

УДК 536.46:532.517.4

А. С. АСКАРОВА, М. Ж. РЫСПАЕВА, И. Э. ВОЛОШИНА

## ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Изучено влияние начальной температуры на горение впрыска жидкого топлива с помощью численного метода с использованием компьютерной программы KIVA. Получены распределения температуры, концентрации топлива и продуктов реакции для двух случаев различных начальных температур  $T_n$ .

Исследованы дисперсия и горение впрыска жидкого топлива на основе численного решения системы дифференциальных трехмерных уравнений турбулентного реагирующего течения с помощью программы KIVA-II для численного расчета двух- и трехмерных химически активных жидких потоков с впрысками. В этой программе уравнения и алгоритм решения являются очень общими и могут быть применены к ламинарным и турбулентным потокам, дозвуковым и сверхзвуковым течениям, а также к одно- и двухфазными средам [1].

Математическое моделирование образования и дисперсии впрыска жидкого топлива является сложной задачей, так как требует учета большого количества сложных взаимосвязанных процессов и явлений: многоступенчатые цепные химические реакции, перенос импульса, тепла и массы путем конвекции, молекулярный перенос, излучение, турбулентность, испарение жидких капель и т.д. [2].

Математическая модель задачи о дисперсии и горении впрыска жидкого топлива включает в себя уравнение движения для жидкой фазы, сопровождаемой капельным испарением, к-ε модель турбулентности, уравнение энергии и переноса массы с соответствующими граничными условиями и уравнение состояния [3–5], которые имеют следующий вид:

уравнение неразрывности для компоненты  $m$ :

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla(\rho_m u) = \nabla \left[ \rho D \nabla \left( \frac{\rho_m}{\rho} \right) \right] + \rho \mathcal{G}_m + \rho \mathcal{G}_{m1}, \quad (1)$$

уравнение импульса:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla(\rho u u) = -\frac{1}{a^2} \nabla p - A_0 \nabla \left( \frac{2}{3} \rho k \right) + \nabla \mathcal{G} + F^s + \rho g, \quad (2)$$

уравнение энергии:

$$\frac{\partial(\rho I)}{\partial t} + \nabla(\rho u I) = -p \nabla u + (1 - A_0) \sigma \nabla u - \nabla J + A_0 \rho \varepsilon + \mathcal{G} + \mathcal{G}, \quad (3)$$

где  $J = -K \nabla T - \rho D \sum_m h_m \nabla \left( \frac{\rho_m}{\rho} \right)$ .

Уравнения к-ε модели турбулентности:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla(\rho u k) = -\frac{2}{3} \rho k \nabla u + \sigma : \nabla u + \nabla \left[ \left( \frac{\mu}{Pr_k} \right) \nabla k \right] - \rho \varepsilon + \mathcal{W}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla(\rho u \varepsilon) = -\left( \frac{2}{3} c_{\varepsilon_1} - c_{\varepsilon_3} \right) \rho \varepsilon \nabla u + \nabla \left[ \left( \frac{\mu}{Pr_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} \left[ c_{\varepsilon_1} \sigma : \nabla u - c_{\varepsilon_2} \rho \varepsilon + c_s \mathcal{W} \right]. \quad (5)$$

$$\sigma : \nabla u = \sigma_{ij}^e e_{ij}, \quad (6)$$

где

$$\sigma_{ij} = 2\mu e_{ij} - \frac{2}{3}\mu e_{kk}\delta_{ij}, \quad i, j, k = 1, 2, 3, \quad e_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right). \quad (7)$$

$$\mu = (1.0 - A_0)\rho V_0 + \mu_{air} + A_0\rho c_\mu k^2 / \varepsilon, \quad \mu_{air} = \frac{A_1 T^{3/2}}{(T + A_2)}. \quad (8)$$

Здесь  $K = \frac{\mu c_p}{Pr}$ ,  $D = \frac{\mu}{\rho Sc}$ .

Уравнение изменения массы частицы:

$$\frac{dm_p}{dt} = -2\pi r_p (\rho D)_{air}(\bar{T}) \frac{Y_1^* - Y_1}{1 - Y_1^*} Sh_p. \quad (9)$$

Уравнение состояния:

$$P = R_0 T \sum_m \left( \frac{\rho_m}{W_m} \right), \quad I(T) = \sum_m \left( \frac{\rho_m}{\rho} \right) I_m(T), \quad c_p(T) = \sum_m \left( \frac{\rho_m}{\rho} \right) c_{p_m}(T), \quad \sum_m \left( \frac{\rho_m}{\rho} \right) = 1. \quad (10)$$

Уравнение движения частиц вдоль ее траектории записывается следующим образом:

$$\frac{d}{dt} \overset{r}{u}_p = D_p \left( \overset{r}{u}_g + \overset{r}{u}'_g - \overset{r}{u}_p \right) + g, \quad \frac{d}{dt} \overset{r}{x}_p = \overset{r}{u}_p, \quad (11)$$

где  $D_p = \frac{3}{8} \frac{\rho}{\rho_p} \frac{\left| \overset{r}{u}_g + \overset{r}{u}'_g - \overset{r}{u}_p \right|}{r_p} C_D(Re_p)$ .

Коэффициент лобового сопротивления для жидкой капли равен

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} \left( 1 + \frac{1}{6} Re_p^{2/3} \right), & \text{при } Re_p \leq 1000, \\ 0,424, & \text{при } Re_p > 1000. \end{cases}$$

Здесь  $Re_p = \frac{2\rho \left| \overset{r}{u}_g + \overset{r}{u}'_g - \overset{r}{u}_p \right| r_p}{\mu_{air}(\bar{T})}$ ,  $\bar{T} = \frac{T + 2T_p}{3}$ ,

$$Pr_p = \frac{\mu_{air}(\bar{T}) c_p(\bar{T})}{K_{air}(\bar{T})}, \quad Nu_p = \left( 2,0 + 0,6 Re_p^{1/2} Pr_p^{1/3} \right) \frac{\ln(1 + B_p)}{B_p},$$

$$K_{air} = \frac{K_1 \bar{T}^{3/2}}{\bar{T} + K_2},$$

$\Gamma$ ,  
 $u$   $g$  – случайный вектор возмущения скорости газа.

Закон сохранения объема представляется следующим уравнением:

$$\frac{DV}{Dt} = \int_S u dA. \quad (12)$$

Дополнительные члены в уравнениях газовой фазы (1)–(5), появляющиеся за счет межфазного обмена и химической реакции можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \dot{M}^S &= - \int f \rho_p 4\pi r^2 R du_p dT_p dy d\mathbf{x} \\ \dot{I}^S &= - \int f \rho_p \left( \frac{4}{3} \pi r^3 (\mathbf{U} - \mathbf{g}) + 4\pi r^2 R u_p \right) du_p dr dT_p dy d\mathbf{x} \\ \dot{E}^S &= - \int f \rho_p \left\{ 4\pi r^2 R \left[ I(T_p) + \frac{1}{2} (u_p - u)^2 \right] + \frac{4}{3} \pi r^3 \left[ c(T_p) + (\mathbf{U} - \mathbf{g}) (u_p - u - u') \right] \right\} du_p dr dT_p dy d\mathbf{x} \\ \dot{W}^S &= - \int f \rho_p \frac{4}{3} \pi r^3 (\mathbf{U} - \mathbf{g}) u du_p dr dT_p dy d\mathbf{x} \\ \dot{M}_m^S &= W_m \sum_r (b_{mr} - a_{mr}) \mathbf{e}_r, \\ \dot{E}_m^S &= \sum_r \sum_m (a_{mr} - b_{mr}) (\Delta h_f^0)_m \mathbf{e}_r. \end{aligned}$$

Здесь  $\dot{M}^S$ ,  $\dot{I}^S$ ,  $\dot{E}^S$  – скорости изменения массы, импульса и энергии всех капель, имеющих радиус-вектор  $\mathbf{x}$  в момент времени  $t$ ;  $\dot{W}^S$  – отрицательная скорость, в которой турбулентные вихри совершают работу по распространению впрыскиваемых капель.

В работе кинетика задается с помощью глобальной модели химических реакций Shell [6]. Эта модель состоит из следующих реакций:

1.  $C_n H_{2m} + O_2 \xrightarrow{k_q} 2R^*$ .
2.  $R^* + (\Gamma + 1) \left( \frac{1}{m} C_n H_m + p O_2 \right) \xrightarrow{k_p} gP + f_1 B + f_4 Q + R^*$ .
3.  $R^* + Q \xrightarrow{f_2 k_p} R^* + B$ .
4.  $R^* \xrightarrow{f_3 k_p} linear \quad termination$ .
5.  $R^* \xrightarrow{k_f} quadratic \quad termination$ .
6.  $B^* \xrightarrow{k_B} 2R^*$ .

Здесь  $R^*$  – все радикалы;  $B$  – агент ветвления;  $Q$  – промежуточный продукт.

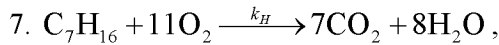
Коэффициенты  $\Gamma, p, g$  можно записать в виде

$$\Gamma = \frac{f_1 M_B + f_4 M_Q}{\frac{M_{RH}}{m} + p M_{O_2}}, \quad p = \frac{n(2-\lambda) + m}{2m}, \quad g = \frac{n}{m} + 1.$$

Коэффициент  $\lambda$  определяет отношение смеси продуктов  $CO/CO_2 = \lambda/(1-\lambda)$ ,  $\lambda = 0,67$  [6].

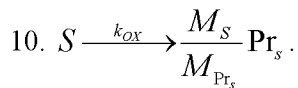
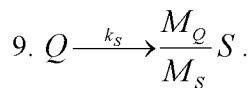
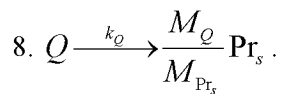
Молекулярные веса глобальных компонентов  $M_B, M_Q$  определяются из уравнений баланса масс.

Модель Shell не описывает полностью процесс горения и должна быть дополнена высокотемпературными реакциями для продуктов реакции.



где  $k_H = 5,10^{12} \exp(-15780/T)$ .

Промежуточные продукты реакции определяются следующим образом:



Здесь  $S$  обозначает сажу;  $Pr_s$  – глобальные продукты окисления сажи;  $M_S$  – молекулярный вес сажи.

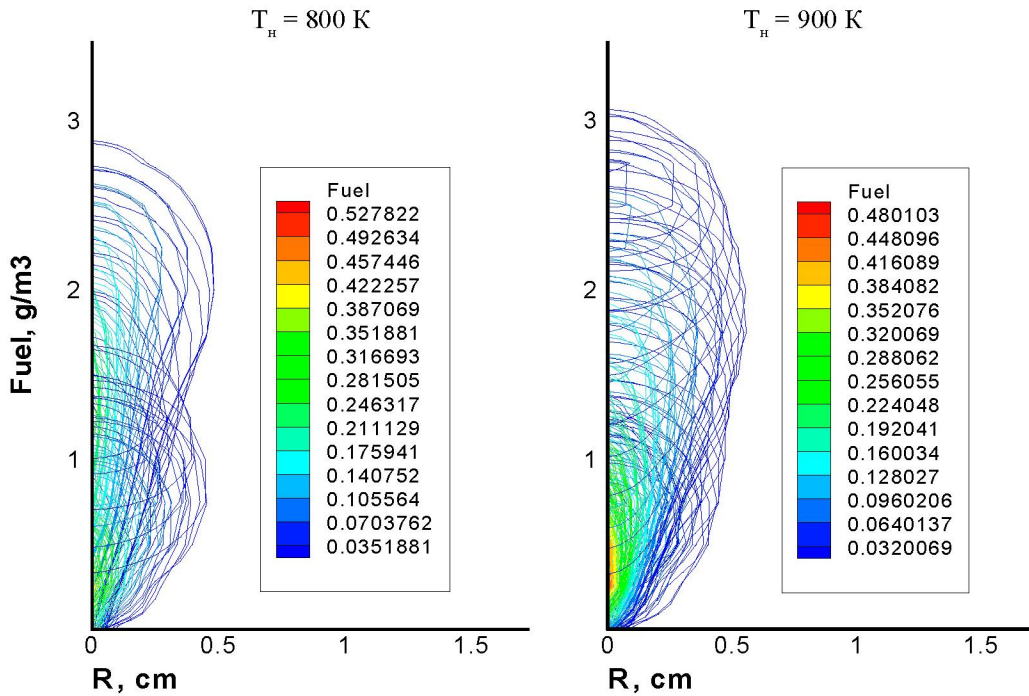
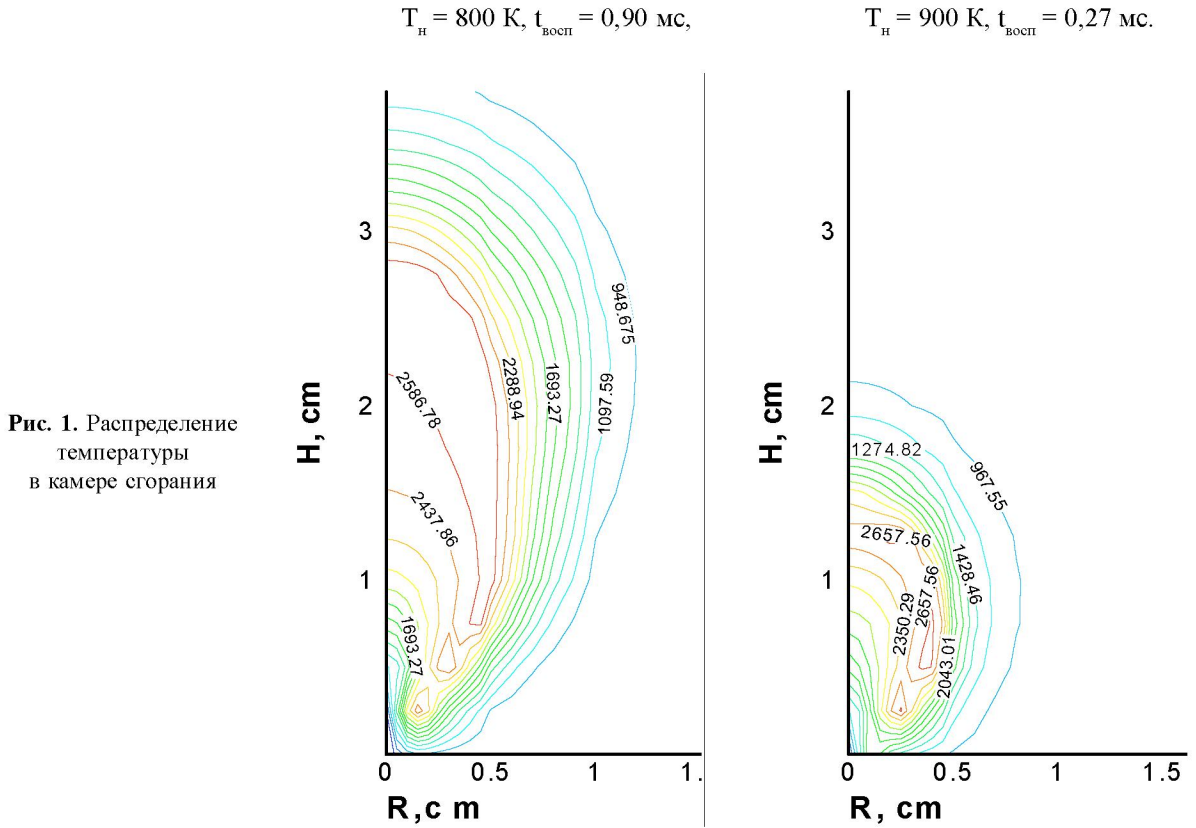
Результаты численного моделирования влияния начальной температуры на процесс горения впрыска жидкого топлива представлены на рис. 1–3. Начальная температура менялась от 600 до 900 К. Топливо, которое поступает в камеру сгорания через сопло, расположенное в нижней части камеры, распадается на капли. Капли постепенно испаряются, смешиваясь с воздухом. Через некоторое время смесь пара топлива и воздуха начинает гореть.

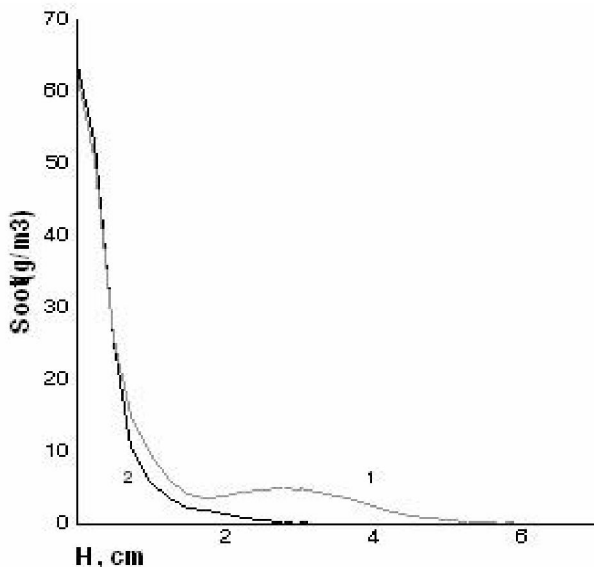
При проведении вычислительных экспериментов было выяснено, что при температуре воздуха в камере сгорания ниже 800 К горения не происходит, появляются лишь отдельные участки самовоспламенения, но они затухают, их энергии недостаточно для поддержания процесса горения.

На рис. 1 показано распределение температуры в моменты самовоспламенения топлива в случае двух различных начальных температур 800 и 900 К. При начальной температуре воздуха, заполняющего камеру сгорания, равной 800 К, воспламенение начинается в момент времени 0,90 мс после начала впрыскивания. При начальной температуре 900 К и при той же массе, топливо начинает гореть немного раньше, в момент времени 0,27 мс. Максимальная температура в первом случае достигается равной 2587 К, во втором – 2658 К. Как видно, в первом случае факел заполняет большую часть камеры и что область максимальных температур почти в 2 раза больше, чем при начальной температуре 900 К.

На рис. 2 и 3 приведены поля концентрации паров топлива и сажи для двух начальных температур – 800 и 900 К. Рис. 2 показывает распределение концентрации паров топлива для двух случаев начальной температуры. В случае температуры 900 К пары топлива охватывают немного большую область, чем в случае температуры, равной 800 К.

На рис. 3 представлено распределение максимальной концентрации сажи. Анализ показывает, что кривые распределения концентрации сажи совпадают в начальной области камеры, различие наблюдается лишь в области 3–4 см по высоте камеры.





**Рис. 3.** Распределение максимальной концентрации сажи:  
1 –  $T_0 = 800$  К; 2 –  $T_0 = 900$  К

Таким образом, проведено численное моделирование процесса впрыска жидкого топлива в камеру сгорания. Рассмотрена глобальная модель химических реакций, учитывающая образование сажи при горении жидких топлив. Исследовано влияние начальной температуры на горение жидкого гептана и проведено сравнение температурных полей, распределения паров топлива и сажи для разных начальных температур. В результате вычислительных экспериментов выяснено, что при температурах ниже 800 К горение гептана не происходит. При температуре 800 К факел охватывает большую часть камеры, чем при начальной температуре, равной 900 К.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сполдинг Д.Б. Горение и массообмен / Под ред. В. Е. Дорошенко. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
2. Amsden A.A., O'Kourke P.J., Butler T.D. KIVA-II: A computer program for chemically reactive flows with sprays. Los Alamos, 1989. 158 с.
3. Аскарлова А.С., Рыспаева М.Ж. Расчет горения впрыска жидкого топлива в замкнутой камере // Вестник КазНУ. Сер. физ. 2006. №1(21). С. 74-78.
4. Аскарлова А.С., Гороховски М.А., Рыспаева М.Ж. Моделирование образования  $\text{CO}_2$  при горении жидких впрысков // Вестник КазНУ. Сер. физ. 2006. № 2(22). С. 51-54.
5. Sabel'nikov V., Gorokhovski M., Baricault N. The extended IEM mixing model in the framework of the composition PDF approach: applications to diesel spray combustion // Combustion Theory and Modelling. 2006. V. 10, N 1. P. 155-169.
6. Gorokhovski M. and Borghi R. Model of soot formation and oxidation in diesel engines // Journal of diesels, Transactions of SAE. 1993. 930075.

#### Резюме

KIVA компьютерлік программаны пайдаланып, сұйық отынның бүрку жануына бастапқы температураның әсерлері сандық әдіспен зерттелген. Екі әртүрлі бастапқы температура үшін: отын концентрациясы және өнім реакциясы температураның таралуы алынды.

#### Resume

The influence of the initial temperature on the combustion of liquid fuel spray by means of the numerical method using the computer program KIVA has been studied. The distributions of temperature, concentration of fuel and reaction products have been obtained for two cases of various initial temperatures.

Казахский национальный  
университет им. аль-Фараби, г. Алматы

Поступила 26.12.06г.