

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. АЛЬ-ФАРАБИ

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

ФИЗИЧЕСКИЙ ПРАКТИКУМ ПО ФИЗИКЕ ГОРЕНИЯ И ВЗРЫВА

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

Алматы, 2009



Содержание

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1.....	3
Исследование процессов воспламенения и горения жидкого топлива в камере сгорания.....	3
1 Краткое теоретическое введение.....	3
1.1 Особенности горения жидкого топлива.....	4
2 Основные уравнения.....	6
.....	10
3 Постановка задачи.....	10
4 Порядок выполнения работы.....	11
5 Контрольные вопросы.....	21
6 Литература.....	21

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Исследование процессов воспламенения и горения жидкого топлива в камере сгорания

Цель работы: исследование воспламенения и горения жидкого топлива и выделения сажи 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

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.

Жидкое топливо сгорает всегда в паровой фазе. Дело в том, что температура кипения жидких топлив не превышает несколько сот градусов, а температура пламени получается высокой. Жидкое топливо предварительно испаряется, а затем воспламеняется и сгорает в паровой фазе (испарение и горение могут идти параллельно).

В технических устройствах жидкое топливо распыляется форсунками того или иного типа и затем поступает в факел в виде капель. Распыл всегда полидисперсен. Очень мелкие капли успевают полностью испариться при прогреве, и пары образуют с окислителем газовую смесь. Эта смесь воспламеняется. Более крупные капли горят в процессе испарения, они могут окружаться собственными факелами.

Как и в случае горения СО около поверхности углеродной частицы, для оценки влияния горения паров непосредственно у поверхности капли (в пограничном слое или приведенной пленке) можно воспользоваться критерием Семенова $Se = \frac{\sqrt{kD}}{\alpha_D}$, где k = константа скорости реакции горения паров (в предположении первого порядка реакций); D – коэффициент диффузии кислорода в газовой фазе (среднее значение).

При небольших значениях критерия Семенова роль горения паров в пограничном слое невелика, основное количество паров выносится в окружающий газовый объем и сгорает там по законам газового горения. Это происходит в случае мелких капель, когда велико значение коэффициента диффузионного обмена $\alpha_D = \frac{Nu_d D}{\delta}$, где δ - диаметр капли. При $Se \rightarrow 0.4$ можно полностью пренебречь горением паров в пограничном слое у поверхности капли, так же как и с горением СО в пограничном слое у поверхности углеродной частицы.

Напротив, при больших значениях критерия Семенова пары интенсивно выгорают в пределах пограничного слоя. Пары, встречаясь с кислородом, мгновенно реагируют и сгорают в очень тонкой зоне (практически на поверхности горения). В этой зоне достигается относительно высокая температура горения T_a . Тепло, подводимое к поверхности, затрачивается на прогрев жидкости, её испарение и нагрев паров.[1]

1.1 Особенности горения жидкого топлива

Горение жидкостей со свободной поверхностью представляет собой сложный процесс, протекающий в условиях взаимоналожения влияния гидродинамических, тепловых и кинетических факторов. Согласно существующим представлениям механизм горения жидкости заключается в следующем. При нагреве и испарении жидкости над свободной поверхностью формируется конвективная струя, в которой происходит смещение (ламинарное и турбулентное) пара с содержащимся в окружающей среде окислителем. При наличии в поле течения устойчивых поджигающих точек в паровой струе протекают интенсивные химические реакции, которые локализуются в узкой высокотемпературной зоне – фронте пламени. Выделяющаяся на фронте теплота

расходуется на нагрев газообразных продуктов сгорания, а также на нагрев и испарение жидкости, что обеспечивает непрерывность процесса.

Заметное влияние на процесс горения в резервуарах конечных размеров оказывает теплообмен между жидкостью и стенками, а также свободное конвективное движение жидкости, ведущее к интенсивному ее перемешиванию и образованию гомотермического слоя вблизи свободной поверхности.

Характерная особенность процесса горения конечной массы жидкости - нестационарность. Она обусловлена выгоранием жидкости, перемещением свободной поверхности и фронта и пламени и соответствующей перестройкой температурных полей в жидкой и газообразной фазе.

Оценки, основанные на предположении об определяющей роли температуропроводности среды в формировании структуры релаксационных зон, показывают, что при достаточно низких давлениях газа, когда его плотность намного ниже плотности жидкости, время тепловой релаксации τ_1 в газе существенно меньше времени тепловой релаксации τ_2 в жидкости, т. е.

$\tau_1/\tau_2 \approx \lambda_1 p_1 / \lambda_2 p_2 \ll 1$. Это позволяет пренебречь инерционностью газовой фазы в сравнении с инерционностью жидкой и описывать процессы тепло - и массопереноса в газе в квазистационарном приближении. Что касается эволюции температурного поля в жидкости, то она зависит от характера процесса (стационарный, нестационарный) и определяется отношением толщины слоя жидкости δ к толщине зоны тепловой релаксации δ ($\delta/\delta_T \leq 1$ - нестационарный, $\delta/\delta_T \geq 1$ - квазистационарный, $\delta/\delta_T \rightarrow \infty$ - стационарный процесс).

В соответствии с описанной выше схемой расчет процесса горения жидкости - определение гидродинамической, тепловой и концентрационной структуры факела, распределение температуры в жидкости, а также скорости горения - сводится к интегрированию уравнений движения и неразрывности, уравнений энергии и диффузий с нелинейными функциями источников теплоты и вещества, отражающими протекание химических реакций в парогазовой смеси, и уравнения теплопроводности для жидкости. Так как значения характерных параметров на границах раздела не являются заданными, то решение системы уравнений переноса проводится при неизвестных априори температуре и концентрации на свободной поверхности и фронте пламени. Неизвестны также и

координаты фронта пламени. Все эти параметры определяются в процессе решения из дополнительных соотношений - уравнений материального и теплового баланса на поверхностных раздела. Такой расчет сопряжен со значительными трудностями, существенно ограничивающими возможность аналитического исследования горения жидкостей.[2]

2 Основные уравнения

Математическая модель задачи о дисперсии и горении впрыска топлива [3] 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 :

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

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:

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

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

уравнения к-ε модели турбулентности:

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

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \bar{\nabla}(\rho \bar{u} \varepsilon) = -\left(\frac{2}{3} c_{\varepsilon 1} - c_{\varepsilon 3} \right) \rho \varepsilon \bar{\nabla} \bar{u} + \bar{\nabla} \left[\left(\frac{\mu}{Pr_\varepsilon} \right) \bar{\nabla} \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} \left[c_{\varepsilon 1} \bar{\sigma} : \bar{\nabla} \bar{u} - c_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + c_s \dot{W}^s \right] \quad (5)$$

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:

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

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:

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

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

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

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

\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:

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

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

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

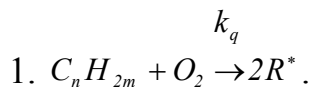
$$\begin{aligned} \dot{Q}^S = & -\int f \rho_p \left\{ 4\pi r^2 R \left[I(T_p) + \frac{1}{2} (\bar{u}_p - \bar{u})^2 \right] + \right. \\ & \left. + \frac{4}{3} \pi r^3 \left[c(T_p) + (\bar{F} - \bar{g})(\bar{u}_p - \bar{u} - \bar{u}') \right] \right\} d\bar{u}_p dr dT_p dy dy, \end{aligned}$$

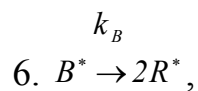
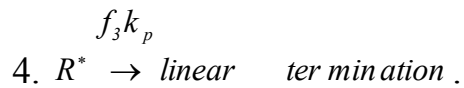
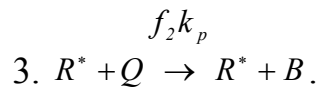
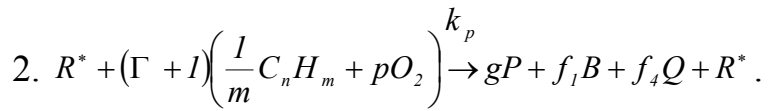
$$\dot{Q}^C = \sum_r \sum_m (a_{mr} - b_{mr}) (\Delta h_f^0)_m \dot{\omega}_r.$$

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

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 [4]. Эта модель состоит из следующих реакций:





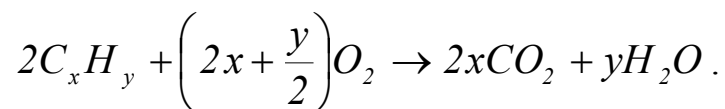
где R^* - все радикалы, B - агент ветвления, Q - промежуточный продукт.

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:

$$8. Q \rightarrow \frac{k_Q M_Q}{M_{Pr_s}} Pr_s,$$

$$9. Q \rightarrow \frac{k_S M_Q}{M_S} S,$$

$$10. S \rightarrow \frac{k_{OX} M_S}{M_{Pr_s}} Pr_s,$$

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

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.

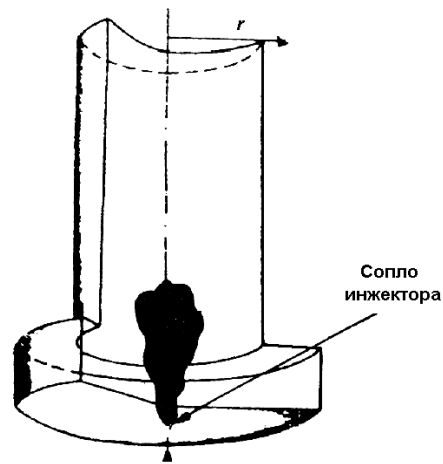


Рис.1. Геометрия камеры сгорания.

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 «soot». Откройте файл «ITARE» в программном редакторе ConTEXT или UltraEdit.
- 4.4. 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:

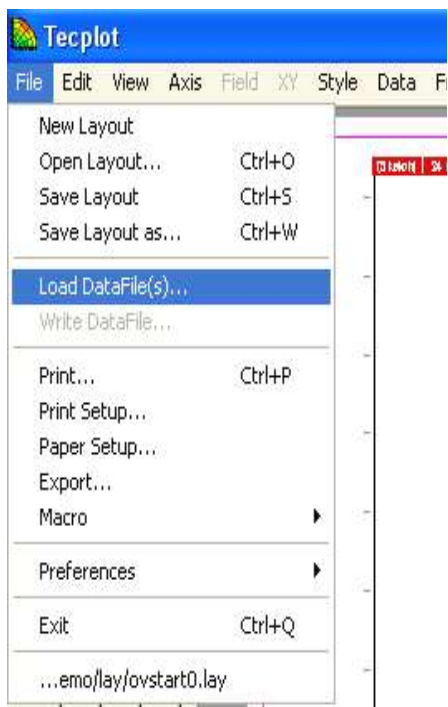
am7 2 37 0 0 0 0 0 0 0 0 0

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

- 4.5. 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 «soot».
- 4.6. Повторите пункты 2-5 для каждой исследуемой массы, каждый раз прибавляя к получившейся массе, впрыскиваемого топлива 0,01г до тех пор пока масса достигнет значения равного 0,05г.
- 4.7. После окончания вычисления вы получите несколько файлов с данными расчета. Убедитесь в правильности расчетов, для этого откройте файл «Out.59» в программном редакторе ConTEXT или UltraEdit. В конце файла должна появиться строка: «NORMAL TERMINATION».
- 4.8. В файле «Out.12» необходимо найти и выписать данные по воспламенению (ignition): температура, время и ячейка.

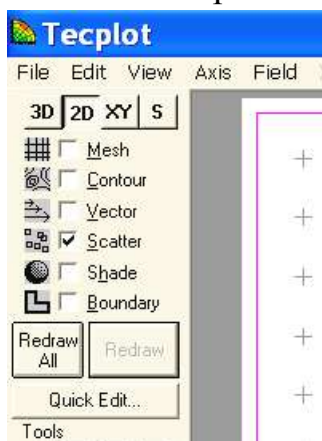
```
1100 degree k ignition at t=0.2592E-03 at cell 91
```

- 4.9. «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.
- 4.10. С помощью программы TecPlot 7 для построения графиков и анимаций получите по два графика: в момент воспламенения 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, концентрации компонентов и продуктов реакции, с помощью файла «Vigie.plt» или «Vigie.tec» для различных начальных впрыскиваемых масс. Для того чтобы построить графики, необходимо сделать следующее:
- 4.11. Запустите TecPlot 7.
- 4.12. В верхнем меню выберите File – Load DataFile(s):

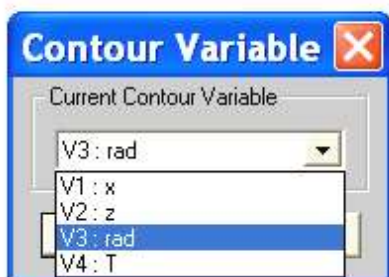


4.13. Откройте вашу папку с полученными файлами и загрузите «Particle.plt» или «Particle.tec».

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



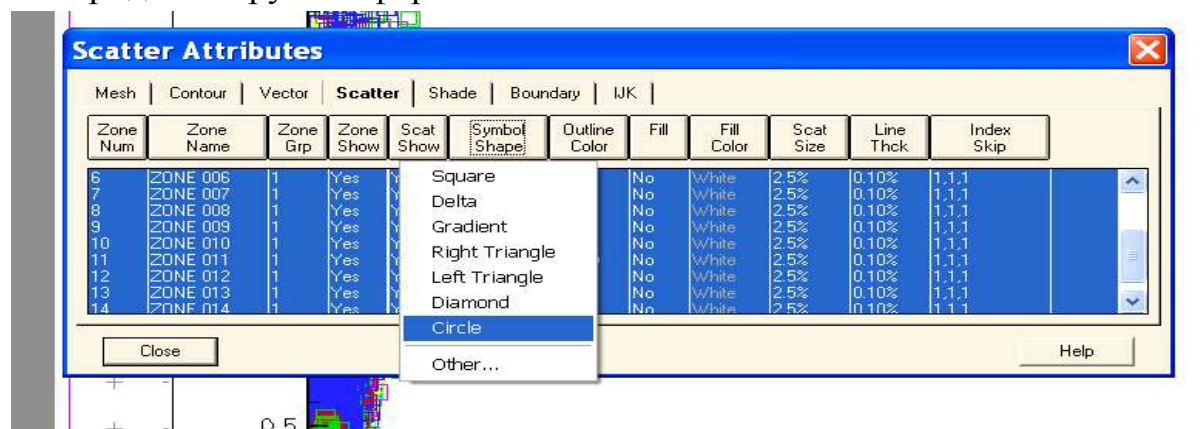
4.15. В появившемся дополнительном окне выберите необходимую вам переменную, по которой будет построено распределение, к примеру, rad - радиус капли:



4.16. Слева внизу выберите Plot Attributes

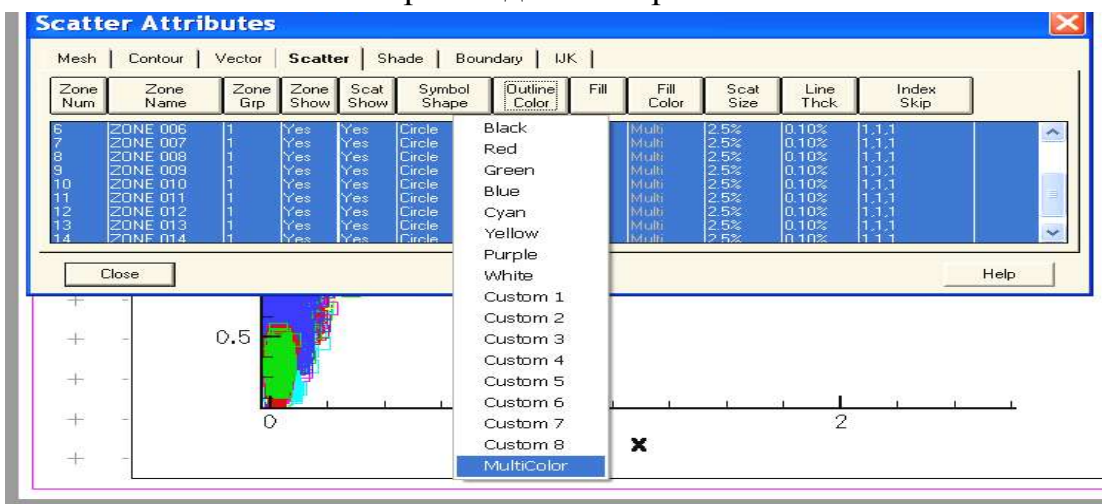


4.17. Выделите все зоны и выберите в «Symbol Shape» «Circle», для придания круглой формы каплям: → «Circle», для

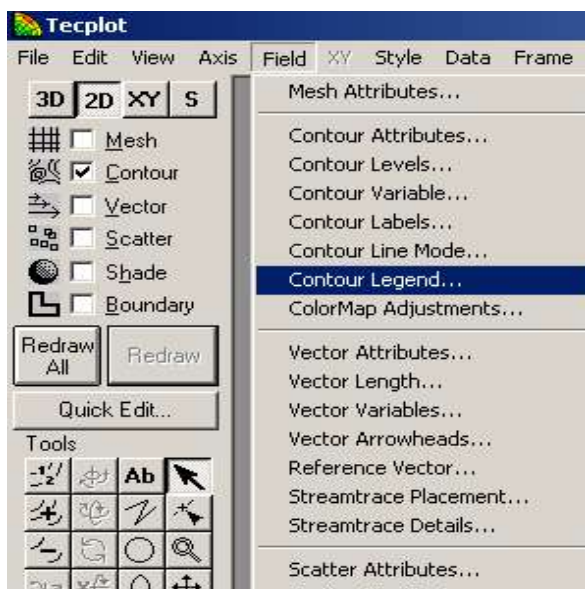


4.18. Нажмите Close, не забудьте после каждого изменения нажимать на кнопку Redraw слева на панели инструментов, чтобы применить изменения.

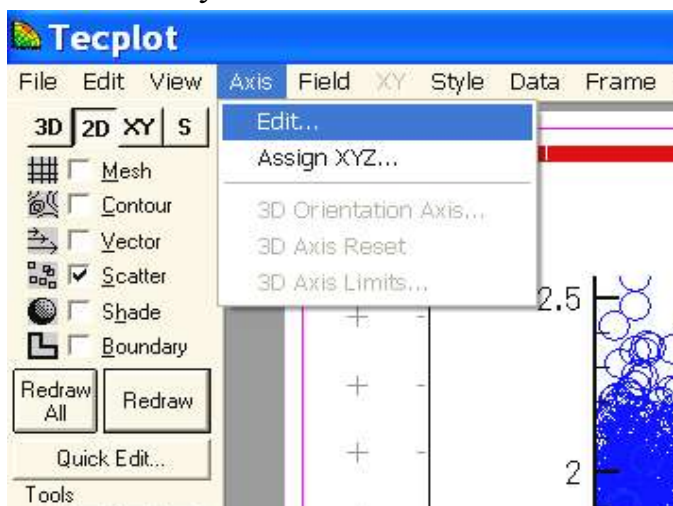
4.19. Выберите в «Outline Color» цветную «Multicolor». В меню «Fill», «Fill color» и «Scat Size» выберите один из вариантов.



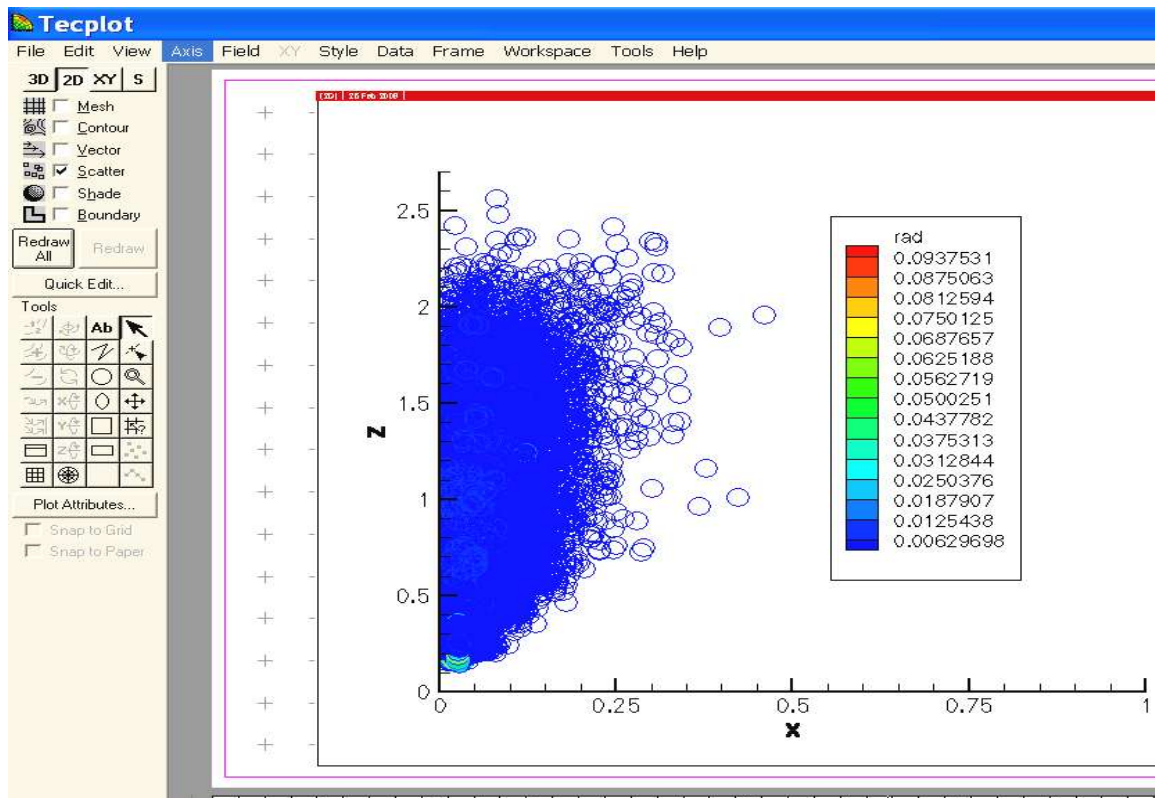
4.20. Затем выберите в меню Field – Contour Legend:



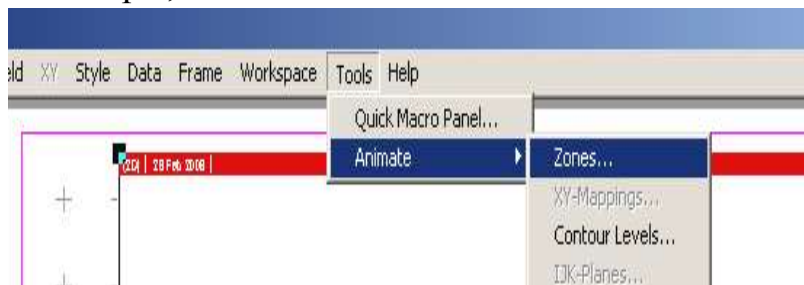
- 4.21. В появившемся окне выберите Show Contour Legend, закройте данное окно и снова нажмите на кнопку Redraw.
- 4.22. Не забудьте поменять координатные оси так, чтобы рисунок занимал максимальную область.



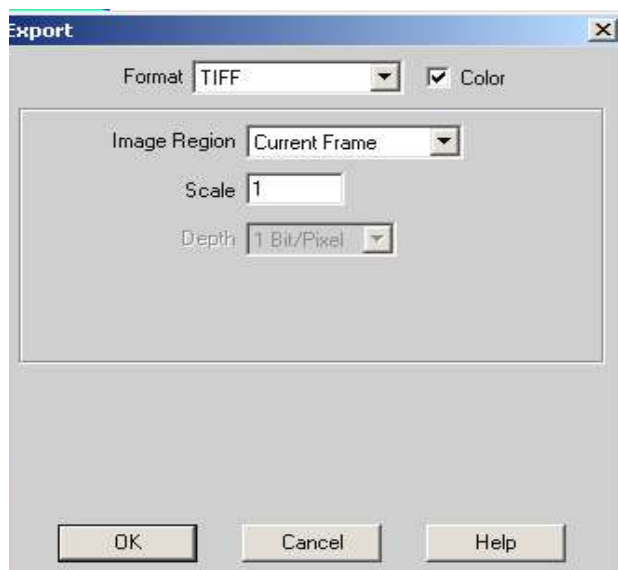
- 4.23. У вас в итоге появится такой график:



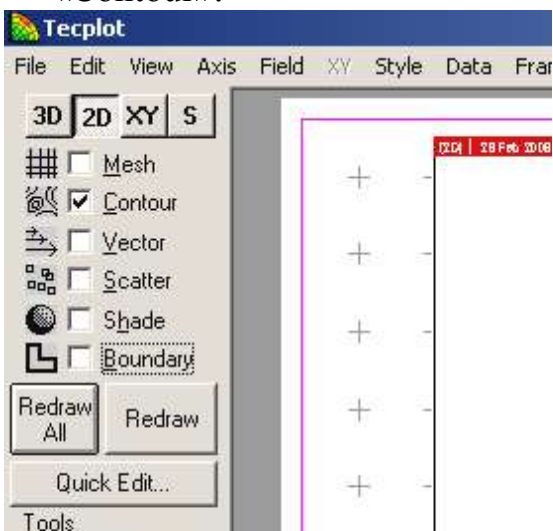
4.24. Для того чтобы посмотреть изменение размера капель со временем и по высоте камеры, надо зайти в Tools-Animate-Zones...:



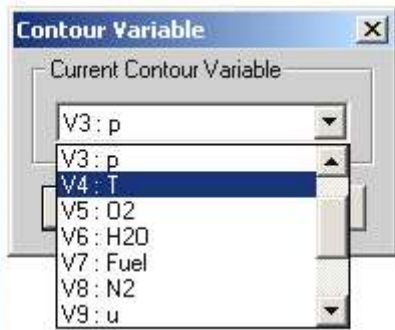
4.25. Сохраните полученный график. Для этого зайдите в Меню File – Export и выберите формат сохранения вашего графика, к примеру, TIFF (не забудьте выбрать Color)



- 4.26. Нажмите ОК, выберите свою папку, в которую вы хотите сохранить файл и дайте имя сохраняемому файлу, например, «rad1. tiff».
- 4.27. Также изобразите поля температуры, концентрации компонентов и продуктов реакции, по средствам файла «Vigie.plt» или «Vigie.tec» для различных начальных впрыскиваемых масс.
- 4.28. Откройте вашу папку с полученными файлами и загрузите «vigie.plt» (Vigie.tec).
- 4.29. В программе Tecplot 7 на левой верхней панели инструментов выберите «Contour»:



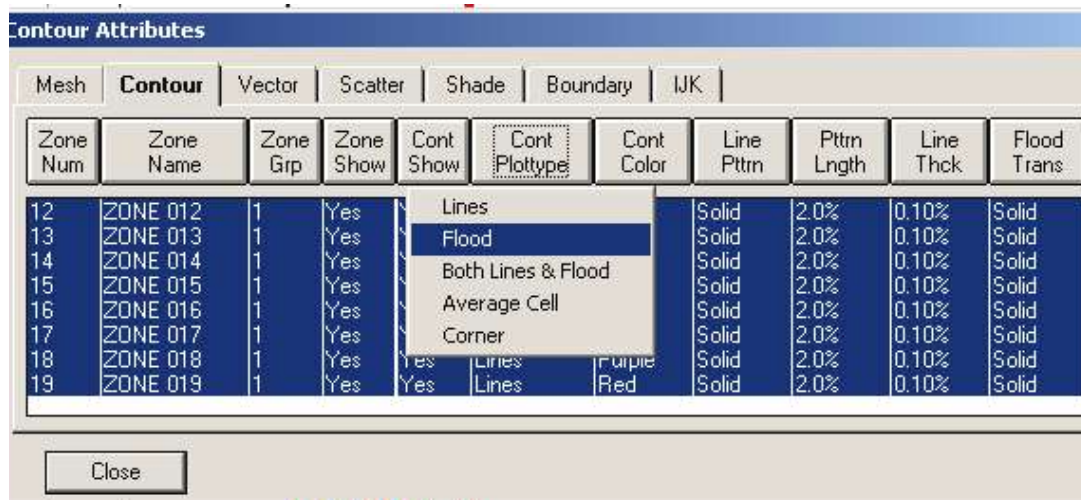
- 4.30. В появившемся дополнительном окне выберите необходимую вам переменную, к примеру, температуру:



4.31. Слева внизу выберите Plot Attributes

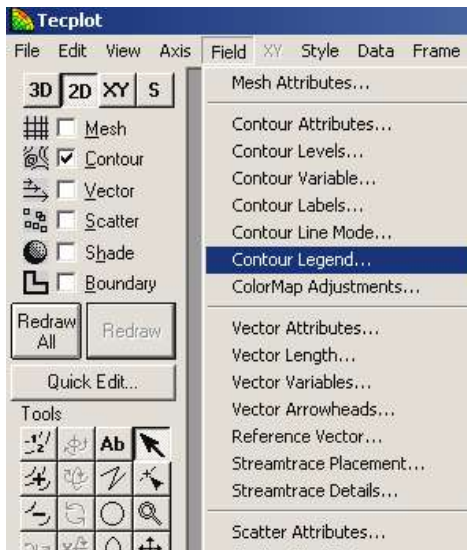


4.32. Выделите все зоны и выберите в «Cont Plotype» вид линий «Flood»:



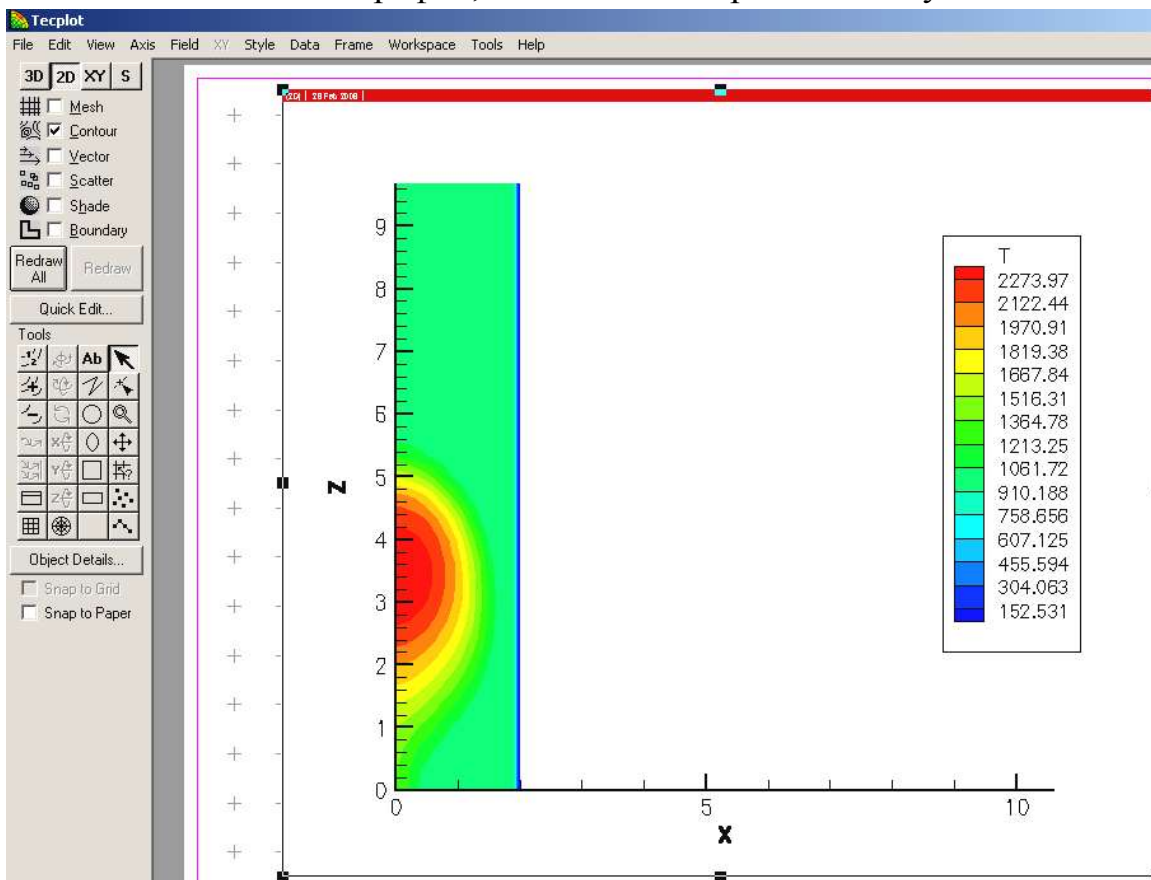
4.33. Нажмите Close, не забудьте после каждого изменения нажимать на кнопку Redraw слева на панели инструментов.

4.34. Затем выберите в меню Field – Contour Legend:

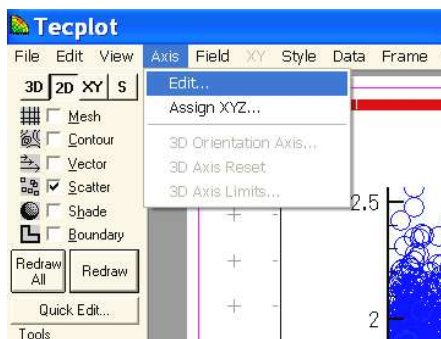


4.35. В появившемся окне выберите Show Contour Legend, закройте данное окно и снова нажмите на кнопку Redraw.

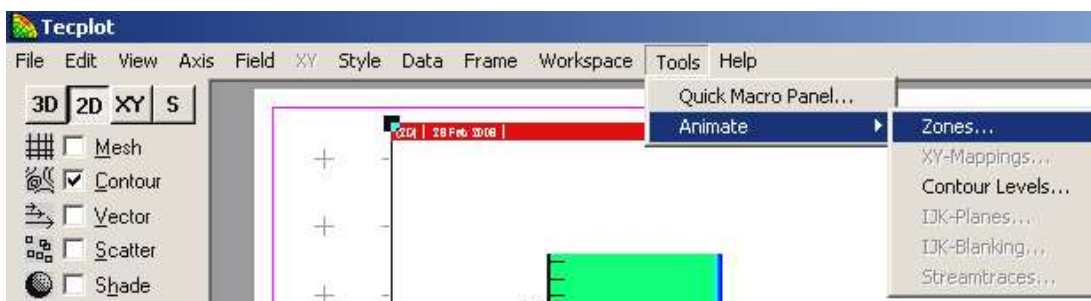
4.36. У вас в итоге появится график, аналогичный приведенному ниже:



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

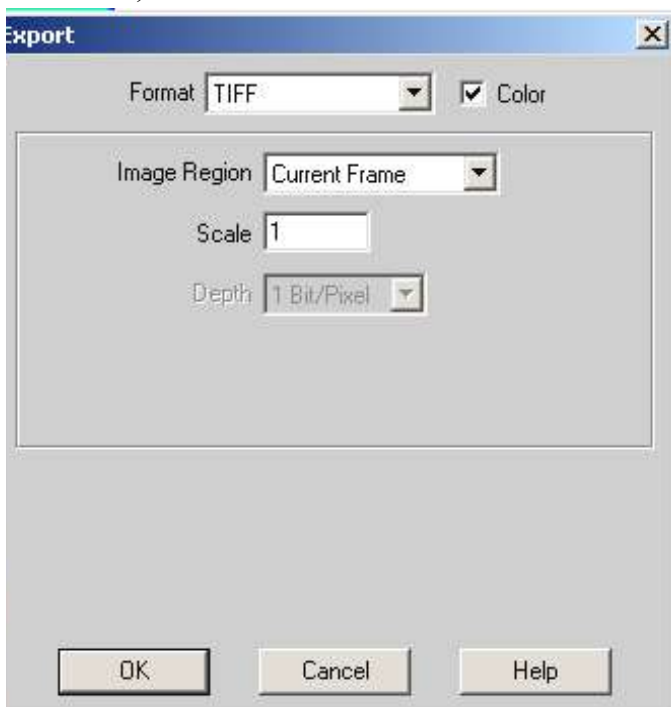


4.37. Для того чтобы посмотреть изменение температуры со временем, надо зайти в Tools-Animate-Zones...:



4.38. Для идентификации времени воспламенения со соответствующей зоной, необходимо открыть файл «vigie.plt» в программном редакторе ConTEXT или UltraEdit.

4.39. Сохраните полученный график температуры в момент воспламенения и конечный момент процесса горения. Для этого зайдите в Меню File – Export .. и выберите формат сохранения вашего графика, к примеру, TIFF (не забудьте выбрать Color)



4.40.Нажмите ОК, выберите папку, в которую вы хотите сохранить файл и дайте имя сохраняемому файлу, например, «temp.tiff» (он будет иметь расширение *.tiff).

4.41. 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 В. В. Померанцев “Основы практической теории горения ” 1973г.

6.2 Л. П. Ярин, Г. С. Сухов “Основы теории горения двухфазных сред” 1987г.

6.3 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

6.4 Gorokhovski M. and Borghi R. Model of soot formation and oxidation in diesel engines. Journal of diesels, Transactions of SAE, 1993, 930075.

6.5 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

6.6 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.