

Лабораторные работы по компьютерным методам обработки данных

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



Содержание

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.....	3
Численное исследование влияния впрыскиваемой массы жидкого топлива на процесс горения в цилиндрической камере сгорания.....	3
1 Краткое теоретическое введение.....	3
2 Основные уравнения	4
3 Постановка задачи.....	6
.....	6
4 Порядок выполнения работы.....	7
5 Контрольные вопросы.....	12
6 Литература.....	12

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Численное исследование влияния впрыскиваемой массы жидкого топлива на процесс горения в цилиндрической камере сгорания

Цель работы: исследование горения жидкого топлива и выделения углекислого газа в зависимости от впрыскиваемой массы в камере сгорания при заданных начальных условиях и определение оптимального режима горения с помощью компьютерной программы KIVA-II.

1 Краткое теоретическое введение

В настоящее время более 80% всей производимой в мире энергии вырабатывается за счет сжигания органического топлива. Другие источники энергии: ядерная энергетика, гидроэнергетика, солнечные и ветряные электростанции — в ближайшие десятилетия не смогут конкурировать с традиционными способами. Ограниченность ресурсов ископаемого топлива диктует необходимость поиска более экономичных способов его сжигания, а масштабы промышленного производства таковы, что проблема образования вредных веществ при горении выходит на первый план.

Решение этих вопросов невозможно без детального исследования процесса горения. Численное моделирование горения жидких топлив 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. Поэтому компьютерное моделирование становится все более важным элементом исследования процессов горения и проектирования различных устройств, использующих процесс горения. Можно ожидать, что его роль будет возрастать и в дальнейшем. Вместе с тем говорить о полной замене экспериментальных исследований численными расчетами было бы неправильно — здесь речь идет о подходах к проектированию, которые должны взаимно дополнять друг друга [1].

Горение – это 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. 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 горении впрыска топлива 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 :

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

уравнение импульса:

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

уравнение энергии:

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

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

уравнения к-ε модели турбулентности:

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

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

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

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

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

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:

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

$$\sum_m \left(\frac{\rho_m}{\rho} \right) = 1.$$

Уравнение движения частиц вдоль ее траектории имеет вид:

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

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

Коэффициент лобового сопротивления для частиц равен:

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

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

$$Pr_p = \frac{\mu_{air}(\bar{T}) c_p(\bar{T})}{K_{air}(\bar{T})}, \quad Nu_p = \left(2.0 + 0.6 Re_p^{1/2} Pr_p^{1/3} \right) \frac{\ln(1 + B_p)}{B_p}, \quad K_{air} = \frac{K_1 \bar{T}^{3/2}}{\bar{T} + K_2},$$

\vec{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:

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

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

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

$$\dot{Q}^S = -\int f \rho_p \left\{ 4\pi r^2 R \left[I(T_p) + \frac{1}{2} (\bar{u}_p - \bar{u})^2 \right] + \right. \\ \left. + \frac{4}{3} \pi r^3 \left[c(T_p) + (\bar{F} - \bar{g})(\bar{u}_p - \bar{u} - \bar{u}') \right] \right\} d\bar{u}_p dr dT_p dy dy,$$

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

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

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

3 Постановка задачи

В данной лабораторной работе необходимо провести вычислительный эксперимент по горению жидкого топлива с различными значениями впрыскиваемых масс от 0,01 г до 0,05 г. Камера сгорания имеет форму цилиндра (рис.1) с радиусом $R=2$ см и высотой $H=15$ см заполнена воздухом при температуре $T=900$ К и при давлении $P=32$ Бара. Жидкое топливо 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.

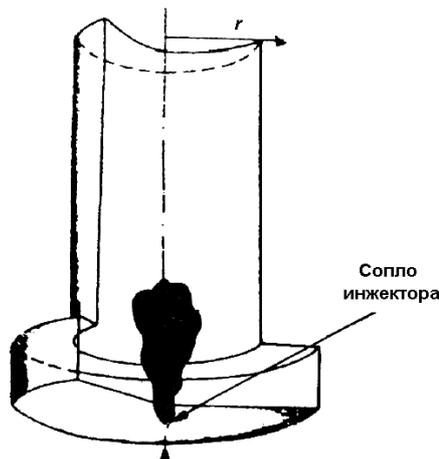


Рис.1. Геометрия камеры сгорания.

4 Порядок выполнения работы

- 4.1. Компьютерная программа KIVA-II имеет в своем составе файл «ITARE» в котором находится «скелет» программы. Подробное описание входных данных файла «ITARE» находится в файле «ALPHABETIC», а также в [1].
- 4.2. Создайте папку со своим именем (латинскими буквами) в директории C:\Students. Создайте в своей папке еще 5 папок со соответствующими значениями масс.
- 4.3. Скопируйте в первую папку файлы: «ITARE», «DOS4GW» и «CO2». Откройте файл «ITARE» в программном редакторе ConTEXT или UltraEdit.
- 4.4. Химическая кинетика процесса горения представлена в виде одной химической реакции: топливо + кислород, в итоге продуктами реакции являются углекислый газ и вода, например, $C_7H_{16} + 11O_2 = 7CO_2 + 8H_2O$. Химическая формула топлива, записывается в файл «ITARE», как показано на примере гептана:

```
c7h16 rho1 0.0
o2 rho2 3.0700e-3 mw2 32.000 htf2 0.0
n2 rho3 1.2280e-2 mw3 28.016 htf3 0.0
co2 rho4 0.0 mw4 44.011 htf4 -93.965
h2o rho5 0.0 mw5 18.016 htf5 -57.103
rtout 0.0
topout 0.0
botin 0.0
nrk 1
```

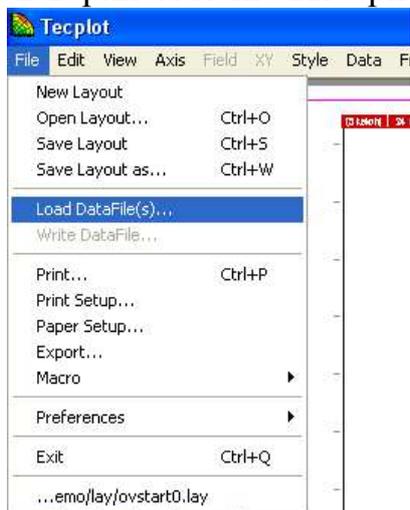
- 4.5. После уравнивания химической реакции, следует изменить стехиометрические коэффициенты в файле «ITARE». am1 – стехиометрические коэффициенты реагентов, bm1 - продуктов реакции.

```
cf1 5.1000e11 ef1 1.5780e+4 zf1 0.0
cb1 0.0 eb1 0.0 zb1 0.0
am1 1 11 0 0 0
bm1 0 0 0 7 8
ael 0.25 1.500 0.000 0.000 0.000
bel 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
nre 0
```

- 4.6. Установите значение начальной впрыскиваемой массы, равной $m = 0.01g$ для этого необходимо в файл «ITARE» в строке «tspmas» подставить значение равное 0.01. Сохраните сделанные изменения и запустите файл «CO2».
- 4.7. Повторите пункты 3-6 для каждой исследуемой массы, каждый раз прибавляя к получившейся массе, впрыскиваемого топлива 0,01г до тех пор пока масса достигнет значения равного 0,05г.

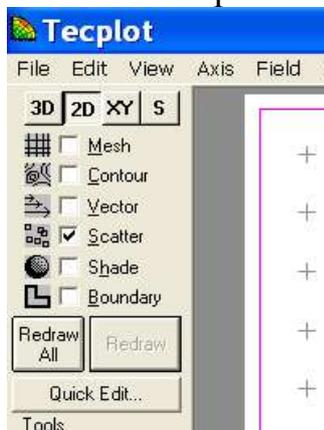
- 4.8. После окончания вычисления вы получите несколько файлов с данными расчета. «Vigie.plt» или «Vigie.tec» – в этом файле содержатся данные для газа: поля концентрации компонентов и продуктов реакции, скоростей, температуры и давления. «Particle.plt» или «Particle.tec» - файл, содержащий следующие данные: координаты (x, z), температуру и радиусы частиц.
- 4.9. С помощью программы TecPlot 7 для построения графиков и анимаций получите по три графика: в начальный, средний и конечный момент времени процесса горения жидкого топлива для каждого распределения. С помощью файла «Particle.plt» или «Particle.tec» получите распределения капель по радиусам с высотой камеры. А также поля температуры, давления и концентрации углекислого газа, с помощью файла «Vigie.plt» или «Vigie.tec» для различных начальных впрыскиваемых масс. Для того чтобы построить графики, необходимо сделать следующее:
- 4.10. Запустите TecPlot 7.

4.11. В верхнем меню выберите File – Load DataFile(s):

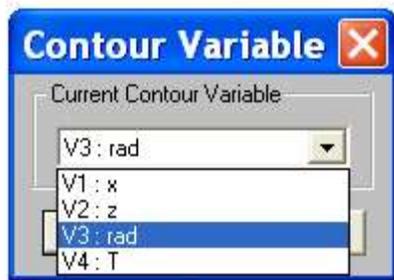


4.12. Откройте вашу папку с полученными файлами и загрузите «Particle.plt» или «Particle.tec».

4.13. На левой верхней панели инструментов выберите «Scatter»:



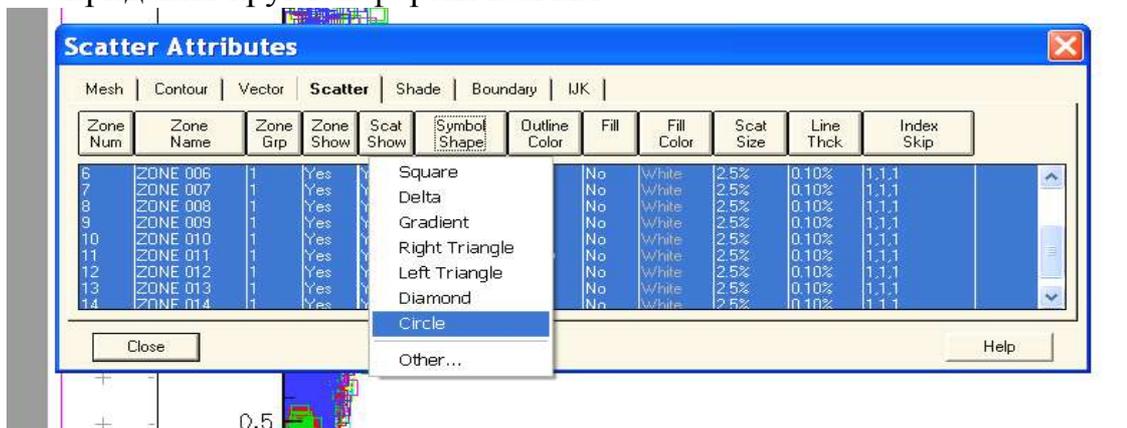
4.14. В появившемся дополнительном окне выберите необходимую вам переменную, по которой будет построено распределение, к примеру, rad - радиус капли:



4.15. Слева внизу выберите Plot Attributes

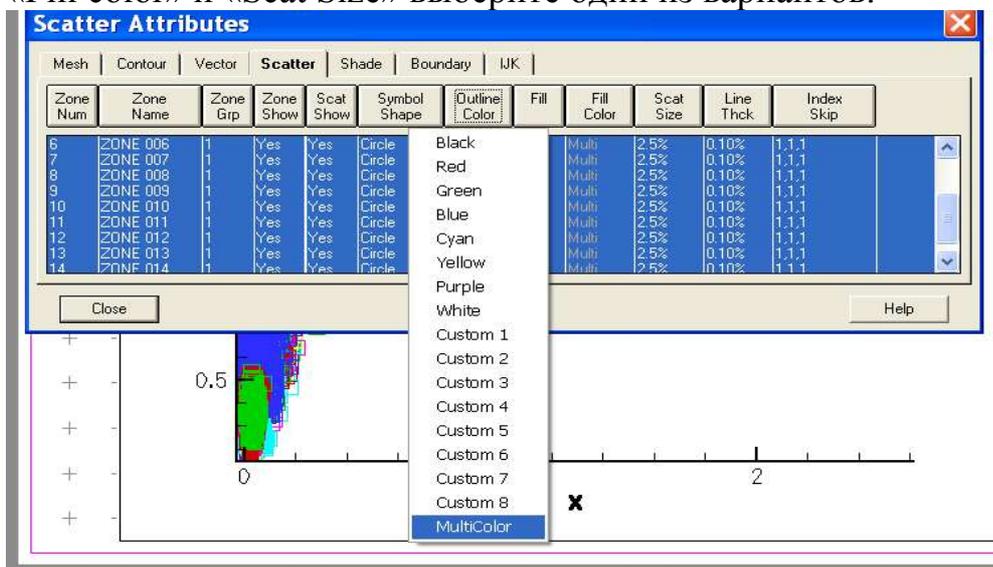


4.16. Выделите все зоны и выберите в «Symbol Shape» —►«Circle», для придания круглой формы каплям:

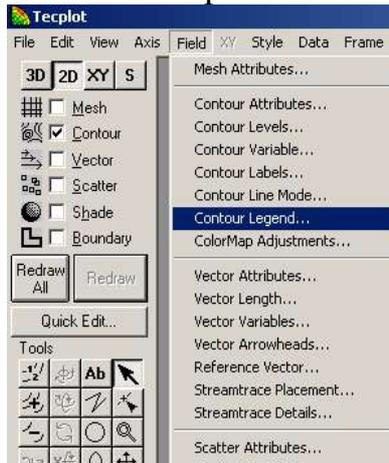


4.17. Нажмите Close, не забудьте после каждого изменения нажимать на кнопку Redraw слева на панели инструментов, чтобы применить изменения.

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

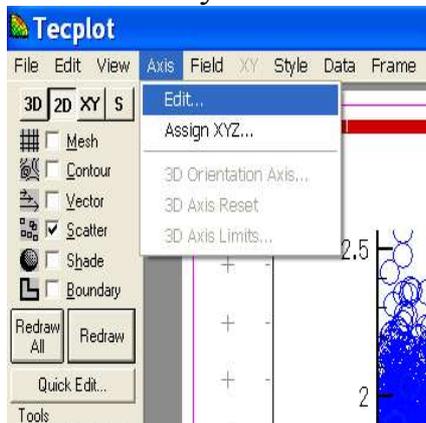


4.19. Затем выберите в меню Field – Contour Legend:

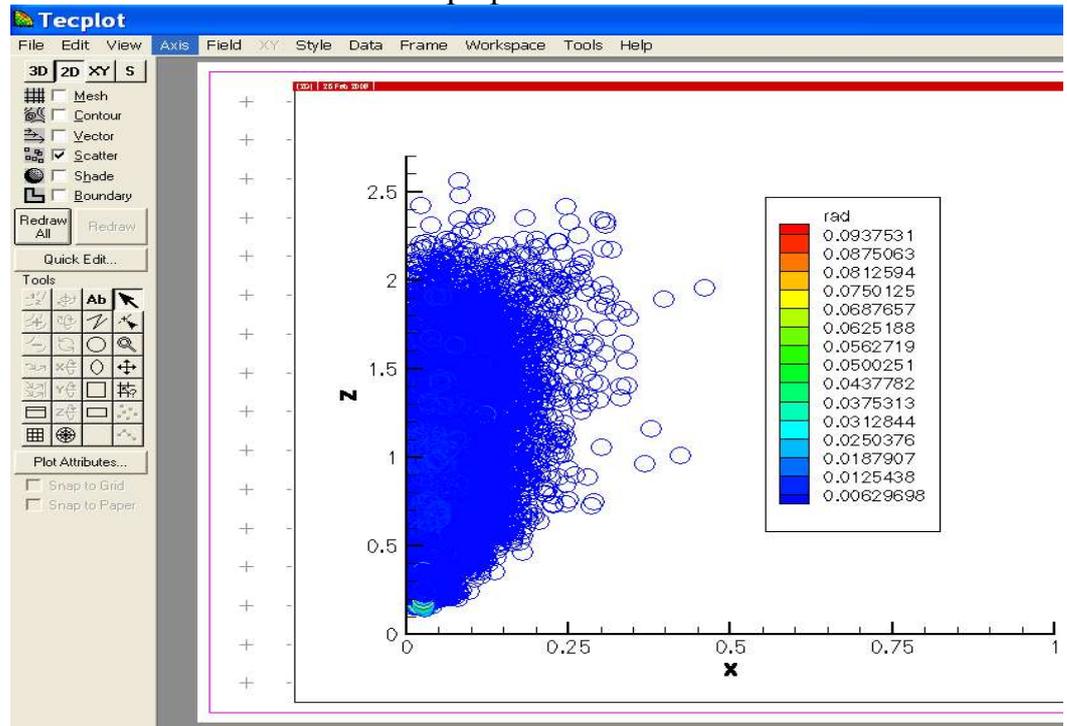


4.20. В появившемся окне выберите Show Contour Legend, закройте данное окно и снова нажмите на кнопку Redraw.

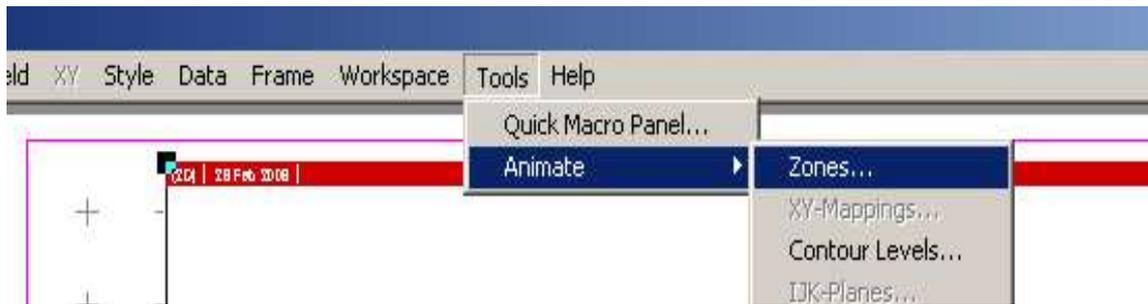
4.21. Не забудьте поменять координатные оси так, чтобы рисунок занимал максимальную область.



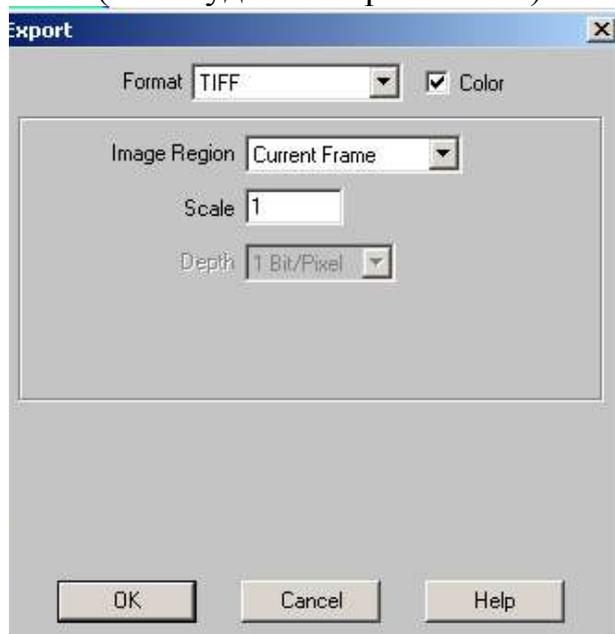
4.22. У вас в итоге появится такой график:



4.23. Для того чтобы посмотреть изменение размера капель со временем и по высоте камеры, надо зайти в Tools-Animate-Zones....:



4.24. Сохраните полученный график. Для этого зайдите в Меню File – Export и выберите формат сохранения вашего графика, к примеру, TIFF (не забудьте выбрать Color)



4.25. Нажмите ОК, выберите свою папку, в которую вы хотите сохранить файл и дайте имя сохраняемому файлу, например, «rad1.tiff».

4.26. Сохраните полученный график для трех случаев: начальный, средний и конечный момент времени процесса горения жидкого топлива.

4.27. Также изобразите поля температуры, давления и концентрации углекислого газа по средствам файла «Vigie.plt» или «Vigie.tec» для различных начальных впрыскиваемых масс.

4.28. Постройте в программе Microsoft Excel или Mathcad зависимость максимальной температуры в камере сгорания от максимальной концентрации CO₂ для различных начальных впрыскиваемых масс на одном графике.

4.29. Сравните полученные результаты и выберите оптимальный случай впрыскивания массы. Сделайте выводы.

5 Контрольные вопросы

- 5.1. Как влияет значение массы впрыскиваемого жидкого топлива на распределение капель по радиусам с высотой камеры сгорания?
- 5.2. В каком из исследуемых случаев температура максимальна?
- 5.3. Как влияет значение массы впрыскиваемого жидкого топлива на распределение давления в камере сгорания?
- 5.4. Как влияет значение массы впрыскиваемого жидкого топлива на распределение углекислого газа в камере сгорания?
- 5.5. Какой из исследуемых случаев оптимальный? Почему?

6 Литература

- 6.1 А.С.Аскарова, М.Ж.Рыспаева, И.Э. Волошина. Численное моделирование образования продуктов реакции при сжигании жидких топлив, Вестник КазНУ, серия физическая, №2 (24) 2007, с.3-7
- 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 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.