

# Лабораторные работы по компьютерным методам обработки данных

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



ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2.....	3
Численное исследование влияния скорости впрыска на процесс горения жидкого топлива в цилиндрической камере сгорания.....	3
1 Краткое теоретическое введение.....	3
3 Постановка задачи.....	5
4 Порядок выполнения работы.....	5
5 Контрольные вопросы.....	10
6 Литература.....	11

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

### Численное исследование влияния скорости впрыска на процесс горения жидкого топлива в цилиндрической камере сгорания

**Цель работы:** исследование процесса горения жидкого топлива в зависимости от скорости впрыска в камере сгорания при заданных начальных условиях в разные моменты времени и определение оптимального режима горения с помощью программы KIVA-II.

#### **1 Краткое теоретическое введение**

Численное моделирование горения жидкого топлива становится, в последнее время, всё более актуальным, так как оно позволяет находить общие закономерности в организации процесса горения. [1]

Горение – сложное, быстро протекающее химическое превращение, сопровождающееся выделением значительного количества тепла. Современная физико-химическая теория горения относит к горению все химические процессы, связанные с быстрым превращением и тепловым или диффузионным их ускорением.

Химическая реакция горения в большинстве случаев является сложной, то есть состоит из большого числа элементарных химических процессов. Кроме того, химическое превращение при горении тесно связано с рядом физических процессов – переносом тепла и масс и характеризуется соответствующими гидро- и газодинамическими закономерностями.

Характерная черта горения – способность к пространственному распространению, вследствие передачи тепла или диффузии активных частиц. В первом случае говорят о тепловом, во втором – о диффузионном механизме распространения пламени.

Другая характерная особенность – наличие критических условий, то есть определённых, характерных для данной горючей системы области значений параметров (состав смеси, давление, содержание примесей, начальная температура смеси и т.д.), вне которых реакция горения протекает стационарно, а внутри области – самоускоряется.

Диффузионный механизм горения обычно наблюдается при низких давлениях. Горение широко применяется в технике для получения тепла в топках, печах и камерах сгорания двигателей. При этом очень часто используется так называемое диффузионное горение, при котором распространение пламени определяется взаимной диффузией (кондуктивной или турбулентной) горючего и окислителя.

Для любого вида горения характерны две типичные стадии – воспламенение и последующее сгорание (догорание) вещества до продуктов полного горения. Время, затрачиваемое на обе стадии, составляет общее время горения. Обеспечение минимального суммарного времени горения

при максимальной полноте горения (полноте тепловыделения) – основная задача техники сжигания.

Для технического горения важны также физические процессы подготовки смеси: испарение, перемешивание и т.д. Основные термодинамические характеристики горючей смеси – теплотворная способность и теоретическая (или адиабатическая) температура горения, то есть та температура, которая могла бы быть достигнута при полном сгорании без потерь тепла.

По агрегатному состоянию горючего и окислителя различают:

- гомогенное горение – горение газов и парообразных горючих в среде газообразного окислителя;
- горение взрывчатых веществ и порохов;
- гетерогенное горение – горение жидких и твёрдых горючих в среде газообразного окислителя, либо горение в системе жидкая горючая смесь – жидкий окислитель.

Важнейший вопрос теории горения – распространение пламени (зоны резкого возрастания температуры и интенсивной реакции). Различают нормальное распространение горения, где ведущим процессом является передача тепла теплопроводностью, и детонацию, где поджигание производится ударной волной. Нормальное горение в свою очередь подразделяется на ламинарное и турбулентное.

Ламинарное пламя обладает вполне определённой скоростью перемещения относительно неподвижного газа, которая зависит от состава смеси, давления и температуры и определяется только химической кинетикой и молекулярной теплопроводностью. Эта нормальная скорость является физико-химической константой смеси.

Скорость распространения турбулентного пламени зависит от скорости потока, а также степени и масштаба турбулентности.

В настоящее время проблемы горения широко исследуются учёными всего мира. Нарастающий уровень экологического загрязнения окружающей среды, истощение запасов углеводородного топлива и экономический рост многих стран, обуславливающий повышение спроса на энергию, поставили задачу нахождения наиболее экономичного и экологичного способа сжигания топлива. В связи с этим конструкторы должны добиваться полноты сгорания топлива, близкой к 100%. [2]

В данной лабораторной работе исследуется процесс горения впрыска жидкого топлива в зависимости от скорости впрыска при заданных начальных условиях в разные моменты времени.

**2 Основные уравнения** задачи о горении впрыска топлива включает в себя уравнение неразрывности для компоненты  $m$  (1), уравнение

импульса (2), уравнение энергии (3), уравнения k-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:

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

уравнение энергии:

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

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

уравнения k-ε модели турбулентности:

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

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

Подробнее смотрите лабораторную работу №1.

### 3 Постановка задачи

В данной лабораторной работе необходимо провести вычислительные эксперименты влияния значения скорости впрыскиваемого топлива от 150 м/с до 350 м/с на горение жидкого топлива в цилиндрической камере сгорания (рис.1). Камера сгорания, имеющая радиус R=2 см и высоту H=15 см, заполнена воздухом при температуре T=900K 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.

### 4 Порядок выполнения работы

- 4.1. Создайте папку со своим именем (латинскими буквами) в директории C:\Students. Создайте в своей папке еще 5 папок со соответствующими значениями скорости.
- 4.2. Скопируйте в первую папку файлы «ITARE», «DOS4GW» и «CO2». Откройте файл «ITARE» в программном редакторе ConTEXT или UltraEdit.
- 4.3. Химическая кинетика процесса горения представлена в виде одной химической реакции:  $C_7H_{16} + 11O_2 = 7CO_2 + 8H_2O$ . Чтобы изменить гептан на другое топливо, необходимо в конце файла «ITARE» изменить c7h16. Следует изменить и стехиометрические коэффициенты. am1 – стехиометрические коэффициенты реагентов, bm1 - продуктов реакции.
- 4.4. Проверьте начальные значения температуры и массы, используя приложение 1.
- 4.5. Установите значение начальной скорости впрыска, равной 150 м/с. Необходимо в файл «ITARE» во всех строках «amp0» подставить значение равное 15 000. Сохраните сделанные изменения и запустите файл «CO2».

amp0	amp0
0.0	0.0
22300.0	15000.0
25000.0	15000.0
25500.0	15000.0
22300.0	15000.0
27000.0	15000.0
27400.0	15000.0
29600.0	15000.0
27400.0	15000.0
22300.0	15000.0
20000.0	15000.0
19500.0	15000.0
13200.0	15000.0
8660.0	15000.0
1.0	15000.0

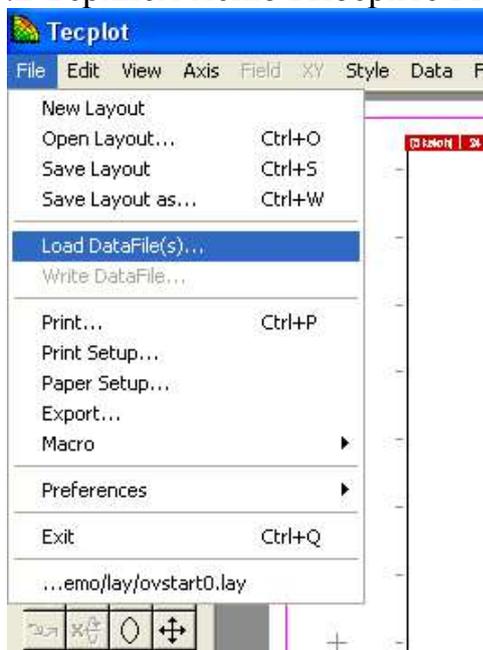


- 4.6. Повторите пункты 2-5 для каждой исследуемой скорости, каждый раз прибавляя к получившейся 50 м/с до тех пор, когда скорость достигнет значения равного 350 м/с.
- 4.7. После окончания вычисления вы получите несколько файлов с данными расчета. «Vigie.plt» или «Vigie.tec» – в этом файле содержатся 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.
- 4.8. 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 и продуктов реакции, с помощью файла «Vigie.plt» или «Vigie.tec» для различных скоростей впрыска. Для того чтобы построить графики, необходимо сделать следующее:

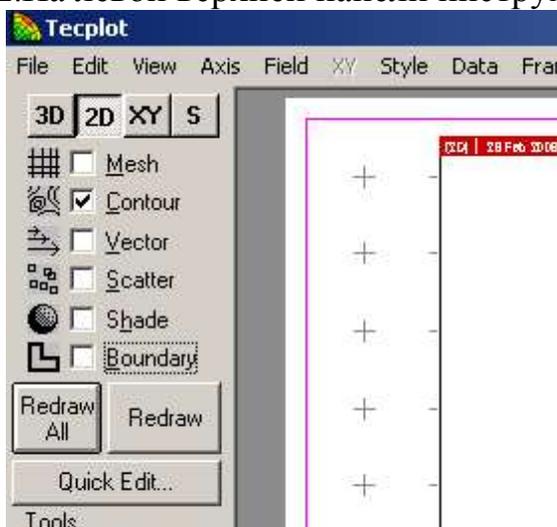
4.9. Запустите TecPlot 7.

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

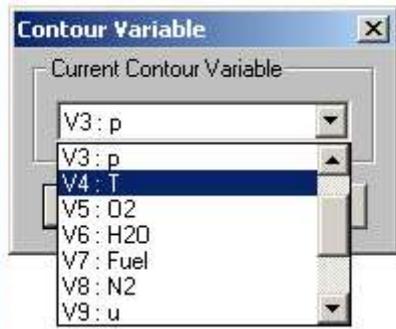


4.11. Откройте вашу папку с полученными файлами и загрузите «vigie.plt» (Vigie.tec).

4.12. На левой верхней панели инструментов выберите «Contour»:



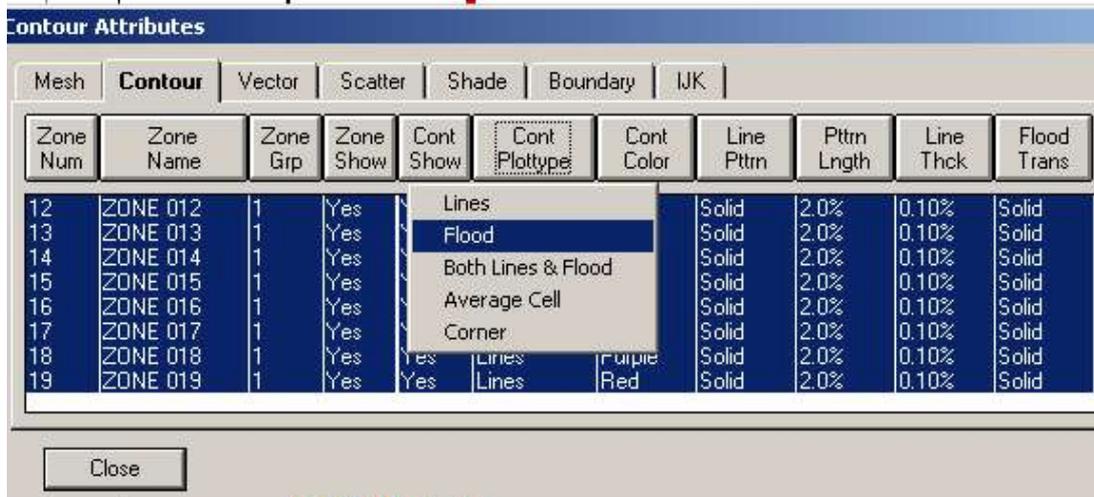
4.13. В появившемся дополнительном окне выберите необходимую вам переменную, к примеру, температуру:



4.14. Слева внизу выберите Plot Attributes

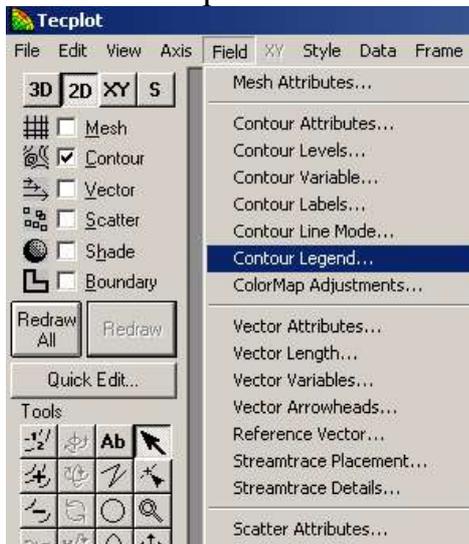


4.15. Выделите все зоны и выберите в «Cont Plottуре» вид линий «Flood»:



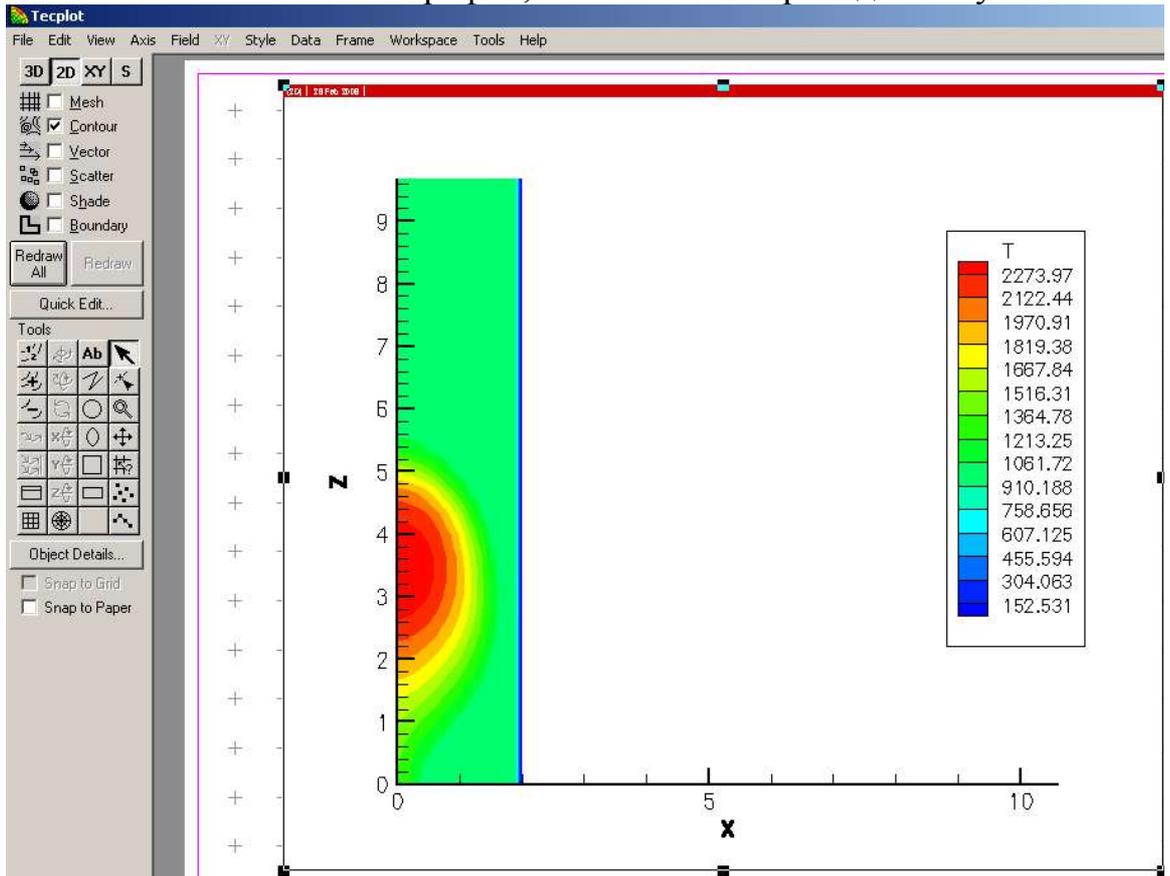
4.16. Нажмите Close, не забудьте после каждого изменения нажимать на кнопку Redraw слева на панели инструментов.

4.17. Затем выберите в меню Field – Contour Legend:

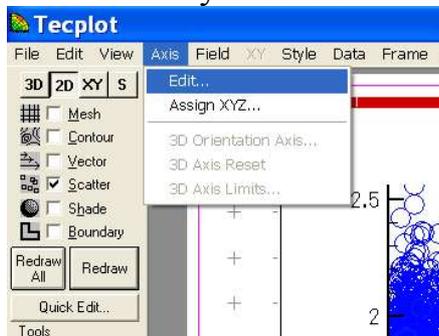


4.18. В появившемся окне выберите Show Contour Legend, закройте данное окно и снова нажмите на кнопку Redraw.

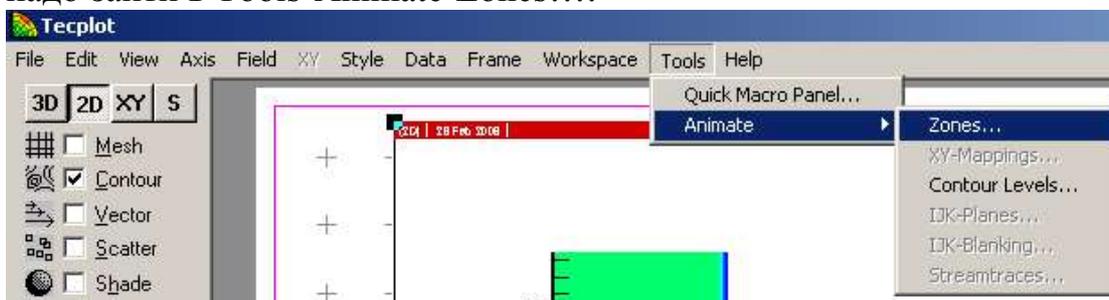
4.19. У вас в итоге появится график, аналогичный приведенному ниже:



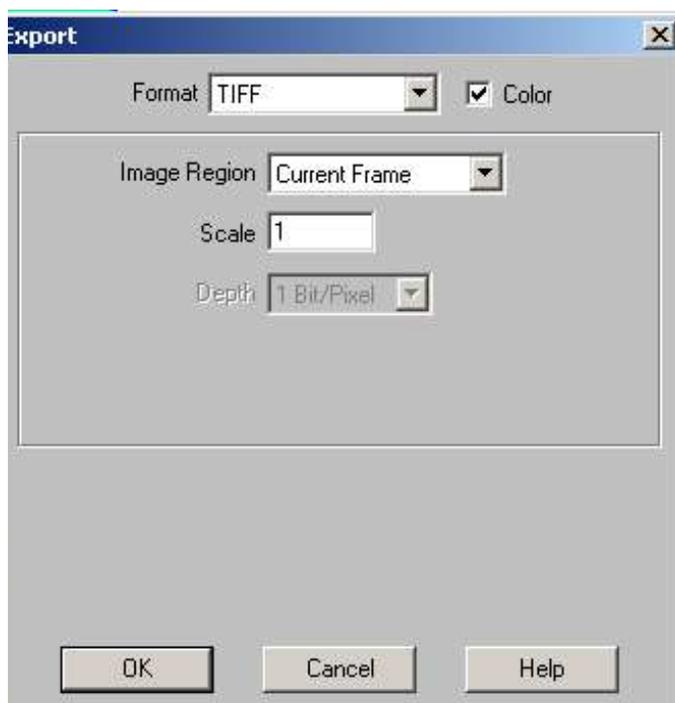
4.1. Не забудьте поменять координатные оси так, чтобы рисунок занимал максимальную область.



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



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



- 4.22. Нажмите ОК, выберите папку, в которую вы хотите сохранить файл и дайте имя сохраняемому файлу, например, «temp.tiff» (он будет иметь расширение \*. tiff).
- 4.23. Постройте графики для концентрации продуктов реакции аналогично пунктам 4.9 - 4.22 для различных скоростей впрыска.
- 4.24. Постройте в программе Microsoft Excel или Mathcad две кривые: максимальная температуры в камере сгорания от максимальной концентрации  $\text{CO}_2$  и максимальная температуры в камере сгорания от максимальной концентрации  $\text{H}_2\text{O}$  для различных скоростей впрыска на одном графике.
- 4.25. Сравните полученные результаты. Какие выводы вы можете сделать?

## **5 Контрольные вопросы**

- 5.1. Назовите сложности численного моделирования процесса горения жидкого топлива. Опишите математическую модель этого процесса.
- 5.2. Как влияет значение скорости впрыскиваемого жидкого топлива на распределение температуры в камере сгорания?
- 5.3. Как влияет значение скорости впрыскиваемого жидкого топлива на распределение концентрации воды в камере сгорания? Объясните наличие воды и ее агрегатного состояния при сгорании топлива.
- 5.4. Как влияет значение скорости впрыскиваемого жидкого топлива на распределение углекислого газа в камере сгорания?
- 5.5. Какой из исследуемых случаев организации процесса горения жидкого топлива наиболее 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 А.С.Аскарова, М.Ж.Рыспаева, И.Э.Волошина, Е.С.Невский. Исследование процесса горения жидкого топлива при изменении скорости впрыскиваемых капель. Вестник КазНУ, серия физическая, № 1(25) 2008, с. 3-7.
- 6.3 Gorokhovski M. and Borghi R. Model of soot formation and oxidation in diesel engines. Journal of diesels, Transactions of SAE, 1993, 930075.
- 6.4 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
- 6.5 Ярин Л.П., Сухов Г.С. Основы теории горения двухфазных сред.-Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1987. – 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, 160