

# Лабораторные работы по компьютерным методам обработки данных

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



## Содержание

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4.....	3
Численное исследование влияния начального радиуса впрыскиваемых капель на процесс горения жидкого топлива в камере сгорания.....	3
1 Краткое теоретическое введение.....	3
2 Основные уравнения.....	3
3 Постановка задачи.....	5
4 Порядок выполнения работы.....	5
5 Контрольные вопросы.....	9
6 Литература.....	9

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

### Численное исследование влияния начального радиуса впрыскиваемых капель на процесс горения жидкого топлива в камере сгорания

**Цель работы:** изучение влияния начального радиуса впрыскиваемых капель на процесс горения жидкого топлива в камере сгорания с помощью компьютерного моделирования.

#### 1 Краткое теоретическое введение

*Горением* называется самоподдерживающийся и самораспространяющийся физико-химический процесс превращения молекул топлива и окислителя в молекулы продуктов реакции. В зависимости от того, в каком агрегатном состоянии находятся топливо и окислитель, разделяют два вида горения: гомогенное горение – горение газов; гетерогенное – горение жидких и твердых топлив. При гомогенном горении химическая реакция идет в объеме, где есть топливо и окислитель, при таком горении большую роль может играть физический или химический процесс. При гетерогенном горении химическая реакция протекает на поверхности раздела фаз, большую роль здесь играют физические процессы: диффузии и конвекции.

В данной работе исследуется процесс горения распыленного топлива с учетом образования сажи, как одного из продуктов химической реакции горения. 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.

На процесс горения очень сильно влияют начальные условия, такие как температура, скорость капель топлива, конфигурация камеры сгорания, давление в камере и т.д. В данной лабораторной работе необходимо провести исследование влияния начального радиуса впрыскиваемых в камеру капель топлива.

#### 2 Основные уравнения

Основные уравнения математической модели задачи о дисперсии и горении впрыска топлива [1] представлены ниже:

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:

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

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

Уравнение изменения массы частицы имеет вид:

$$\frac{dm_p}{dt} = -2\pi r_p (\rho D)_{air}(\bar{T}) \frac{Y_1^* - Y_1}{1 - Y_1^*} Sh_p. \quad (4)$$

Уравнение движения частиц вдоль ее траектории имеет вид:

$$\frac{d\vec{u}_p}{dt} = D_p (\vec{u}_g + \vec{u}'_g - \vec{u}_p) + \vec{g}, \quad \frac{d\vec{x}_p}{dt} = \vec{u}_p. \quad (5)$$

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

Радиусы капель подчиняются квадратичному распределению:

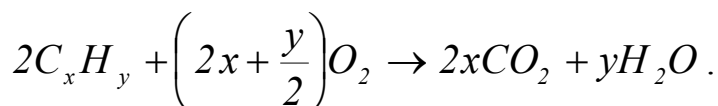
$$g(r) = \frac{1}{\bar{r}} e^{-r/\bar{r}}, \quad (6)$$

Саутеровский средний радиус  $r_{32}$  дается формулой:

$$r_{32} = 3\bar{r} = \frac{r_1}{\frac{7}{3} + \frac{1}{8} \frac{p_d r_1^3}{a(T_{d1})} \dot{\gamma}_1^2}. \quad (7)$$

Более подробно математическая модель, уравнения k-ε модели турбулентности, а также модель химических реакций с учетом образования сажи приведены в лабораторной работе № 3 данной дисциплины.

Общий вид химической реакции горения топлива с образованием углекислого газа и воды:



### 3 Постановка задачи

Камера сгорания представляет собой цилиндр (рис.1) высотой  $H$  и радиусом  $R$ , заполненный воздухом при температуре  $T$  и при давлении  $P$ .

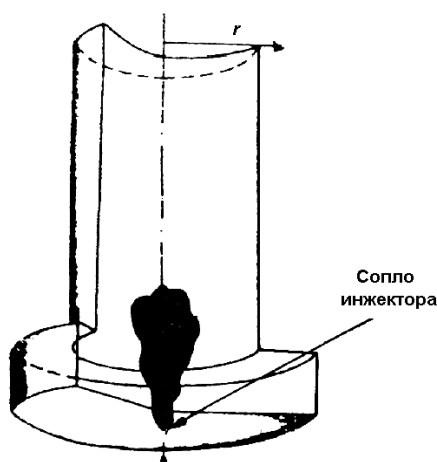


Рис.1. Геометрия камеры сгорания.

Жидкое топливо при температуре 300К впрыскивается в камеру сгорания через круглое сопло, расположенное в центре нижней части камеры. 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 начального Саутеровского среднего радиуса капель 25 микрон. Саутеровский средний радиус в исходном файле обозначен как «smr» и он должен быть записан в единицах см, т.е. в таком виде:

```
smr 2.500e-3
```

Сохраните сделанные изменения и запустите файл «soot.exe».

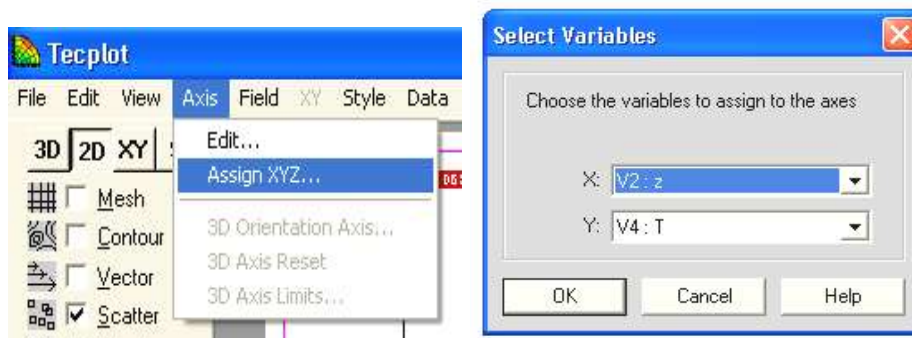
4.4 Повторите пункт 4.2 для Саутеровского среднего радиуса капель, равным 50 и 75 микрон.

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 распределение частиц по размерам, распределение температуры частиц по высоте камеры, поля концентрации топлива, продуктов реакции (CO<sub>2</sub>, “soot” - сажа, N<sub>2</sub>), температур газа для трех Саутеровских средних радиусов капель.

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

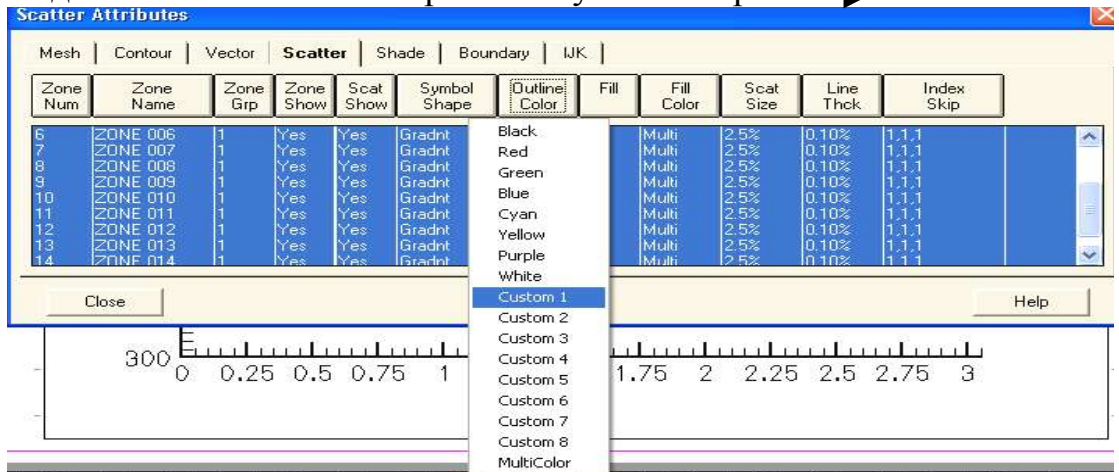
4.8 Чтобы построить распределение температуры частиц по высоте камеры с помощью файла «Particle.plt», необходимо поменять значения координатных осей:



4.9 Слева внизу выберите Plot Attributes

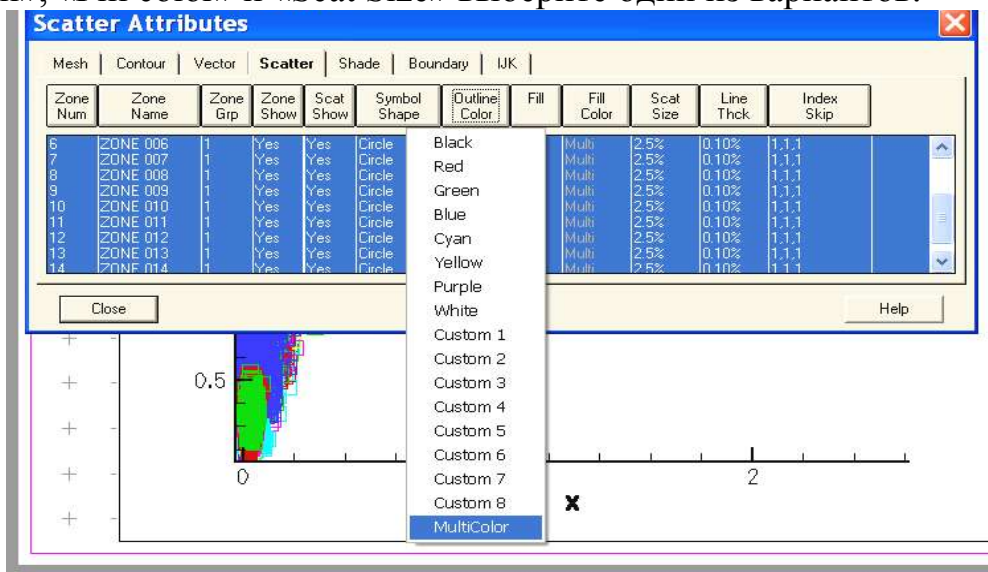


4.10 Выделите все зоны и выберите в «Symbol Shape» → «Custom 1»:

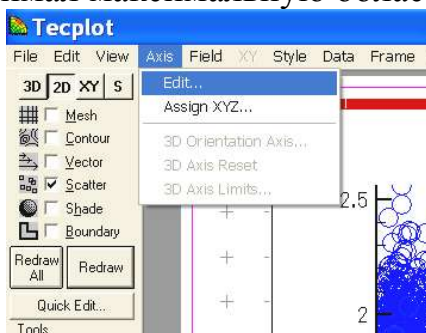


4.11 Нажмите Close, не забудьте после каждого изменения нажимать на кнопку Redraw слева на панели инструментов, чтобы применить изменения.

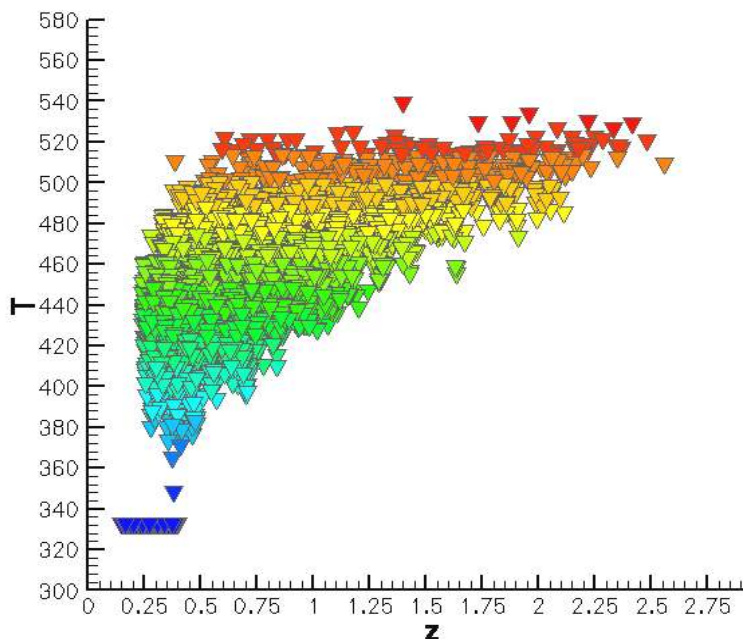
4.12 Выберите в «Outline Color» цветную «Multicolor». В меню «Fill», «Fill color» и «Scat Size» выберите один из вариантов.



4.13 Не забудьте поменять координатные оси так, чтобы рисунок занимал максимальную область.



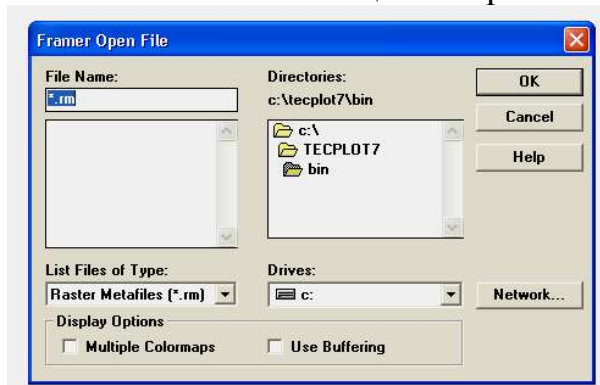
4.14 У вас в итоге появится такой график:



4.15 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.



4.16 Зайдите в директорию C:\TECPLOT7\bin. Откройте программу FRAMER и с ее помощью откройте свой файл анимации.



4.17 Постройте в программе Microsoft Excel или Mathcad кривые: зависимость максимальной температуры в камере сгорания от максимальной концентрации  $\text{CO}_2$ , максимальной концентрации сажи, максимальной концентрации  $\text{N}_2$  для трех начальных Саутеровских средних радиусов.



4.18 Проведите сравнительный анализ полученных результатов. Сделайте выводы о горении впрыска жидкого топлива при изменении начальных условий.

### **5 Контрольные вопросы**

- 5.1 Что такое горение? Приведите примеры различных видов горения.
- 5.2 Напишите формулу для Саутеровского среднего радиуса.
- 5.3 Как зависят вредные выбросы  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$  и образование сажи от Саутеровского среднего радиуса?
- 5.4 Какое влияние оказывает Саутеровский средний радиус на распределение капель топлива в пространстве камеры сгорания?
- 5.5 В каком из трех исследуемых случаев температура в камере сгорания принимает наибольшее значение?

### **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  $\text{CO}_2$ // 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 моделирование образования продуктов реакции при сжигании жидких топлив// Вестник КазНУ, серия физическая, № 2(24), 2007, с. 3-7.
- 6.8 *Основы практической теории горения.* Под ред. В.В. Померанцева. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений. Л., Энергия, 1973 г., 264 с.