

# MÔ PHỎNG SỐ NGỌN LỬA NHIÊN LIỆU KHÍ TRONG BUỒNG ĐỐT VỚI TRƯỜNG VẬN TỐC BAN ĐẦU THỰC

Nguyễn Thanh Nam

Khoa Cơ Khí, Trường Đại học Bách Khoa – ĐHQG-HCM

(Bài nhận ngày 12 tháng 05 năm 2003)

**TÓM TẮT:** Khi nghiên cứu mô hình số ngọn lửa trong buồng đốt ta thường sử dụng phân bố vận tốc ban đầu là đều, điều này đã hạn chế độ chính xác của mô hình. Trong báo cáo tác giả xây dựng mô hình số cho dòng phun với trường vận tốc thực từ các kết quả thực nghiệm. Kết quả tính toán được kiểm chứng với thực nghiệm đã minh chứng độ tin cậy của mô hình và khả năng ứng dụng của nó trong thực tế.

## 1. Đặt vấn đề:

Tối ưu hóa các thiết bị buồng đốt thực chất là sự lựa chọn đúng đắn kết cấu và chế độ làm việc của các thông số phụ thuộc, đặc biệt là các thông số khí động học của ngọn lửa.

Trước đây khả năng nghiên cứu duy nhất và cơ sở thiết kế các thiết bị đốt được thực hiện bằng thực nghiệm. Điều này đòi hỏi nhiều công sức và phương tiện thực hiện mô hình.

Số lượng và khối lượng các nghiên cứu thực nghiệm có thể giảm nhiều và việc thiết kế các thiết bị buồng đốt có thể đơn giản hơn nhờ các tính toán kiểm chứng. Mô hình số của quá trình cháy trong buồng đốt hiện tại hoàn toàn có thể thực hiện được bằng các phương pháp tính toán hiện đại, mô hình cho phép xác định các thông số cơ bản của ngọn lửa, dự báo giới hạn các thay đổi của các thông số, đảm bảo sự tối ưu và hiệu quả của quá trình cháy.

Trong các mô hình số về ngọn lửa trong buồng đốt người ta thường sử dụng phân bố đều của vận tốc ban đầu làm điều kiện ban đầu cho tính toán, nhưng trong thực tế phân bố của vận tốc ban đầu không phải như vậy, như thực nghiệm tiến hành trong [ 1] đã khẳng định điều đó. Bằng việc đưa vào trường vận tốc thực của ngọn lửa trong buồng đốt, mô hình số của ngọn lửa đã tiệm cận với bức tranh thực của ngọn lửa, đó là bằng chứng về độ tin cậy và khả năng ứng dụng của mô hình.

## 2. Mô hình toán của ngọn lửa:

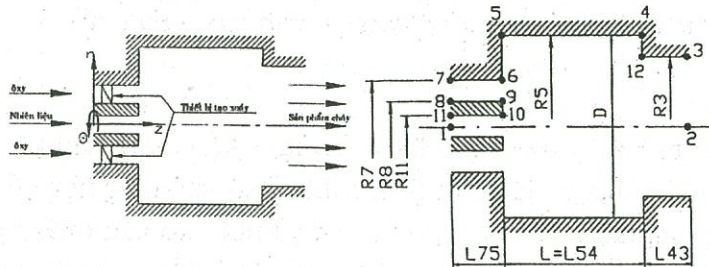
Mô hình toán của ngọn lửa trong buồng đốt khí (hình 1) được xây dựng trên cơ sở các phương trình Reynolds đối với dòng phun rối xoáy hai thành phần không đẳng nhiệt trong không gian giới hạn các phương trình này được biến đổi để trở thành các phương trình của đường dòng  $\psi$  và cường độ xoáy  $\Omega$  [ 3]. Kết hợp với với phương trình của hệ số hỗn hợp  $f$  cho ta hệ phương trình vi phân:

$$\frac{\partial}{\partial Z} \left[ \frac{1}{\rho r} \frac{\partial \psi}{\partial Z} \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{1}{\rho r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right] + \Omega = 0 \quad (1)$$

$$r^2 \left\{ \frac{\partial}{\partial Z} \left[ \frac{\Omega}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{\Omega}{r} \frac{\partial \psi}{\partial Z} \right] \right\} - \frac{\partial}{\partial Z} \left\{ r^3 \frac{\partial}{\partial Z} \left[ \mu_t \frac{\Omega}{r} \right] \right\} - \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^3 \frac{\partial}{\partial r} \left[ \mu_t \frac{\Omega}{r} \right] \right\} - r \frac{\partial}{\partial Z} (\rho W^2) - r \frac{\partial}{\partial Z} \left( \frac{U^2 + V^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial r} + r^2 \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{U^2 + V^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial Z} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial Z} \left[ r W \frac{\partial \psi}{\partial r} \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left[ r W \frac{\partial \psi}{\partial Z} \right] - \frac{\partial}{\partial Z} \left\{ r^3 \mu_t \frac{\partial}{\partial Z} \left( \frac{W}{r} \right) \right\} - \frac{\partial}{\partial r} \left\{ r^3 \mu_t \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{W}{r} \right) \right\} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial Z} \left[ f \frac{\partial \psi}{\partial r} \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left[ f \frac{\partial \psi}{\partial Z} \right] - \frac{\partial}{\partial Z} \left[ \frac{\mu_t}{Pr} r \frac{\partial f}{\partial r} \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{\mu_t}{Pr} r \frac{\partial f}{\partial r} \right] = 0 \quad (4)$$



Hình 1: Sơ đồ mô hình buồng đốt nhiên liệu khí

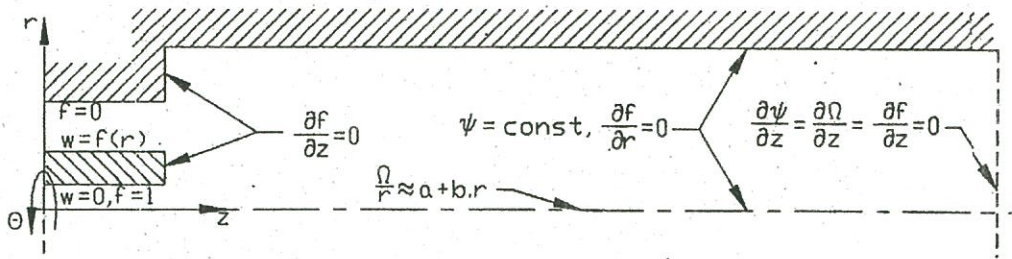
Các phương trình này có thể viết dưới dạng tổng quát:

$$a_\varphi \left\{ \frac{\partial}{\partial Z} \left( \varphi \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left( \varphi \frac{\partial \psi}{\partial Z} \right) \right\} - \frac{\partial}{\partial Z} \left\{ b_\varphi r \frac{\partial (c_\varphi \varphi)}{\partial Z} \right\} - \frac{\partial}{\partial r} \left\{ b_\varphi r \frac{\partial (c_\varphi \varphi)}{\partial r} \right\} + r d_\varphi = 0 \quad (5)$$

Với các giá trị của các biến số  $\varphi$  và các hệ số  $a_\varphi, b_\varphi, c_\varphi, d_\varphi$  được cho trong bảng sau:

$\varphi$	$A_\varphi$	$b_\varphi$	$c_\varphi$	$d_\varphi$
$\psi$	0	$1/\rho r^2$	1	$-\Omega/r$
$\Omega/r$	$R^2$	$r^2$	$\mu_t$	$-\frac{\partial}{\partial Z} (\rho W^2) - r \left[ \frac{\partial}{\partial Z} \left( \frac{U^2 + V^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial r} - \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{U^2 + V^2}{2} \right) \frac{\partial \rho}{\partial Z} \right]$
$r.W$	1	$\mu_t r^2$	$1/r^2$	0
$f$	1	$\mu_t/Pr$	1	0

Và các điều kiện biên như trên hình 2.



Hình 2. Điều kiện biên.

Trong hệ phương trình trên U, V, W là các vận tốc thành phần tương ứng theo phương dọc trục, ngang và tiếp tuyến  $U = \frac{1}{\rho r} \frac{\partial \psi}{\partial z}$ ;  $V = -\frac{1}{\rho r} \frac{\partial \psi}{\partial r}$ ;  $\rho$  là mật độ của hỗn hợp cháy;  $h$  là

Entanpi:  $h = C_p \cdot T$ ;  $T$  - nhiệt độ tuyệt đối;  $Pr, Sc$  - hệ số Prandtl và Smidht;  $\mu$  - độ nhớt động hỗn lưu.

Hệ số hỗn hợp  $f$  được xác định bằng biểu thức:

$$f = \frac{h - h_0}{h_k - h_0} = \frac{c - c_0}{c_k - c_0} \tag{6}$$

trong đó:  $c$  là nồng độ tương đối:

$c = m_1 - m_2/i$ ;  $m_1, m_2$  nồng độ của khí nhiên liệu và ôxy:  $m_1 = G_1/G$  và  $m_2 = G_2/G$ ;  $i$  - hệ số cháy sạch  $i = G'_2/G_2$ ;  $G_1, G_2, G'_2$  - khối lượng nhiên liệu, ôxy thực tế và khối lượng ôxy cần đốt cháy hoàn toàn nhiên liệu  $G_1$ .

$h_0, h_k$  - entanpi của các thành phần ôxy và khí trong hỗn hợp.

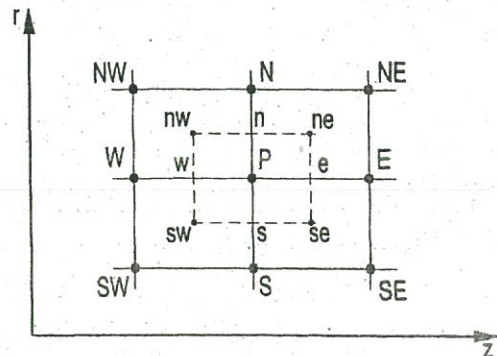
$c_0, c_k$  - nồng độ tương đối của ôxy và khí nhiên liệu:

$$c_0 = -m_2 / i ; c_k = 1$$

Phân bố vận tốc ban đầu được sử dụng là giá trị trung bình theo tích phân số của trường vận tốc thực nghiệm.

### 3. Mô hình số của ngọn lửa:

Phương trình tổng quát (5) có thể giải bằng phương pháp khối hữu hạn. Trước tiên ta phủ lưới lên vùng khảo sát, sơ đồ phủ lưới tại điểm nút P và các nút kế khác N, S, E, W như trên hình vẽ.



Hình 3. Dạng của lưới sai phân

Tích phân kép phương trình (5) trong khoảng  $r_s \rightarrow r_n$  và  $z_n \rightarrow z_e$  ta có:

$$\int_{r_s}^{r_n} \int_{z_w}^{z_e} a_\varphi \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left( \varphi \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) - \frac{\partial}{\partial r} \left( \varphi \frac{\partial \psi}{\partial z} \right) \right\} dz dr - \int_{r_s}^{r_n} \int_{z_w}^{z_e} \left\{ \frac{\partial}{\partial z} \left[ b_\varphi r \frac{\partial (c_\varphi \varphi)}{\partial z} \right] - \frac{\partial}{\partial r} \left[ b_\varphi r \frac{\partial (c_\varphi \varphi)}{\partial r} \right] \right\} dz dr + \int_{r_s}^{r_n} \int_{z_w}^{z_e} r d_\varphi dz dr = 0$$

Sau khi biến đổi ta nhận được phương trình xác định giá trị của hàm  $\varphi$  tại nút P như sau:

$$\varphi_P = C_E \varphi_E + C_W \varphi_W + C_N \varphi_N + C_S \varphi_S + D$$

Trong đó:

$$C_E = \frac{(A_E + B_E \cdot C_{\varphi,E})}{S_{AB}} ; C_W = \frac{(A_W + B_W \cdot C_{\varphi,W})}{S_{AB}}$$

$$C_N = \frac{(A_N + B_N \cdot C_{\varphi,N})}{S_{AB}} ; C_S = \frac{(A_S + B_S \cdot C_{\varphi,S})}{S_{AB}}$$

$$D = -\frac{d_{\varphi,P} \cdot V_P}{S_{AB}}$$

$$S_{AB} = A_E + A_W + A_N + A_S + C_{\varphi,P}(B_E + B_W + B_N + B_S)$$

$$A_E = \frac{a_{\varphi,P}}{8} \{(\psi_{SE} + \psi_S - \psi_{NE} - \psi_N) + (\psi_{SE} + \psi_S - \psi_{NE} - \psi_N)\}$$

$$A_W = \frac{a_{\varphi,P}}{8} \{(\psi_{NW} + \psi_N - \psi_{SW} - \psi_S) + (\psi_{NW} + \psi_N - \psi_{SW} - \psi_S)\}$$

$$A_N = \frac{a_{\varphi,P}}{8} \{(\psi_{NE} + \psi_E - \psi_{NW} - \psi_W) + (\psi_{NE} + \psi_E - \psi_{NW} - \psi_W)\}$$

$$A_S = \frac{a_{\varphi,P}}{8} \{(\psi_{SW} + \psi_W - \psi_{SE} - \psi_E) + (\psi_{SW} + \psi_W - \psi_{SE} - \psi_E)\}$$

$$B_E = \frac{b_{\varphi,E} + b_{\varphi,P}}{8} \cdot \frac{r_N - r_S}{z_E - z_P} \cdot (r_E + r_P)$$

$$B_W = \frac{b_{\varphi,W} + b_{\varphi,P}}{8} \cdot \frac{r_N - r_S}{z_P - z_W} \cdot (r_W + r_P)$$

$$B_N = \frac{b_{\varphi,N} + b_{\varphi,P}}{8} \cdot \frac{z_E - z_W}{r_N - r_P} \cdot (r_N + r_P)$$

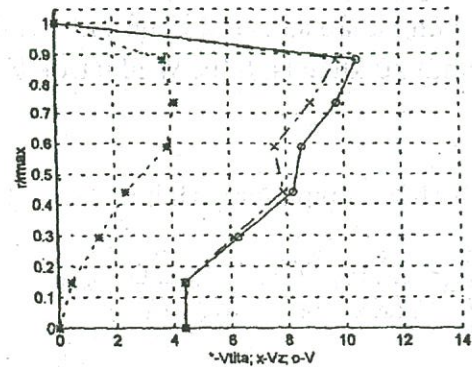
$$B_S = \frac{b_{\varphi,S} + b_{\varphi,P}}{8} \cdot \frac{z_E - z_W}{r_P - r_S} \cdot (r_S + r_P)$$

$$V_P = \frac{r_P}{4} \cdot (z_E - z_W)(r_N - r_S)$$

#### 4. Kết quả tính toán và so sánh thực nghiệm:

##### Kết quả tính toán:

Việc tính toán được tiến hành trên máy tính, chương trình tính toán được xây dựng với công cụ là phần mềm "Matlab". Các thông số cơ bản nhận được giá trị tại các điểm nút của lưới sai phân trong quá trình tính toán là các đại lượng: U – thành phần vận tốc hướng dọc trục đối xứng ( $V_z$  trong chương trình); V – thành phần vận tốc theo phương ngang ( $V_r$  trong chương trình); W – thành phần vận tốc tiếp tuyến ( $V_{\text{tita}}$  trong chương trình); T – nhiệt độ;  $\Omega$  - cường độ xoáy của vận tốc.  $\varphi$  - phương trình đường dòng; f – hệ số hỗn hợp và  $m_g = m_1$  – mật độ



Hình 4: Phân bố các thành phần vận tốc tại thiết diện đầu ( $z=0,5D$ )

khối lượng khí nhiên liệu.

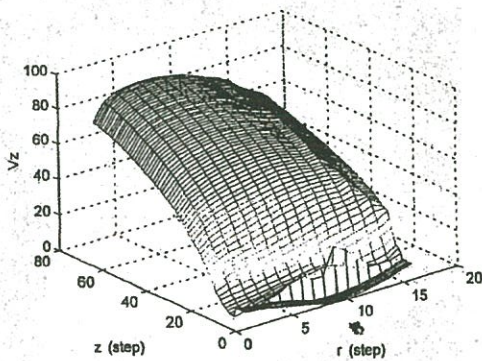
Các tính toán được tiến hành với các trường hợp buồng đốt nhiên liệu khí có các thông số hình học sau:

$$R1=0; R3=0,0580 \text{ m}; R5=0,0580 \text{ m}; R7=0,0580 \text{ m}; R8=0,200 \text{ m}; \beta=45^\circ$$

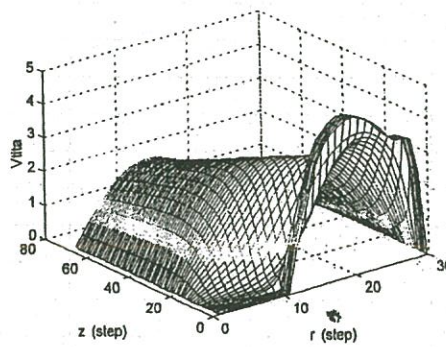
$$R11=0,0180; L=L54 \approx 3D=0,4600 \text{ m}; L75=0,0500 \text{ m}; L43=0$$

Các thành phần vận tốc ban đầu  $U_0$  và  $W_0$  được xác định từ các kết quả thực nghiệm tại thiết diện ban đầu (hình 4) các bước lưới  $dz=0.005 \text{ m}$ ;  $dr=0.002 \text{ m}$ .

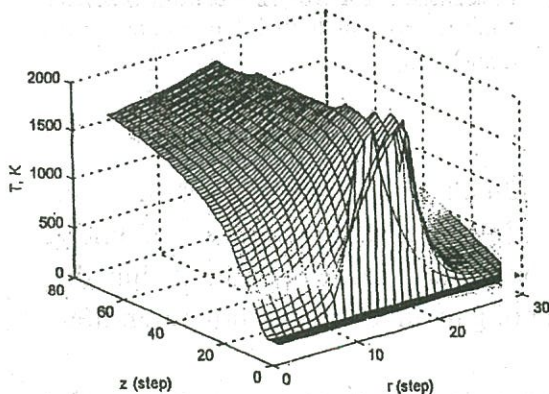
Kết quả tính toán được biểu diễn trên hình (5)- (10). So sánh trường vận tốc tính toán và đo được tại thiết diện ở khoảng cách  $z = 1,5 D$  hay 55 bước lưới dọc trục Z (hình 11) cho thấy sự phù hợp giữa các kết quả thực nghiệm và kết quả tính, điều này khẳng định khả năng ứng dụng mô hình trong thực tế.



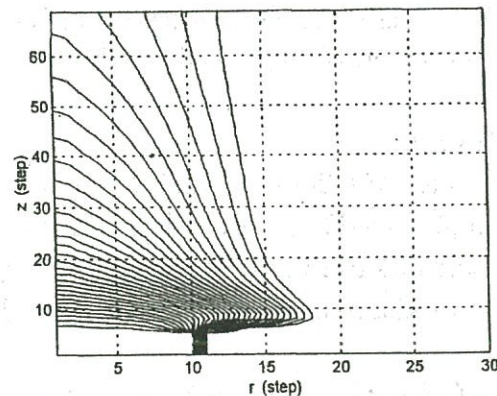
Hình 5: Phân bố của vận tốc U



Hình 6: Phân bố của vận tốc W



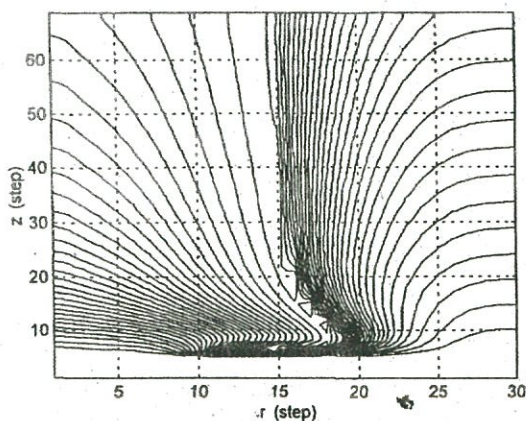
Hình 7: Phân bố của Nhiệt độ T



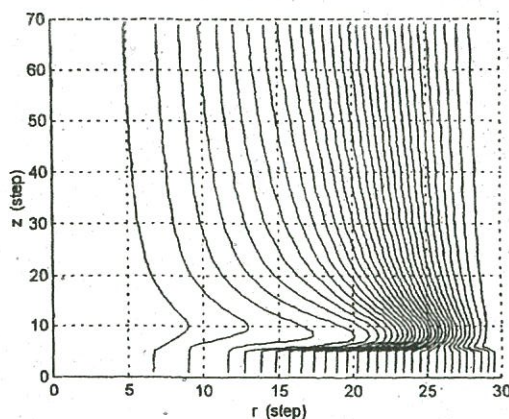
Hình 8: Phân bố các đường có nồng độ không đổi

Điểm khác biệt giữa với hai trường vận tốc (tính toán và thực nghiệm) là ở chỗ đối trường vận tốc của mô hình thực nghiệm có giá trị vận tốc lớn nhất dịch chuyển tới gần vùng biên gần thành cứng hơn. Sự khác biệt này được lý giải do mô hình được xây dựng có quá trình cháy nhưng kết quả thực nghiệm được thực hiện cho quá trình đẳng nhiệt.

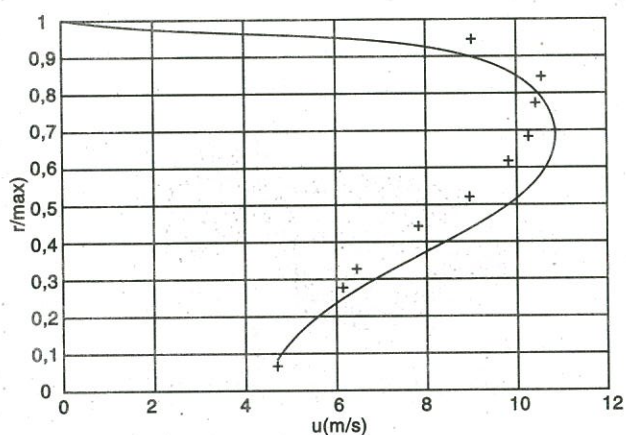
Một so sánh khác được thực hiện trên hình ảnh ngọn lửa với các đường dòng của mô hình tính toán (hình 12) kết quả so sánh cũng hoàn toàn phù hợp cho ta thấy độ tin cậy của mô hình trong việc mô phỏng ngọn lửa trong buồng đốt nhiên liệu khí.



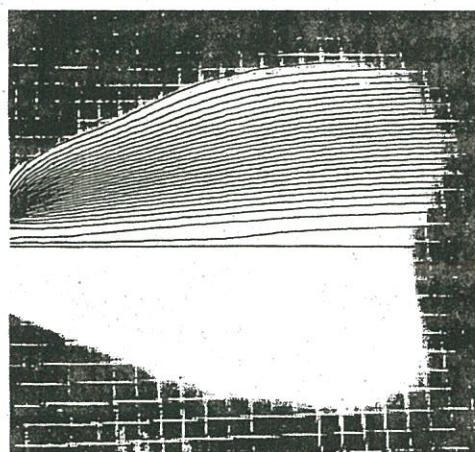
Hình 9: Phân bố các đường có nhiệt độ không đổi



Hình 10: Phân bố các đường dòng



Hình 11: So sánh trường vận tốc tính toán và đo được tại thiết diện ở khoảng cách  $z = 1,5 D$



Hình 12: So sánh hình ảnh ngọn lửa với các đường dòng

### 5. Kết luận:

Việc xây dựng mô hình số của ngọn lửa nhiên liệu khí trong buồng đốt sử dụng phân bố vận tốc ban đầu từ kết quả nghiên cứu thực nghiệm đã cho ta một mô hình số mô phỏng chính xác quá trình cháy và hình dáng ngọn lửa trong buồng đốt. Đồng thời khẳng định độ tin cậy và khả năng ứng dụng của mô hình trong mô phỏng ngọn lửa buồng đốt nhiên liệu khí.

Công trình nhận được sự hỗ trợ quý báu từ đề tài hợp tác quốc tế thuộc chương trình nghiên cứu cơ bản, Bộ Khoa học Công nghệ. Tác giả xin chân thành cảm ơn.

## NUMERICAL INVESTIGATION THE GASEOUS FLAME IN COMBUSTION CHAMBER WITH REAL INITIAL VELOCITY DISTRIBUTION

Nguyen Thanh Nam

**ABSTRACT:** During numerical investigation the gaseous flame we usually accept the equal velocity distribution but it's not true. This paper introduced the numerical model of the flame with the real initial velocity distribution. The results are compared and agreed with the experimental data confirming the possibility of the used numerical model in practice.

## TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [ 1 ] Spalding B.R, *Computer modeling of combusting process*, Brussels EURO CFD,1997.
- [ 2 ] N.T Nam, H.D Lien, *phương pháp khối hữu hạn ứng dụng trong các bài toán thủy khí động lực*, NXBKHKT,2000.
- [ 3 ] Atanasov K.T., *Numerical Investigation of Gas Turbulent Swirling Flows. On Combustion Process*, Ph.D. Thesis, TU Sofia 2001.