

NGHIÊN CỨU MÔ PHÒNG LUỒNG PHỤT DÒNG SẢN PHẨM CHÁY SAU ĐỘNG CƠ TÊN LỬA NHIÊN LIỆU RẮN

Doãn Quý Hiếu*, Lê Song Tùng, Hoàng Thế Dũng, Trần Mạnh Tuấn

Tóm tắt: Bài báo trình bày một phương pháp xây dựng mô hình tính toán và mô phỏng luồng phụt dòng sản phẩm cháy sau động cơ tên lửa nhiên liệu rắn bằng phần mềm Ansys CFX. Phương pháp mô phỏng đơn giản, xác định được sự phân bố nhiệt độ, vận tốc dòng khí và kích thước luồng phụt. Kết quả nghiên cứu được sử dụng làm cơ sở tính toán thiết kế giá, bệ phóng và đặt ra các chỉ tiêu cho động cơ.

Từ khóa: Mô phỏng, Luồng phụt, Động cơ, Tên lửa, Nhiên liệu rắn.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Việc nghiên cứu các thông số luồng phụt dòng chảy sản phẩm cháy (SPC) sau động cơ tên lửa nhiên liệu rắn (ĐTR) đang được quan tâm những năm gần đây. Tính toán các chế độ phụt khí từ loa phụt, kích thước, nhiệt độ tại nhân dòng của luồng phụt, giúp hoàn thiện tốt hơn thiết kế động cơ, bệ phóng của hệ thống vũ khí. Tuy nhiên, hiện nay chưa có nhiều nghiên cứu, tài liệu trong nước về vấn đề này. Các kết quả nghiên cứu lý thuyết trước đây thường sử dụng các công thức có nhiều hệ số thực nghiệm và phương pháp tính phức tạp. Việc đo các thông số nhiệt độ, vận tốc tại nhân dòng luồng phụt dòng SPC khó khăn. Hình ảnh, kích thước của luồng phụt có thể đo được bằng camera chuyên dụng đắt tiền, tốn kém về kinh tế và kết quả không chính xác. Từ đó, đặt ra yêu cầu phải tìm kiếm phương pháp riêng để mô phỏng, tính toán các thông số luồng phụt dòng SPC. Bài báo trình bày một phương pháp mô phỏng luồng phụt dòng SPC bằng phần mềm Ansys CFX, qua đó xác định được các thông số dòng chảy, hình ảnh, kích thước luồng phụt. Phương pháp mô phỏng, tính toán đơn giản, nhanh, giúp tiết kiệm thời gian, kinh tế. Kết quả thu được, có thể kiểm chứng bởi thực nghiệm, làm cơ sở để nghiên cứu thiết kế giá, bệ phóng trong hệ thống vũ khí.

2. CHUYỂN ĐỘNG CỦA DÒNG SPC TRONG VÀ SAU LOA PHỤT

2.1. Các chế độ làm việc của loa phụt

Loa phụt rất quan trọng trong động cơ tên lửa nhiên liệu rắn. Nó có vai trò tạo ra lực đẩy thông qua quá trình dẫn nổ, tăng tốc dòng sản phẩm cháy và là nơi diễn ra quá trình biến đổi nhiệt năng cháy nhiên liệu thành động năng dòng. Dòng SPC được phụt từ buồng đốt vào loa phụt và ra môi trường xung quanh với vận tốc và nhiệt độ cao, tạo nên lực đẩy cho động cơ. Giá trị lực đẩy của động cơ được tính bởi công thức [1]:

$$P = \dot{m}\omega_a + (p_a - p_n)F_a, \quad (1)$$

trong đó, \dot{m} là lưu lượng phụt khí; ω_a , F_a là vận tốc dòng khí, diện tích tiết diện tại cửa ra loa phụt; p_n , p_a là áp suất môi trường và áp suất tại tiết diện cửa ra của loa phụt.

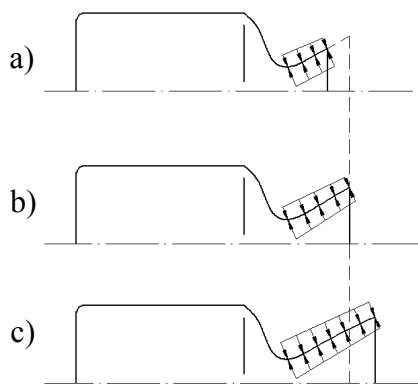
Dòng chảy SPC được tăng tốc tới giá trị vượt âm chảy qua loa phụt môi trường ngoài có 3 chế độ làm việc [2]:

- Chế độ giãn nở không hoàn toàn: áp suất tại cửa ra loa phụt lớn hơn áp suất môi trường $p_a > p_n$, trường hợp này, loa phụt ngắn hơn so với loa phụt làm việc ở chế độ tính toán (hình 1.a). Vận tốc tại cửa ra loa phụt bé hơn, do đó giá trị lực đẩy nhỏ hơn so với chế độ tính toán.

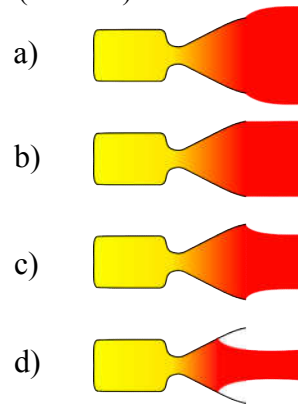
- Chế độ tính toán: áp suất tại cửa ra loa phụt bằng áp suất môi trường $p_a = p_n$, về mặt lý thuyết, lực đẩy P trong trường hợp này đạt giá trị lớn nhất (hình 1.b).

- Chế độ giãn nở hoàn toàn: áp suất tại cửa ra loa phụt nhỏ hơn áp suất môi trường $p_a < p_n$, trường hợp này làm giảm giá trị lực đẩy động cơ. Khi hiệu $p_n - p_a$ lớn, sẽ gây ra hiện tượng tách các lớp khí của dòng ở lớp biên xung quanh thành loa phụt và sóng va đập

sẽ xuất hiện sâu trong phần vượt âm loa phụt gây nên tổn thất năng lượng của dòng, làm giảm tốc độ chuyển động dòng khí tại tiết diện cửa ra (hình 1.c).



Hình 1. Sơ đồ phân tích các chế độ làm việc của loa phụt.



Hình 2. Hình ảnh luồng phụt khí theo các chế độ làm việc của loa phụt.

Các chế độ phụt khí của loa phụt được xác định bởi giá trị độ lệch áp suất:

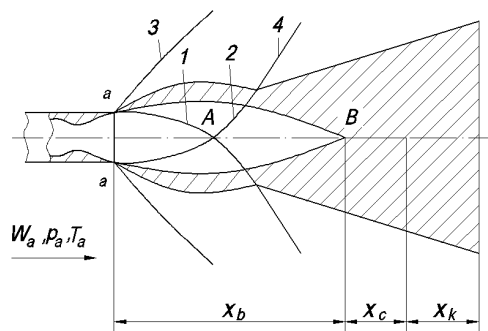
$$n = \frac{p_a}{p_n}, \quad (2)$$

Tùy theo các chế độ phụt khí, luồng phụt sẽ có các hình dạng khác nhau [2]:

- Trong chế độ giãn nở không hoàn toàn, luồng phụt khí loe rộng, hiệu quả lực đẩy không cao (hình 2.a).
- Ở chế độ tính toán: luồng phụt khí bám sát thành loa phụt, giá trị lực đẩy lớn nhất theo lý thuyết (hình 2.b).
- Trong chế độ giãn nở hoàn toàn, luồng phụt khí bị thất lại (hình 2.c,d), luồng phụt dòng SPC không bám sát thành loa phụt.

2.2. Chuyển động của dòng SPC trong và sau loa phụt

Chuyển động của dòng SPC trong loa phụt động cơ tên lửa nhiên liệu rắn đã được nghiên cứu trong tài liệu [5]. Sau đây trình bày đặc điểm dòng SPC sau loa phụt và mô hình tính toán nó. Thông thường, luồng phụt dòng khí SPC sau loa phụt ĐTR ở chế độ tính toán có cấu trúc như trên hình 3 [2].



Hình 3. Sơ đồ luồng phụt khí SPC sau loa phụt ĐTR.

- a-a-* tiết diện cửa ra của loa phụt; W_a, p_a, T_a - vận tốc, áp suất, nhiệt độ dòng SPC tại cửa ra;
- 1, 2-* sóng xung kích trong luồng phụt; *A, B-* vị trí và đập của các sóng xung kích;
- 3, 4-* sóng xung kích ra môi trường xung quanh;
- x_b-* phần cơ bản của luồng phụt; *x_c-* phần chuyển tiếp của luồng phụt;
- x_k-* phần kết thúc của luồng phụt;

Trong đó các đường 1,2,3,4 là các sóng xung kích trong và ngoài luồng phụt. Đường sóng xung kích 1 có xu hướng giao nhau tại trục dòng tại điểm A. Vận tốc dòng khí được tăng tốc đến tốc độ vượt âm qua loa phụt, sau đó dần giảm dần theo chiều dài x_b trên trục dòng, giảm đến vận tốc âm thanh 1 M trong khoảng x_c , sau đó tiếp tục giảm sâu trong khoảng x_k . Đến tiết diện cách cửa ra loa phụt $x_b + x_c + x_k$, áp suất dòng SPC bằng với áp suất môi trường. Tại vị trí này dòng chảy hầu như không còn tác động cơ học nào đáng kể, và dần tiêu tán vào môi trường xung quanh. x_b là chiều dài phần cơ bản của luồng phụt, x_c là phần chuyển tiếp, x_k là phần kết thúc luồng phụt, $x_b + x_c + x_k$ là chiều dài giới hạn của luồng phụt [3].

Mô hình tính toán các thông số dòng SPC sau động cơ tên lửa nhiên liệu rắn sử dụng hệ phương trình vi phân chuyển động của dòng khí:

$$\begin{cases} \frac{d}{dx}(\rho\omega F) = 0, & \text{(Phương trình liên tục)} \\ \frac{d}{dx}[(\rho\omega^2 + p)F] = p \frac{dF}{dx}, & \text{(Phương trình bảo toàn động lượng)} \\ \frac{d}{dx}\left[\rho\omega F\left(i + \frac{\omega^2}{2}\right)\right] = 0, & \text{(Phương trình bảo toàn năng lượng)} \\ p = \rho RT, & \text{(Phương trình trạng thái)} \end{cases} \quad (3)$$

trong đó: ρ , ω , T , p – mật độ, vận tốc, nhiệt độ, áp suất của dòng SPC; x – tọa độ tiết diện dọc theo trục L của loa phụt; F - diện tích tiết diện ngang loa phụt; i – entalpi của khí.

Dòng SPC sau động cơ tên lửa nhiên liệu rắn có nhiệt độ và áp suất giảm nhiều so với trong buồng đốt và trong loa phụt. Áp suất giảm hầu như không còn đáng kể. Vận tốc dòng chảy tăng đến tốc độ vượt âm tại phần vượt âm của loa phụt, sau đó phụt ra môi trường xung quanh. Vận tốc dòng SPC cao tại nhân luồng phụt sau đó giảm dần theo chiều dài luồng phụt.

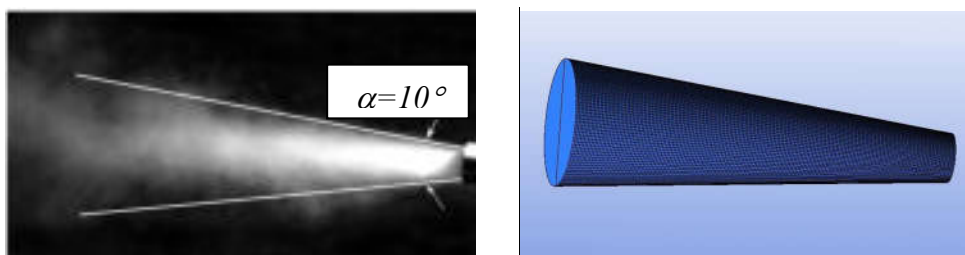
3. MÔ PHỎNG LUỒNG PHỤT DÒNG SPC BẰNG ANSYS CFX

Sau đây trình bày phương pháp mô phỏng, tính toán gần đúng luồng phụt dòng SPC sau ĐTR bằng phần mềm ANSYS CFX. Nội dung gồm các bước chính sau:

- Xây dựng mô hình mô phỏng, tính toán bằng phần mềm Design Modeler;
- Chia lưới mô hình bằng phần mềm ICFM CFD với chất lượng cao, đảm bảo độ mịn cần thiết để thể hiện được luồng phụt dòng chảy SPC rõ nét nhất;
- Thiết lập các điều kiện biên;
- Đặt điều kiện hội tụ, giải bài toán;
- Đánh giá kết quả tính toán, kết luận.

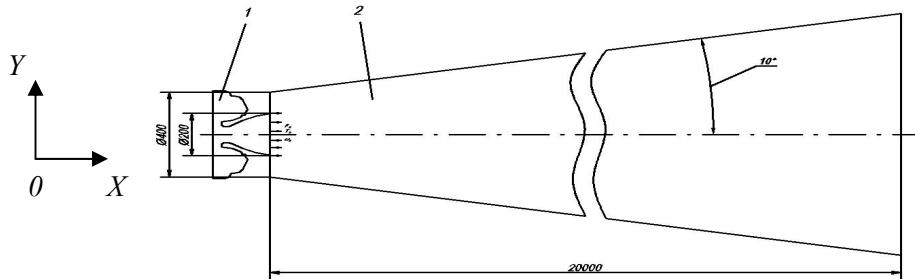
3.1. Mô hình hình học

Bài báo chọn loa phụt động cơ phóng 78DT trên tên lửa Kh35-E để mô phỏng, tính toán luồng phụt dòng SPC sau động cơ. Thời điểm lựa chọn để mô phỏng là thời điểm động cơ hoạt động ổn định, áp suất trong buồng đốt động cơ đạt khoảng 11,5 Mpa.



Hình 4. Mô hình không gian luồng phụt khí SPC sau ĐTR.

Có thể lựa chọn mô hình không gian luồng phụt SPC hình trụ hoặc hình hộp chữ nhật, tuy nhiên mô hình hình côn là ưu điểm nhất vì dễ dàng chia lưới để thể hiện rõ nhân luồng phụt hơn, giảm kích thước lưới, thời gian tính toán, mô phỏng. Do đó bài báo lựa chọn mô hình tính toán hình côn với góc nghiêng $\alpha=10^\circ$ (nửa góc mở phần vượt âm loa phụt động cơ phóng 78DT tại tiết diện cửa ra là $10^\circ 14'$) (hình 5). Cửa ra loa phụt động cơ phóng 78DT có đường kính 200 mm, do đó mô hình tính toán được xây dựng bằng phần mềm đồ họa DesignModeler với các kích thước thực tế của như sau:



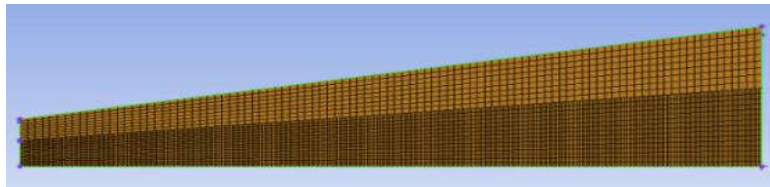
Hình 5. Kích thước mặt cắt dọc mô hình không gian luồng phụt SPC.

1. Phần không gian trong loa phụt; 2. Phần không gian luồng phụt SPC.

3.2. Chia lưới mô hình mô phỏng, tính toán

Sau khi xây dựng xong mô hình hình học. Sử dụng công cụ chia lưới ICEM CFD trong gói ANSYS WORKBENCH để chia lưới cho mô hình.

Chia lưới là một trong những phần quan trọng nhất của bài toán mô phỏng. Có quá nhiều phần tử lưới khiến việc giải bài toán trở nên lâu và nếu lưới quá thưa thì cũng dẫn đến các kết quả thiếu chính xác. Sơ đồ cấu trúc và vị trí chia lưới được mô tả trên hình 6. Phần nhân mô hình sẽ là vị trí luồng phụt động SPC nên được chia lưới mịn hơn, với số lượng các nút, mắt lưới nhiều hơn. Mô hình được chia lưới gồm có 145368 phần tử.



Hình 6. Vị trí chia lưới mô hình không gian luồng phụt khí SPC.

3.3. Thiết lập các điều kiện biên

Luồng phụt động SPC sau loa phụt thực tế có thành phần các chất rất phức tạp. Trong khuôn khổ bài báo, giả thiết dòng khí luồng phụt SPC là khí lý tưởng.

Điều kiện biên thiết lập cho bài toán:

Bảng 1. Thiết lập điều kiện biên.

	Tên biên	Kiểu biên
Cửa vào mô hình	Inlet	Pressure Temperature inlet
Cửa ra mô hình	Outlet	Pressure Outlet
Thành mô hình	Opening	Opening
Miền tính toán	FLUID	Air Ideal gas

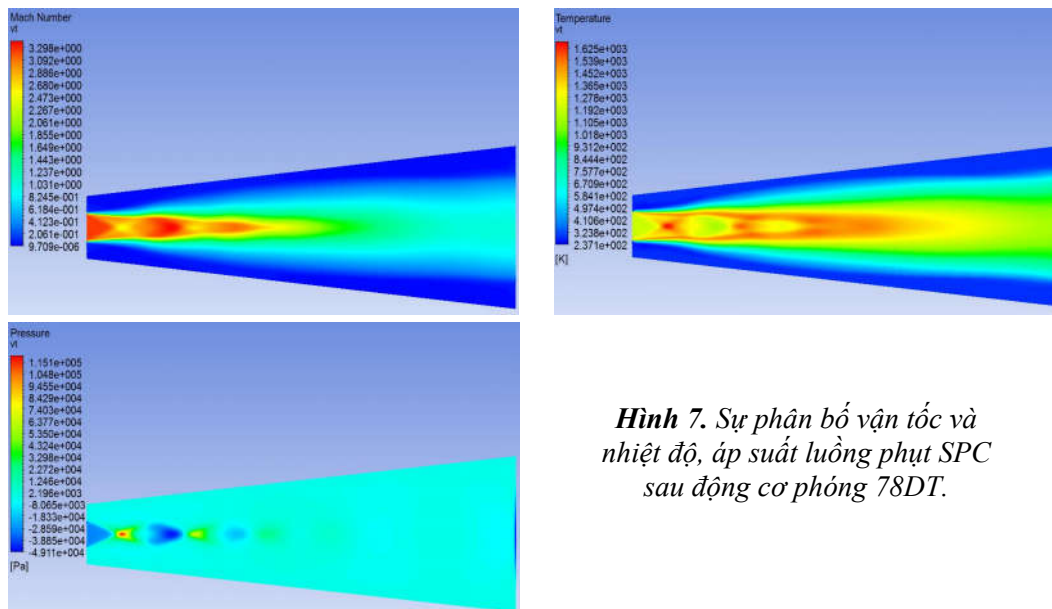
Các thông số điều kiện biên được lấy từ kết quả tính toán mô phỏng dòng sản phẩm cháy trong không gian loa phụt [5]:

- Áp suất cửa vào mô hình (cửa ra loa phụt): $p_a = 0,17 \text{ Mpa}$;
- Nhiệt độ cửa vào mô hình: $T_a = 1300 \text{ K}$;
- Vận tốc dòng cửa vào mô hình: $W_a = 2400 \text{ m/s}$;

- Áp suất môi trường (cửa ra mô hình) : $p_m = 0,1 \text{ Mpa}$.

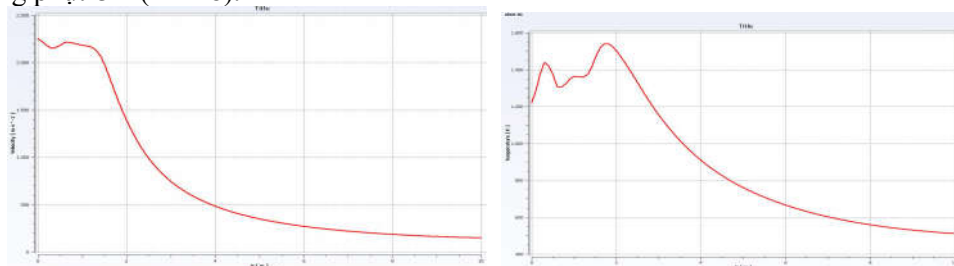
3.4. Kết quả mô phỏng

Trên cơ sở lựa chọn các điều kiện biên như trên, chọn các điều kiện hội tụ: max iterations: 150; residual type: RMS; residual target: $1e-6$. Sau khi giải ta thu được kết quả mô phỏng. Kết quả mô phỏng được trình bày trên hình 7.



Hình 7. Sự phân bố vận tốc và nhiệt độ, áp suất luồng phụt SPC sau động cơ phóng 78DT.

Kết quả mô phỏng thể hiện được các lớp dòng chảy và lớp biên của luồng phụt SPC. Vận tốc dòng chảy SPC đạt $3,2 \text{ M}$ tại cửa ra loa phụt, sau đó giảm dần dọc theo trục luồng phụt. Tại các vị trí sóng va đập, vận tốc dòng chảy giảm dần đến áp suất, nhiệt độ tăng. Hình ảnh các sóng va đập được lặp lại, sau đó tiêu tán dần do sự pha trộn với không khí trong môi trường xung quanh (hình 6). Nhiệt độ tại nhân luồng phụt đạt cao nhất khoảng 1500 K điều này thể hiện trên đồ thị nhiệt độ luồng phụt SPC tại nhân dòng dọc theo trục luồng phụt OX (hình 8).



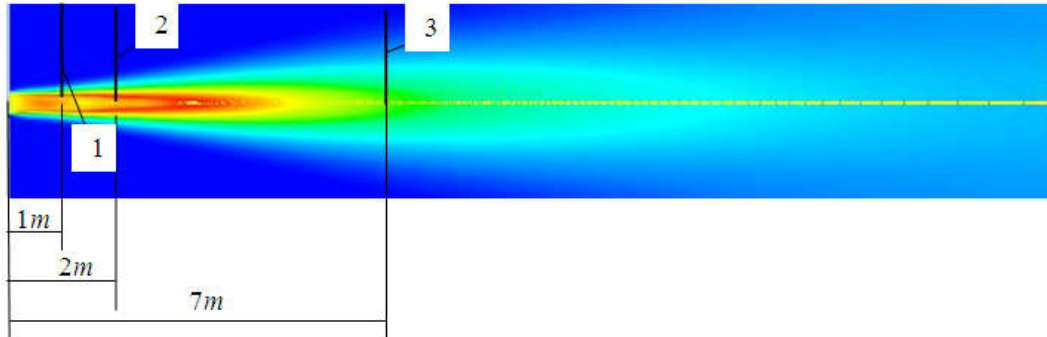
Hình 8. Đồ thị vận tốc và nhiệt độ luồng phụt khí SPC tại trục nhân dòng.

Các thông số luồng phụt dòng SPC sau loa phụt động cơ phóng 78DT được trình bày trong bảng 2:

Bảng 2. Kết quả tính toán các thông số luồng phụt dòng SPC.

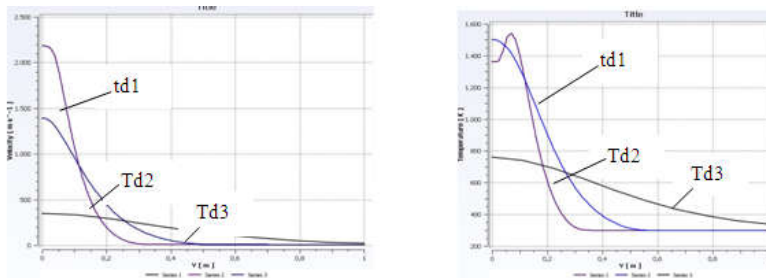
Thông số	Giá trị
Chiều dài phần cơ bản luồng phụt, m	7
Chiều dài giới hạn luồng phụt, m	15,6
Bán kính lớp biên luồng phụt, m	1
Nhiệt độ cao nhất tại nhân dòng luồng phụt, K	1500

Khảo sát trên 3 tiết diện ngang 1, 2, 3 có khoảng cách từ cửa ra loa phụt lần lượt là 1m, 2m, 7m như sau:



Hình 9. Vị trí các tiết diện ngang khảo sát.

Đồ thị các thông số vận tốc, nhiệt độ dòng khí trên các tiết diện ngang khảo sát từ nhân dòng ra lớp biên (trục OY) được thể hiện trên hình 10.



Hình 10. Đồ thị vận tốc, nhiệt độ dòng khí trên các tiết diện ngang khảo sát.

Vận tốc, nhiệt độ dòng SPC của luồng phụt trên các tiết diện ngang giảm dần từ nhân dòng ra lớp biên. Tại tiết diện 1, dòng khí có vận tốc khoảng 2200 m/s, nhiệt độ 1300 K tại nhân dòng, ra đến lớp biên chỉ còn khoảng 10 m/s, 300 K. Tới tiết diện 2, dòng khí có vận tốc khoảng 1400 m/s, nhiệt độ 1500 K tại nhân dòng, ra đến lớp biên chỉ còn khoảng 10 m/s, 300 K. Tại tiết diện này, diễn ra sự va đập của sóng xung kích dẫn đến vận tốc giảm, nhiệt độ tăng (hình 8). Đến tiết diện 7, vận tốc giảm sâu còn khoảng 350 m/s, nhiệt độ 730 K tại nhân dòng và 10 m/s, 300 K tại lớp biên. Như vậy vận tốc dòng khí gần bằng với vận tốc âm thanh 1 M, và đây chính là tiết diện đặc trưng cho chiều dài phần cơ bản của luồng phụt SPC (tiết diện tại điểm B, hình 3). Tại tiết diện có bán kính lớp biên 1m, các thông số vận tốc, nhiệt độ dòng SPC là 10 m/s, 300 K, hầu như không còn tác dụng cơ học với môi trường. Khoảng cách từ tiết diện này đến cửa ra loa phụt là chiều dài giới hạn luồng phụt 15,6 m.

Kết quả mô phỏng cần được kiểm tra độ chính xác bằng thử nghiệm do các số liệu trong các tài liệu nước ngoài được giữ bí mật, chưa được công bố. Dựa trên kết quả thu được, có thể nghiên cứu đánh giá ảnh hưởng của luồng phụt sau động cơ 78DT lên ống phóng 3C-34E và bong tàu.

4. KẾT LUẬN

Bằng phương pháp mô phỏng sử dụng phần mềm Ansys CFX, bài báo đã đề xuất phương pháp xác định các thông số luồng phụt SPC sau động cơ tên lửa nhiên liệu rắn. Trong đó xác định được chiều dài; bán kính lớp biên luồng phụt, nhiệt độ, vận tốc, áp suất

của từng tiết diện trong dòng SPC. Phương pháp mô phỏng cho kết quả nhanh có thể dùng trong thiết kế động cơ tên lửa nhiên liệu rắn và làm cơ sở để nghiên cứu, thiết kế giá, bộ phóng cho các hệ thống tên lửa.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1]. Абугов Д.И., Бобылев В.М., “Теория и расчет РДТТ”. М., Машиностроение, 1987. 272 стр.
- [2]. Абрамович Г.Н., “Прикладная Газовая Динамика”. М., Наука, 1991, Т.1, 601 стр.
- [3]. Абрамович Г.Н., “Теория Турбулентных струй”. М., Эколит, 2011, 720 стр.
- [4]. Алемасов В.Е., Дрегалин А.Ф., Тишин А.П., “Теория ракетных двигателей”. М., Машиностроение, 1980. 533 стр.
- [5]. Đoàn Quý Hiếu, đề tài: “Nghiên cứu dòng sản phẩm cháy trong không gian loa phụt động cơ tên lửa nhiên liệu rắn”, Viện Tên lửa, 2014-2015.

ABSTRACT

STUDY ON SIMULATING FLOW OF FIRED PRODUCTS FROM SOLID-FUEL ROCKET ENGINE

This paper presents a method of modeling, calculating and simulating the flow of by-products from solid-fuel rocket engine by using Ansys CFX software. This simple simulation method is employed to determine the range of temperature, stream velocity and diameter of ejecting flow. The obtained results can be applied as theoretical basis for calculating the base, launching stage and parameters for the engine.

Keywords: Simulation, Flow , Engine, Rocket, Solid fuel.

*Nhận bài ngày 15 tháng 7 năm 2015
Hoàn thiện ngày 15 tháng 8 năm 2015
Chấp nhận đăng ngày 05 tháng 9 năm 2015*

Địa chỉ: Viện Tên lửa- Viện Khoa học và Công nghệ Quân sự, *Email: dqhieu57@gmail.com.