

**NGHIÊN CỨU MÔ PHÒNG SỐ TRƯỜNG ÁP SUẤT, NHIỆT ĐỘ,  
THÀNH PHẦN PHA VÀ TỐC ĐỘ PHẢN ỨNG HOÁ HỌC  
CỦA DÒNG PHUN RỐI XOÁY HAI PHA KHÔNG ĐẲNG NHIỆT  
TRONG BUỒNG ĐỐT**

STUDY THE NUMERICAL SIMULATION OF PRESSURE, TEMPERATURE, PHASE  
COMPONENTS AND CHEMICAL REACTION RATE PROFILE OF  
TWO-PHASE NON-ISOTHERMAL SWIRLING TURBULENT FLOWS IN  
COMBUSTION CHAMBERS

**Nguyễn Thanh Hào**

Khoa Cơ khí Công nghệ, Trường Đại học Nông lâm TP. Hồ Chí Minh

**TÓM TẮT**

*Bài báo giới thiệu ứng dụng phương pháp sai phân hữu hạn giải hệ phương trình dòng phun rối xoáy hai pha không đẳng nhiệt trong buồng đốt, để mô phỏng trường áp suất, nhiệt độ, thành phần các pha, tốc độ phản ứng hoá học, làm cơ sở để xây dựng mối quan hệ giữa các thành phần này. Từ đó, xác định mối quan hệ giữa các thông số của quá trình cháy, giúp cháy hoàn toàn; trong khi đó, nếu sử dụng phương pháp nghiên cứu thực nghiệm thì công việc đòi hỏi tiêu tốn rất nhiều thời gian và chi phí.*

**Từ khóa:** Trường áp suất; Trường nhiệt độ; Thành phần pha; Tốc độ phản ứng hóa học; Mô phỏng số.

**ABSTRACT**

*The paper presented an application of the finite difference method to solve two-phase non-isothermal swirling turbulent flows in combustion chamber to simulate pressure, temperature, phase components and chemical reaction profiles. So that, the relation between them will be determined for helping lean combustion, while it will take much times and costs if we use an experimental data for design combustion chamber.*

**Keywords:** Pressure profile; Temperature profile; Phase components; Chemical reaction rate; Numerical simulation.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Quá trình cháy dòng phun rối xoáy hai pha không đẳng nhiệt là quá trình phản ứng hoá học mãnh liệt, toả nhiệt, phát quang với tốc độ cao và đồng thời còn kéo theo một loạt các quá trình vật lý khác. Do vậy, quá trình cháy sẽ bao gồm các quá trình lý hoá, như: Quá trình sinh nhiệt của các phản ứng hoá học, quá trình chuyển động, quá trình truyền nhiệt và truyền khối giữa các dòng vật chất, quá trình chuyển hoá năng lượng. Mục tiêu của bài báo là xác định mối quan hệ giữa thành phần các pha, nhiệt độ, áp suất với tốc độ phản ứng hoá học

thông qua việc giải hệ phương trình dòng phun rối xoáy hai pha không đẳng nhiệt trong buồng đốt. Trước đây, các mối quan hệ này thường chỉ thực hiện được bằng thực nghiệm.

2. MÔ HÌNH TOÁN

Phương trình tổng quát có dạng [1]:

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial r} = J \tag{1}$$

Trong đó, các biến thông lượng của phương trình (1) được xác định theo bảng 1 [2], [3].

Bảng 1. Xác lập quan hệ giữa thông lượng vector theo các biến cần tìm:

STT	$\phi$	G	J
1	$ru_g$	$rv_p$	0
2	$ru_p$	$rv_g$	0
3	$rCu_p$	$rCv_p - \frac{rv_{tp}}{Sc} \left( \frac{\partial C}{\partial r} \right)$	0
4	$ru_g^2 + p$	$ru_g v_g - rv_{tg} \left( \frac{\partial u_g}{\partial r} \right)$	$-\frac{rF_x}{\rho g}$
5	$ru_g w_g$	$rv_g w_g - rv_{tg} \left( \frac{\partial w_g}{\partial r} \right)$	$-\frac{rF_\theta}{\rho g}$
6	$ru_g v_g$	$rv_g^2 + p - rv_{tg} \left( \frac{\partial v_g}{\partial r} \right)$	$w_g - \frac{rF_r}{\rho g}$
7	$rCu_p^2$	$rCu_p v_p - rCv_{tp} \left( \frac{\partial u_p}{\partial r} \right) - ru_p \frac{v_{tp}}{Sc} \left( \frac{\partial C}{\partial r} \right)$	$\frac{rF_x}{\rho p}$

8	$rCu_p v_p$	$rCv_p^2 - rCv_{tp} \left( \frac{\partial v_p}{\partial r} \right) - rv_p \frac{v_{tp}}{Sc} \left( \frac{\partial C}{\partial r} \right)$	$\frac{rF_r}{\rho_p}$
9	$rCu_p w_p$	$rCv_p w_p - rCv_{tp} \left( \frac{\partial w_p}{\partial r} \right) - rw_p \frac{v_{tp}}{Sc} \left( \frac{\partial C}{\partial r} \right)$	$\frac{rF_\theta}{\rho_p}$
10	$rT_g u_g$	$rT_g v_g - r \frac{v_{tg}}{Pr} \left( \frac{\partial T_g}{\partial r} \right)$	$-\frac{rQ}{\rho_g C_p}$
11	$rCT_p u_p$	$rCT_p v_p - rC \frac{v_{tp}}{Pr} \left( \frac{\partial T_p}{\partial r} \right) - rT_p \frac{v_{tp}}{Sc} \left( \frac{\partial C}{\partial r} \right)$	$\frac{rQ}{\rho_p C_p}$
12	$rk_g u_g$	$rk_g v_g - r \frac{v_{tg}}{\sigma_k} \left( \frac{\partial k_g}{\partial r} \right)$	$rv_{tg} \left( \frac{\partial u_g}{\partial r} \right)^2 - r\varepsilon_g - r\varepsilon_g^*$
13	$rCk_p u_p$	$rCk_p v_p - rC \frac{v_{tp}}{\sigma_k} \left( \frac{\partial k_p}{\partial r} \right) - rk_p v_{tp} \left( \frac{\partial u_p}{\partial r} \right)$	$rv_{tp} C \left( \frac{\partial u_p}{\partial r} \right)^2 - r\varepsilon_p - r\varepsilon_p^*$
14	$r\varepsilon_g u_g$	$r\varepsilon_g v_g - r \frac{v_{tg}}{\sigma_\varepsilon} \left( \frac{\partial \varepsilon_g}{\partial r} \right)$	$rC_{\varepsilon 1} v_{tg} \frac{\varepsilon_g}{k_g} \left( \frac{\partial v_g}{\partial r} \right)^2 - rC_{\varepsilon 2} r \frac{\varepsilon_g^2}{k_g} - r\phi^*$
15	$rC\varepsilon_p u_p$	$rC\varepsilon_p v_p - rC \frac{v_{tp}}{\sigma_\varepsilon} \left( \frac{\partial \varepsilon_p}{\partial r} \right) - r\varepsilon_p \frac{v_{tp}}{Sc} \left( \frac{\partial C}{\partial r} \right)$	$rv_{tp} C C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon_p}{k_p} \left( \frac{\partial u_p}{\partial r} \right)^2 - C_{\varepsilon 2} r \frac{\varepsilon_p^2}{k_p} + r\phi^*$
16	$u_g k_{tg}$	$v_g k_{tg} - \frac{1}{r} \frac{v_{tg}}{\sigma_T} \left( \frac{\partial k_{tg}}{\partial r} \right)$	$2 \frac{v_{tg}}{Pr} C \left( \frac{\partial T_g}{\partial r} \right)^2 - \varepsilon_T^*$
17	$u_p k_{tp}$	$Cv_p k_{tp} - \frac{1}{r} \frac{v_{tp}}{\sigma_T} \left( \frac{\partial k_{tp}}{\partial r} \right)$	$2 \frac{v_{tp}}{Pr} C \left( \frac{\partial T_p}{\partial r} \right)^2 + \varepsilon_T^*$
18	$u_p k_c$	$Cv_p k_c - \frac{rv_{tp}}{\sigma_c} \left( \frac{\partial k_c}{\partial r} \right)$	$2 \frac{v_{tp}}{Sc} \left( \frac{\partial C}{\partial r} \right)^2$
19	$\rho_g u_g f_g$	$\rho_g v_g f_g$	$\varpi + D_{eff} \frac{\partial^2 f_g}{\partial x^2} + D_{eff} \frac{\partial^2 f_g}{\partial r^2}$
20	$\rho_p u_p f_p$	$\rho_p v_p f_p$	$\varpi + D_{eff} \frac{\partial^2 f_p}{\partial x^2} + D_{eff} \frac{\partial^2 f_p}{\partial r^2}$



Trong đó:

- $u_g, v_g, w_g$  - Thành phần vận tốc theo phương dọc trục, hướng kính và tiếp tuyến pha khí;
- $u_p, v_p, w_p$  - Thành phần vận tốc theo phương dọc trục, hướng kính và tiếp tuyến pha lỏng;
- $k_g, k_p$  - Động năng rối của pha khí và pha lỏng;
- $e_g, e_p$  - Hệ số động năng rối của pha khí và pha lỏng;
- $e_{g*}, e_{p*}$  - Hệ số động năng rối của pha khí và pha lỏng;
- $F_x, F_r, F_w$  - Lực tương tác theo phương dọc trục, hướng kính và tiếp tuyến;
- $p$  - Áp suất;
- $T_g, T_p$  - Nhiệt độ của pha khí và pha lỏng;
- $Q$  - Nhiệt lượng;
- $\rho_g, \rho_p$  - Khối lượng riêng của pha khí và pha lỏng;
- $f_g, f_p$  - Thành phần pha khí và pha lỏng;
- $k_{tg}, k_{tp}, k_c, C, \phi^*$  - Các hệ số.

Điều kiện biên:

- Điều kiện biên trái: Vì miệng phun nhiên liệu được đặt ngay trên biên, ta có:

$$f_g = f_p = 1; w = f(r).$$

- Điều kiện biên phải: Tỷ sai phân của biến  $f$  theo phương  $x$  bằng zero, ta có:  $\partial f / \partial x = 0$ .

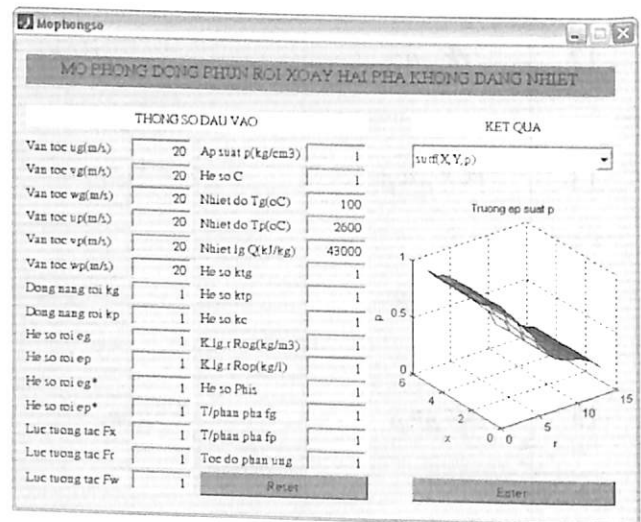
- Điều kiện biên thành rắn: Tỷ sai phân của biến  $f$  theo phương  $r$  bằng zero, ta có:  $\partial f / \partial r = 0$ .

- Điều kiện biên đối xứng: Tỷ sai phân của biến  $f$  theo phương  $r$  bằng zero, ta có:  $\partial f / \partial r = 0$ .

### 3. KẾT QUẢ TÍNH TOÁN

Việc tính toán được tiến hành trên máy

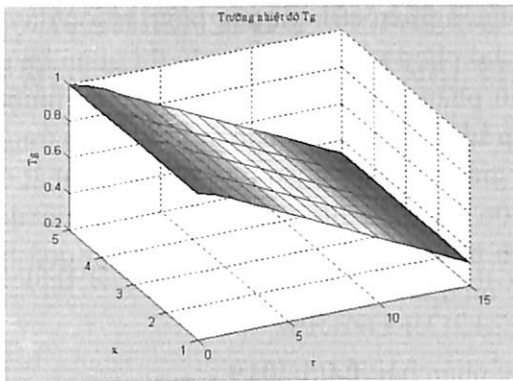
tính, chương trình tính toán được xây dựng bằng phần mềm Matlab 6.5, giao diện tính toán mô phỏng số dòng phun rối xoáy hai pha không đẳng nhiệt trong buồng đốt được thiết lập như minh họa trong hình 1. Trong đó, giá trị của các thông số cơ bản chính là giá trị tại các điểm nút của lưới sai phân trong quá trình tính toán giải hệ phương trình dòng phun rối xoáy hai pha không đẳng nhiệt. Giá trị biên của miền tính toán được lấy từ kết quả đo thực nghiệm dòng phun rối xoáy hai pha không đẳng nhiệt trong buồng đốt [4].



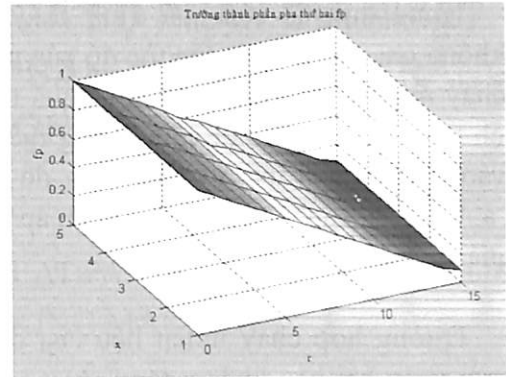
Hình 1. Giao diện tính toán mô phỏng số dòng phun rối xoáy hai pha.

Quá trình cháy dòng phun rối xoáy hai pha không đẳng nhiệt trong buồng đốt luôn xảy ra trường hợp nhiệt độ của ngọn lửa và môi trường là không giống nhau, kết quả của quá trình trao đổi nhiệt và trao đổi chất giữa ngọn lửa với môi trường dẫn đến sự chuyển dịch năng lượng nhiệt.

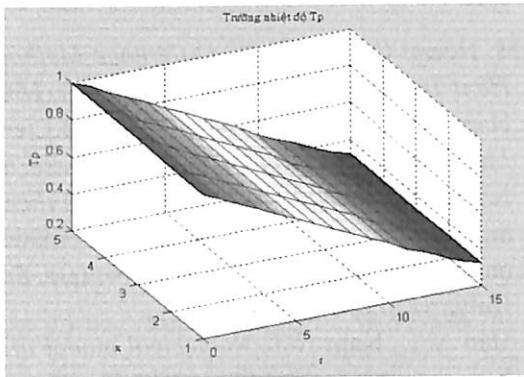
Phân bố nhiệt độ của dòng phun rối xoáy hai pha trong buồng đốt cho thấy, càng xa tâm cháy nhiệt độ càng giảm, có thể được chia làm ba vùng như minh họa trong hình 2 và hình 3.



Hình 2. Trường nhiệt độ pha khí  $T_g$  của pha khí trong không gian 3D khi hệ số xoáy  $S=0,6$ .



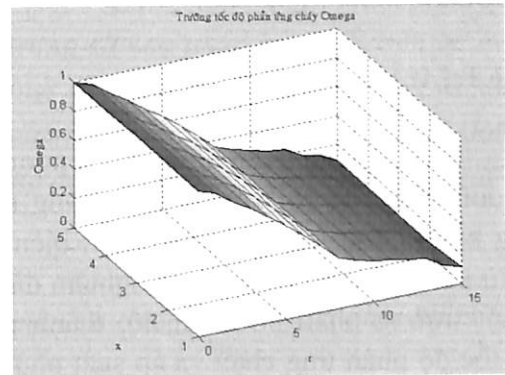
Hình 5. Trường thành phần pha lỏng  $f_p$  trong không gian 3D khi hệ số xoáy  $S=0,6$ .



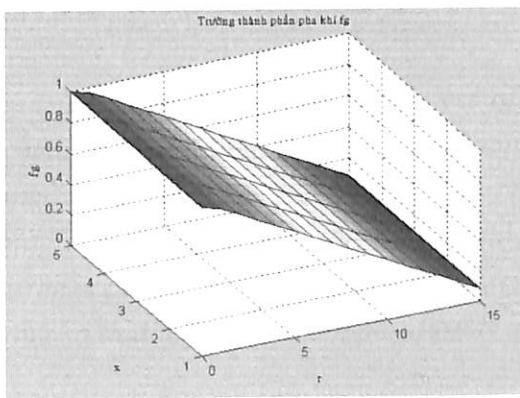
Hình 3. Trường nhiệt độ pha lỏng  $T_p$  của pha lỏng trong không gian 3D khi hệ số xoáy  $S=0,6$ .

Phân bố thành phần nhiên liệu và không khí tập trung chủ yếu ở vùng tâm cháy, càng ra xa tâm cháy thành phần nhiên liệu và ôxy càng giảm dần như minh họa trong hình 4 và hình 5.

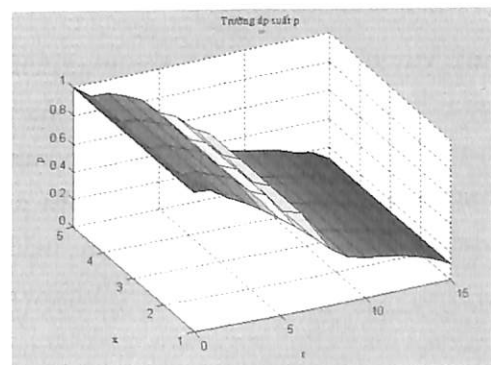
Như đã phân tích ở trên cho thấy, khi ra xa tâm cháy thì thành phần nhiên liệu và không khí đều giảm dần. Do đó, tốc độ phản ứng khi ra xa tâm cháy cũng giảm như minh họa trong hình 6.



Hình 6. Trường tốc độ phản ứng hóa học trong không gian 3D khi hệ số xoáy  $S=0,6$ .



Hình 4. Trường thành phần pha khí  $f_g$  trong không gian 3D khi hệ số xoáy  $S=0,6$ .



Hình 7. Trường áp suất trong không gian 3D khi hệ số xoáy  $S=0,6$ .

Trong thực tế của quá trình cháy, áp suất không chỉ ảnh hưởng đến tốc độ của phản ứng cháy mà còn ảnh hưởng đến cả quá trình khuếch tán và tản nhiệt. Vì vậy, không thể chỉ dựa vào sự thay đổi tốc độ phản ứng để giải thích ảnh hưởng của việc tăng hay giảm áp suất đến quá trình cháy.

Trường hợp cháy nhiên liệu của dòng phun rối xoáy hai pha không đẳng nhiệt trong buồng đốt cho thấy, phân bố áp suất tỷ lệ thuận với tốc độ phản ứng như minh họa trong hình 7.

Từ các thông số tính toán trong phân bố thành phần pha, phân bố nhiệt độ, phân bố áp suất và phân bố tốc độ phản ứng hoá học, ta có thể xác định được đồ thị quan hệ liên quan đến quá trình cháy của dòng phun rối xoáy hai pha không đẳng nhiệt trong buồng đốt.

## 4. KẾT LUẬN

Việc xây dựng mô hình số của ngọn lửa của dòng hai pha rối xoáy không đẳng nhiệt trong buồng đốt, sử dụng điều kiện biên ban đầu từ kết quả nghiên cứu thực nghiệm đã cho ta một trường phân bố nhiệt độ, thành phần pha, tốc độ phản ứng cháy và áp suất phù hợp

với các nghiên cứu thực nghiệm trước đây. Từ đó, cho phép xây dựng các đồ thị quan hệ giữa thành phần pha với tốc độ phản ứng, nhiệt độ và áp suất với tốc độ phản ứng, theo đó ứng với mỗi giá trị tốc độ phản ứng hoá học, nhất định ta luôn xác định được giá trị áp suất, nhiệt độ và thành phần pha tương ứng, giúp cho quá trình cháy ổn định và cháy sạch. ❖

Ngày nhận bài: **04/8/2019**

Ngày phản biện: **17/8/2019**

## Tài liệu tham khảo:

- [1]. M. Necati Ozisik. *Finite Difference Method in Heat Transfer*. CRC Press - 2000.
- [2]. Nam.N.T., L.T.Truyen, H.D.Lien..., *Mathematical model of the Two-phase non-isothermal swirling turbulent flows in thermal and mass transmission processes*, International conference EMF'2003, Oct. 30-Nov.01, Sofia, Bulgaria, p.p. 143-150.
- [3]. Hao N.T., Nam N.T, *Numerical model of FO fuel burning in swirling boiler's combustor*, Proceeding of IX International Scientific Conference EMF'04, 09/2004, resort St. "Konstantin i Elena", Bulgaria, p.p. 126-132.
- [4]. A. K. Gupta - D. G. Lilley - N. Syred. *Swirl Flows*. Department of Mechanical Engineering University - 1984.