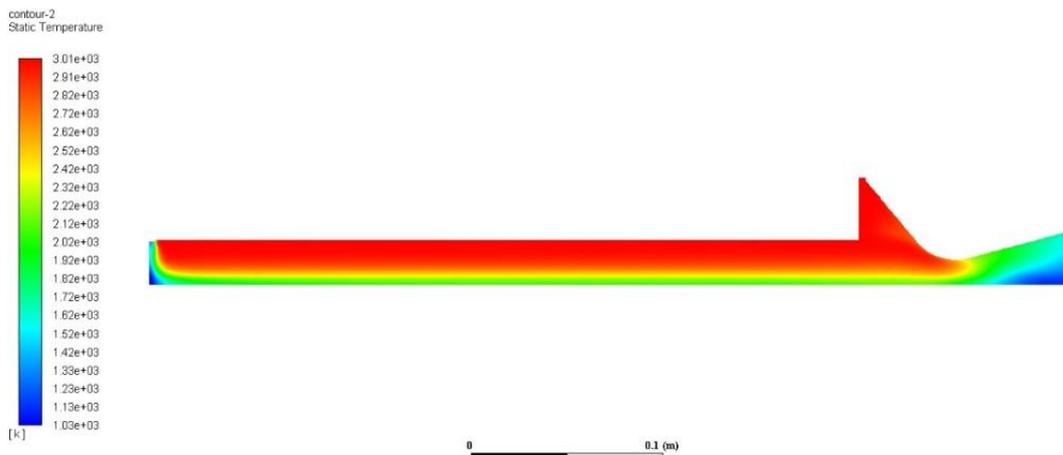
Phân bố trường áp suất, nhiệt độ, vận tốc tại các thời điểm cháy được trình bày tại hình 11.



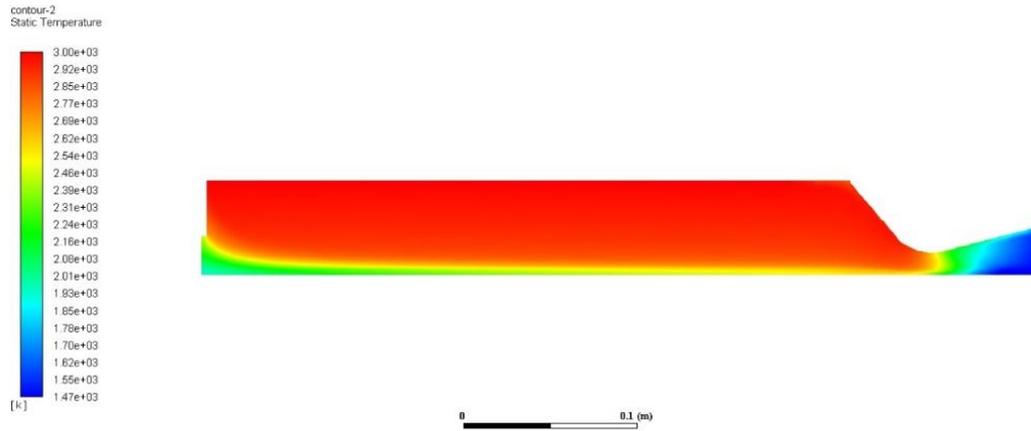
a) Trường phân bố áp suất tại thời điểm $t = 0,1$ s



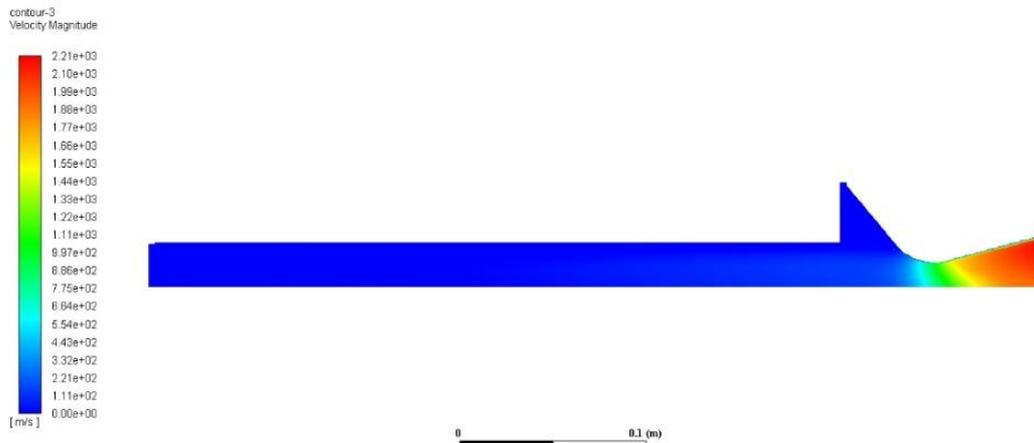
b) Trường phân bố áp suất tại thời điểm $t = 3$ s



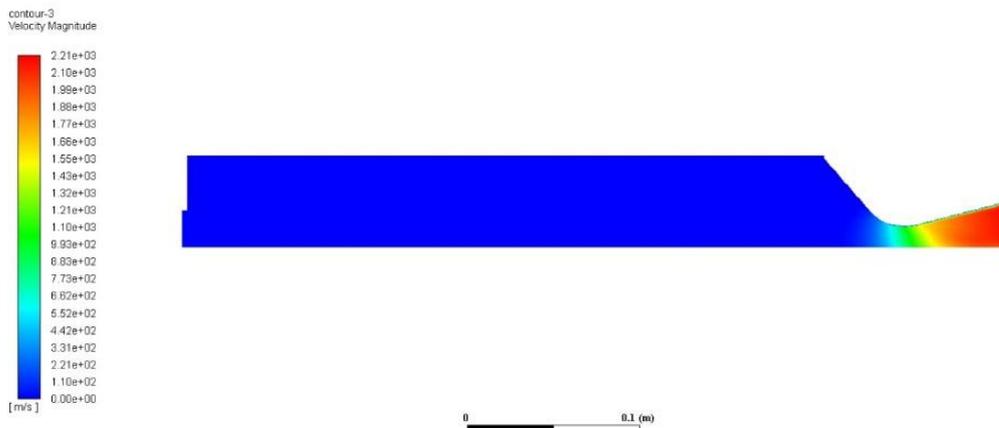
c) Trường phân bố nhiệt độ tại thời điểm $t = 0,1$ s



d) Trường phân bố nhiệt độ tại thời điểm $t = 3$ s



e) Trường phân bố vận tốc tại thời điểm $t = 0,1$ s



f) Trường phân bố vận tốc tại thời điểm $t = 3$ s

Hình 11. Kết quả mô phỏng phân bố các thông số quá trình cháy trong buồng đốt.

5. Thảo luận

Phân tích kết quả tính toán, nhóm thực hiện thu được kết quả biến đổi các thông số trong buồng đốt động cơ theo thời gian cháy, chia làm 4 giai đoạn như trình bày tại bảng 2 và các đồ thị phụ thuộc theo hình 8, 9, 10. Cụ thể như sau:

Giai đoạn tăng áp đột ngột từ 0,2 MPa lên 5,08 MPa trong thời gian ngắn là 0,1 giây. Đây là thời điểm nhiên liệu bắt đầu cháy và tạo khí sản phẩm cháy. Trong giai đoạn này, tốc độ cháy cũng tăng mạnh từ 0 mm/s lên tới 15,546 mm/s. Lực đẩy của động cơ tương ứng tăng từ 0 tới 4 kN.

Giai đoạn tăng áp từ 5,08 MPa lên 6,303 MPa sau đó giảm xuống 5,38 MPa trong thời gian 1,65 giây tiếp theo. Giai đoạn này diễn ra khi nhiên liệu cháy và có sự chuyển tiếp giữa lớp nhiên liệu đỏ sang lớp nhiên liệu xám. Lực đẩy động cơ cũng tương ứng tăng từ 4 kN lên đến 4,98 kN sau đó giảm xuống 4,2 kN.

Giai đoạn thứ ba từ giây 1,75 tới giây 2,5, áp suất buồng đốt tăng từ 5,38 MPa lên tới 5,638 MPa sau đó giảm xuống 3,7 MPa. Lực đẩy động cơ cũng tương ứng tăng từ 4,2 kN lên đến 4,43 kN sau đó giảm xuống 3,32 kN. Quá trình này diễn ra khi nhiên liệu cháy và có sự chuyển tiếp giữa nhiên liệu xám sang nhiên liệu đỏ. Do đó, tạo ra sự tăng giảm của diện tích cháy, tốc độ cháy trung bình và tốc độ dòng khối, dẫn tới thay đổi áp suất và lực đẩy tương ứng.

Giai đoạn từ giây 2,5 tới giây 3,0, áp suất buồng đốt có sự suy giảm từ 3,7 MPa xuống 0,39 MPa. Tương ứng lực đẩy động cơ cũng giảm từ 3,32 kN xuống 0,014 kN. Đây là giai đoạn nhiên liệu cháy hết và sau đó là sự phụt khí tự do.

6. Kết luận

Nghiên cứu này trình bày phương pháp tính toán mô phỏng dòng chảy trong buồng đốt động cơ nhiên liệu rắn kết hợp với quá trình dịch chuyển bề mặt cháy của thoi thuốc. Quá trình tính toán sử dụng phần mềm mô phỏng Ansys Fluent, kết hợp các kỹ thuật tái tạo lưới động (Dynamic Meshing) và các hàm tính toán UDF để tái tạo lại chuyển động dòng chảy trong buồng đốt. Ngoài ra, phương pháp tính toán tốc độ cháy trung bình cho thoi thuốc phóng nhiên liệu rắn hỗn hợp hai lớp được đề xuất để giảm thời gian và các bước tính toán. Phân tích kết quả mô phỏng và kết quả thực nghiệm của động cơ cho thấy đường cong “lực đẩy - thời gian” đạt được bằng tính toán mô phỏng và thực nghiệm có biên dạng tương đồng. Lực đẩy lớn nhất đạt được trong giai đoạn cháy ổn định là 4,98 kN, giá trị tương ứng thực nghiệm là 5,0 kN. Đồng thời, kết quả tính toán mô phỏng thu được cũng đã cho thấy các quy luật biến đổi của áp suất buồng đốt, tốc độ cháy, diện tích cháy theo thời gian cháy của động cơ, là cơ sở cho việc khảo sát tính toán thiết kế động cơ nhiên liệu rắn thuốc phóng hỗn hợp.

Tài liệu tham khảo

- [1] J. Terzic, B. Zecevic, S. Serdarevic-Kadic, A. Catovic, “Numerical simulation of internal ballistics parameters of solid propellant rocket motors”, ISBN 978-80-7395-480-2, University of Pardubice, *15th Seminar “New Trends in Research of Energetic Materials”, Part II*, pp. 881-892, 2012.
- [2] J. C. Traineau, P. Hervat, and P. Kuentzmann. “Cold-Flow simulation of a two-dimensional nozzleless solid rocket motor”, *AIAA Paper*, pp. 86-1447, 1986. DOI: 10.2514/6.1986-1447
- [3] Q. Li, G. qiang He, P. jin Liu, J. Li, “Coupled Simulation of Fluid Flow and Propellant Burning Surface Regression in a Solid Rocket Motor”, *Computers and Fluids*, Vol. 93, pp. 146-152, 2014. DOI: 10.1016/j.compfluid.2014.01.028
- [4] M. O. Havlucu and K. Kirkkopru “Numerical Simulation of Flow in a Solid Rocket Motor: Combustion Coupled with Regressive Boundary”, *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*, Vol. 3(1), pp. 3790-3798, 2016.
- [5] ANSYS Fluent (Version 19.0) [Computer Software], Canonsburg, PA, 2018.
- [6] Lê Song Tùng, Nguyễn Công Hòe, *Cơ sở tính toán và thiết kế động cơ tên lửa nhiên liệu rắn*, Nxb Quân đội nhân dân, 2015.
- [7] P. Kuentzmann, Introduction to Solid Rocket Propulsion, Internal Aerodynamics in Solid Rocket Propulsion, RTO Educational Notes, EN-023, 2004.

CALCULATION OF FLOW SIMULATION IN COMBUSTION CHAMBER OF SOLID FUEL MOTOR WITH TWO-LAYER MIXED PROPELLANT

Abstract: *This article presents a method of calculating the simulation of flow in solid fuel combustion chamber, which applied to the two-layer mixed solid propellant motor, using simulation software Ansys Fluent. The regression of burning surface of the propellant is simulated using dynamic meshing tool combined with user-defined functions (UDF), written in C++ programming language. The author proposes a method to calculate the average fire rate for mixed solid fuel, thereby simplifying the simulation process and still get results corresponding to the experimental results. The calculation thrust-time curve has a profile similar to the experimental results. The maximum thrust achieved during the steady burning phase is 4.98 kN, the corresponding experimental value is 5.0 kN.*

Keywords: Solid propellant; regressive propellant combustion; dynamic meshing; CFD; Ansys Fluent; UDF; thrust.

Nhận bài: 29/12/2023; Hoàn thiện sau phản biện: 09/03/2024; Chấp nhận đăng: 05/04/2024

