

Лабораторные работы по компьютерным методам обработки данных

Аскарова А.С., Болегенова С.А.,
Рыспаева М.Ж., Волошина И.Э.



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.....	2
Численное исследование влияния начальной температуры на горение впрыска жидкого топлива в камере сгорания.....	2
1 Краткое теоретическое введение.....	3
2 Основные уравнения.....	3
3 Постановка задачи.....	6
3.1 Описание программы (файла со входными данными «ITARE»).....	7
4 Порядок выполнения работы.....	7
5 Контрольные вопросы.....	8
.....	9
6 Литература.....	9

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Численное исследование влияния начальной температуры на горение впрыска жидкого топлива в камере сгорания

Цель работы: изучение влияния начальной температуры на горение жидкого топлива, а также на концентрацию паров топлива с помощью пакета компьютерных программ для численного расчета реагирующих течений с впрысками.

1 Краткое теоретическое введение

Горение является первым сложным техническим процессом, освоенным человечеством. В истории прогресса техники этот процесс занимал и продолжает занимать очень важное место, являясь основой современной энергетики. Очевидно, что для того, чтобы существенно улучшить экологические и энергетические показатели любого топочного устройства, любой теплоэнергетической установки и комплекса в целом, увеличить их суммарный КПД, необходимо осуществлять влияние на процессы горения вещества, происходящие в камерах сгорания. А именно, интенсифицировать процессы воспламенения и горения топливно-воздушной смеси. В настоящее время разработаны и применяются различные методы интенсификации горения и подавления образования вредных пылегазовых выбросов при сжигании жидких и твердых топлив.

В данной работе исследуется процесс горения распыленного топлива в зависимости от начальной температуры. Капли жидкого топлива очень быстро испаряются, пары топлива смешиваются с окислителем (воздухом в камере сгорания), данная смесь воспламеняется и очень быстро сгорает. В данном случае процесс горения является гомогенным.

2 Основные уравнения

Математическая модель задачи о дисперсии и горении впрыска топлива [1] включает в себя уравнение неразрывности для компоненты m (1), уравнение импульса (2), уравнение энергии (3), уравнения к-ε модели турбулентности (4-5):

уравнение неразрывности для компоненты m :

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho_m u) = \vec{\nabla} \left[\rho D \vec{\nabla} \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) \right] + \dot{\rho}_m^c + \dot{\rho}^s \delta_{m1}, \quad (1)$$

уравнение импульса:

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

уравнение энергии:

$$\frac{\partial(\rho I)}{\partial t} + \bar{\nabla}(\rho \bar{u} I) = -\rho \bar{\nabla} \bar{u} + (1 - A_0) \bar{\sigma} \bar{\nabla} \bar{u} - \bar{\nabla} \bar{J} + A_0 \rho \varepsilon + \dot{Q}^c + \dot{Q}^s, \quad (3)$$

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

уравнения к-ε модели турбулентности:

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

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

где $\bar{\sigma} : \bar{\nabla} \bar{u} = \sigma_{ij} e_{ij}$, $\sigma_{ij} = 2\mu e_{ij} - \frac{2}{3} \mu e_{kk} \delta_{ij}$, $i, j, k = 1, 2, 3$, $e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$.

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

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

Уравнение изменения массы частицы имеет вид:

$$\frac{dm_p}{dt} = -2\pi r_p (\rho D)_{air}(\bar{T}) \frac{Y_1^* - Y_1}{1 - Y_1^*} Sh_p. \quad (6)$$

Уравнение состояния:

$$P = R_0 T \sum_m \left(\frac{\rho_m}{W_m} \right), \quad I(T) = \sum_m \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) I_m(T), \quad c_p(T) = \sum_m \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) c_{p_m}(T), \quad \sum_m \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) = 1. \quad (7)$$

Уравнение движения частиц вдоль ее траектории имеет вид:

$$\frac{d\bar{u}_p}{dt} = D_p (\bar{u}_g + \bar{u}'_g - \bar{u}_p) + \bar{g}, \quad \frac{d\bar{x}_p}{dt} = \bar{u}_p. \quad (8)$$

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

Коэффициент лобового сопротивления для частиц равен:

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

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

$$\text{Pr}_p = \frac{\mu_{air}(\bar{T}) c_p(\bar{T})}{K_{air}(\bar{T})}, \quad \text{Nu}_p = \left(2.0 + 0.6 \text{Re}_p^{1/2} \text{Pr}_p^{1/3} \right) \frac{\ln(1 + B_p)}{B_p},$$

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

\bar{u}'_g - случайный вектор возмущения скорости газа.

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

$$\dot{\rho}^S = -\int f \rho_p 4\pi r^2 R d\bar{u}_p dT_p dy dy,$$

$$\dot{\rho}_m^C = W_m \sum_r (b_{mr} - a_{mr}) \dot{\omega}_r,$$

$$\dot{F}^S = -\int f \rho_p \left(\frac{4}{3} \pi r^3 (\bar{F} - \bar{g}) + 4\pi r^2 R \bar{u}_p \right) d\bar{u}_p dr dT_p dy dy,$$

$$\dot{Q}^S = -\int f \rho_p \left\{ 4\pi r^2 R \left[I(T_p) + \frac{1}{2} (\bar{u}_p - \bar{u})^2 \right] + \right.$$

$$\left. + \frac{4}{3} \pi r^3 \left[c(T_p) + (\bar{F} - \bar{g})(\bar{u}_p - \bar{u} - \bar{u}') \right] \right\} d\bar{u}_p dr dT_p dy dy,$$

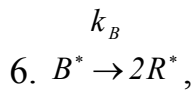
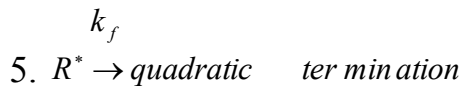
$$\dot{Q}^C = \sum_r \sum_m (a_{mr} - b_{mr}) (\Delta h_f^0)_m \dot{\omega}_r,$$

$$\dot{W}^S = -\int f \rho_p \frac{4}{3} \pi r^3 (\bar{F} - \bar{g}) \bar{u}' d\bar{u}_p dr dT_p dy dy,$$

Здесь $\dot{\rho}^S, \dot{F}^S, \dot{Q}^S$ - скорости изменения массы, импульса и энергии всех частиц.

В работе, кинетика задается с помощью глобальной модели химических реакций Shell [2]. Эта модель состоит из следующих реакций:

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



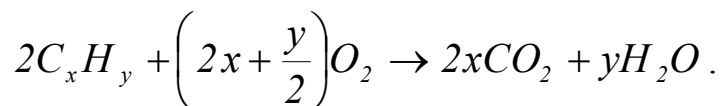
где R^* - все радикалы, B - агент ветвления, Q - промежуточный продукт.

Коэффициенты Γ, p, g можно записать в виде:

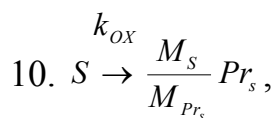
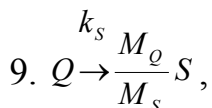
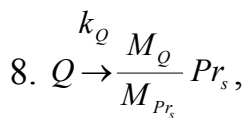
$$\Gamma = \frac{f_1 M_B + f_4 M_Q}{\frac{M_{RH}}{m} + p M_{O_2}}, \quad p = \frac{n(2-\lambda) + m}{2m}, \quad g = \frac{n}{m} + 1$$

Коэффициент λ определяет отношение смеси продуктов $CO/CO_2 = \lambda/(1-\lambda)$, $\lambda = 0,67$ [2]. Молекулярные веса глобальных компонентов M_B, M_Q определяются из уравнений баланса масс.

7. Общий вид химической реакции горения топлива:



Промежуточные продукты реакции определяются следующим образом:



где S - обозначает сажу, Pr_s - глобальные продукты окисления сажи, M_S - молекулярный вес сажи.

3 Постановка задачи

В данной работе необходимо провести вычислительные эксперименты по горению жидкого распыленного топлива и исследовать влияние начальной температуры на его горение в камере сгорания.

Жидкое топливо при температуре 300К впрыскивается в камеру сгорания через круглое сопло, расположенное в центре нижней части камеры. Камера сгорания представляет собой цилиндр (рис.1 лабораторная

работа №1) высотой H и радиусом R , заполненный воздухом при температуре T и при давлении P .

После впрыска происходит быстрое испарение топлива, пары топлива смешиваются с окислителем, и сгорание осуществляется в газовой фазе. Процесс горения жидкого топлива является быстро протекающим, и его длительность не превышает в среднем 4 мс.

3.1 Описание программы (файла со входными данными «ITARE»)

Основные входные данные находятся в файле «ITARE», начало которого имеет вид:

```
Modele de combustion Shell modifie Suies.  
  irest      0  
  ipost      1  
  nx         20  
  ny         1  
  nz         26  
  ...
```

Подробное описание входных данных находится в файле «ALPHABETIC», а также в описании компьютерной программы [1].

4 Порядок выполнения работы

4.1 Откройте файл «ITARE» с помощью редактора программ (ConTEXT, UltraEdit) (предварительно сохраните этот файл, а также exe-файл в отдельную папку).

4.2 Поменяйте вид топлива в строке 166 (вид топлива будет определен преподавателем), к примеру, вместо данной строки:

```
c7h16 rho1 0.0
```

запишите:

```
c12h26 rho1 0.0
```

Запишите химическую реакцию для данного вида топлива, найдите стехиометрические коэффициенты реакции и поменяйте их значения в строках 221 и 222:

```
am7 1 11 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

```
bm7 0 0 0 7 8 0 0 0 0 0 0
```

к примеру, для топлива c12h26 (додекан) эти значения будут равны, соответственно:

```
am7 2 37 0 0 0 0 0 0 0 0 0
```

```
bm7 0 0 0 24 26 0 0 0 0 0 0
```

4.3 Установите значение начальной температуры воздуха в камере сгорания 850 К. Начальная температура воздуха в исходном файле обозначена как «temp1». Сохраните сделанные изменения и запустите файл «soot.exe».

4.4 Повторите пункт 4.2 для температуры 950 и 1050 К.

4.5 После окончания вычисления вы получите несколько файлов с данными расчета. «Vigie.plt» или «Vigie.tec» – в этом файле содержатся данные для газа: поля концентрации компонентов реакции, скоростей, температуры и давления. «Particle.plt» или «Particle.tec» - файл, содержащий следующие данные: координаты (x, z), температуру и радиусы частиц.

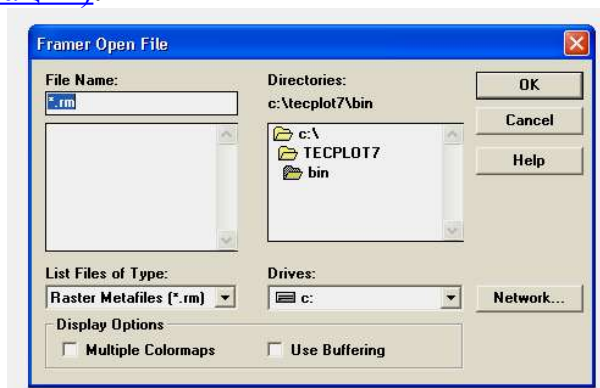
4.6 С помощью программы TecPlot 7 получите анимации концентрации компонентов реакции (топлива и кислорода), продуктов реакции (CO₂, H₂O, “soot” - сажа, N₂), температур частиц и газа для трех различных начальных температур.

4.7 Для того чтобы построить графики, необходимо воспользоваться программой TecPlot 7. (Подробнее смотрите лабораторные работы №1 и №2).

4.8 После построения графика создайте анимационные файлы необходимых распределений. Для этого зайдите в меню «Tools», затем «Animate», выберите «Zones» и отметьте галочкой «Create Animated Movie File» затем нажмите «Animate». Сохранить в свою папку.



4.9 Зайдите в директорию C:\TECPLOT7\bin. Откройте программу FRAMER и с ее помощью откройте свой файл анимации. ([Пример анимации](#)).



4.10 Постройте в программе Microsoft Excel или Mathcad кривые: зависимость максимальной температуры в камере сгорания от максимальной концентрации CO₂, максимальной концентрации H₂O, максимальной концентрации сажи, максимальной концентрации N₂ для различных начальных температур на одном графике.

4.11 Сравните полученные результаты. Какие выводы вы можете сделать?

5 Контрольные вопросы

- 5.1 Дайте определение процесса горения. Назовите виды горения.
Приведите примеры.
- 5.2 Как влияет температура воздуха в камере сгорания на горение жидкого топлива?
- 5.3 При какой начальной температуре топливо сгорает быстрее?

6 Литература

- 6.1 *Amsden A.A., O'Rourke P.J., Butler T.D.* KIVA-II: A computer program for chemically reactive flows with sprays, Los Alamos. 1989, 160с.
- 6.2 *Gorokhovski M. and Borghi R.* Model of soot formation and oxidation in diesel engines. Journal of diesels, Transactions of SAE, 1993, 930075.
- 6.3 *Сполдинг Д.Б.* Горение и массообмен/Пер. с англ. Р.Н. Гизатуллина и В.И. Ягодкина; под ред. В.Е. Дорошенко. – М.: Машиностроение, 1985. -240 с
- 6.4 *Ярин Л.П., Сухов Г.С.* Основы теории горения двухфазных сред.-Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1987. – 240 с.
- 6.5 *Аскарова А. С., Рыспаева М.Ж., Волошина И. Э.* Влияние массы на моделирование процесса горения впрыска жидкого топлива // Вестник КазНУ, серия физическая, 2007, № 1(23), с. 68-72.
- 6.6 *Рыспаева М.Ж.* Моделирование горения жидких впрысков в камерах сгорания и образования CO₂// Физика окружающей среды. Сборник статей V Международной школы молодых ученых и специалистов. Томск, 26 июня – 2 июля 2006 г. Издательство Института оптики атмосферы СО РАН, с.120-124.
- 6.7 *А.С.Аскарова, И.Э. Волошина, Рыспаева М.Ж.* Численное исследование влияния начальной температуры на процесс горения в камере сгорания// Известия НАН РК, серия физико-математическая, 2007, № 2(525), с.55-60.
- 6.8 *А.С.Аскарова, И.Э. Волошина, Рыспаева М.Ж.* Численное моделирование образования продуктов реакции при сжигании жидких топлив// Вестник КазНУ, серия физическая, № 2(24), 2007, с. 3-7.
- 6.9 *Основы практической теории горения.* Под ред. В.В. Померанцева. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений. Л., Энергия, 1973 г., 264 с.