

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. АЛЬ-ФАРАБИ
ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

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

Физический практикум по физике горения и взрыва

для студентов высших учебных заведений

Алматы
2009

СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3.....	3
ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ МЕТАНА	3
В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ.....	3
1 Краткое теоретическое введение.....	3
2 Основные уравнения.....	4
3 Постановка задачи.....	5
3.1 Описание программы (файла со входными данными «ITARE»).....	6
4 Порядок выполнения работы.....	6
5 Контрольные вопросы.....	10
6 Литература.....	10

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Численное исследование процесса горения метана

в цилиндрической камере сгорания

Цель работы: численное решение задачи о горении турбулентной струи метана и исследование влияния горения на ее основные характеристики в цилиндрической камере сгорания при заданных начальных условиях и определение оптимального режима горения.

1 Краткое теоретическое введение

В настоящее время уделяется большое внимание научному проектированию химических реакторов и установок, в которых имеют место явления химического превращения, осложненные процессами турбулентного тепло - и массопереноса. В рассматриваемых системах протекают сложные физико-химические процессы, составляющими которых являются: движение потоков газа, массоперенос, теплоперенос, химическое превращение.

В центре внимания многочисленных исследований процессов химического превращения в условиях турбулентности находится вопрос о влиянии газодинамических характеристик смешивающихся турбулентных потоков на условия протекания химических процессов, а также на возможности управления этими процессами с помощью различных внешних воздействий. Известно, что знание только средних значений таких пульсирующих величин, как скорость, температура, концентрации реагирующих компонентов и продуктов реакции недостаточно для полного описания сложных процессов химического превращения в условиях неизотермичности и турбулентности даже в тех случаях, когда влиянием химической реакции на газодинамические характеристики системы можно пренебречь.

Сильное и неоднозначное взаимодействие между химией и динамикой жидкостей и газов серьезно усложняет как экспериментальное исследование реагирующих течений, так и создание более или менее строгой теории. Поэтому для предсказания и изучения поведения таких сложных систем может быть успешно использовано численное моделирование. Экспериментальные наблюдения и приближенные теоретические модели предлагают законы, которым должна подчиняться физическая система. С помощью численных экспериментов можно проверить выполнение этих законов, получить количественные предсказания и сравнить эти предсказания с результатами известных экспериментов.

Строгий количественный расчет диффузионного турбулентного факела конечного размера очень сложен, однако именно эта задача представляет наибольший практический интерес. Как показывает анализ научных публикаций, строгая теория турбулентного горения в данный момент далека от за-

вершения. Существуют различные подходы моделирования турбулентных реагирующих систем, требующие дальнейшего развития и уточнения, а также применения их для решения конкретных задач.

2 Основные уравнения

Математическая модель задачи о дисперсии и горении топлива [1-5] 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:

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

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

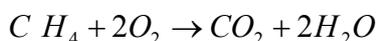
где $\bar{\sigma} : \bar{\nabla} \bar{u} = \sigma_{ij} e_{ij}$, $\sigma_{ij} = 2\mu e_{ij} - \frac{2}{3} \mu e_{kk} \delta_{ij}$, $i, j, k = 1, 2, 3$, $e_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$.

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

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

3 Постановка задачи

В данной лабораторной работе исследуется влияние скорости метана на процессы воспламенения и горения. Топливо смешиваются с окислителем (воздухом в камере сгорания), данная смесь газов воспламеняется и очень быстро сгорает. Реакция горения метана с образованием воды и углекислого газа:



Процесс горения является гомогенным.

Метан — простейший углеводород, бесцветный газ без запаха, химическая формула — CH_4 (рис.1). Малорастворим в воде, легче воздуха. При использовании в быту, промышленности в метан обычно добавляют одоранты со специфическим «запахом газа». Взрывоопасен при концентрации в воздухе от 5 % до 15 %. Самая взрывоопасная концентрация 9,5 %. Горит в воздухе голубоватым пламенем, при этом выделяется энергия около 39 МДж на 1 м^3 . С воздухом образует взрывоопасные смеси при объемных концентрациях от 5 до 15 процентов. При температуре выше 1400°C разлагается по реакции: $2CH_4 = C_2H_2 + 3H_2$. Окисляется до муравьиной кислоты при $150\text{—}200^\circ\text{C}$ и давлении 30-90 атм. по цепному радикальному механизму: $CH_4 + 3[O] = HCOOH + H_2O$.

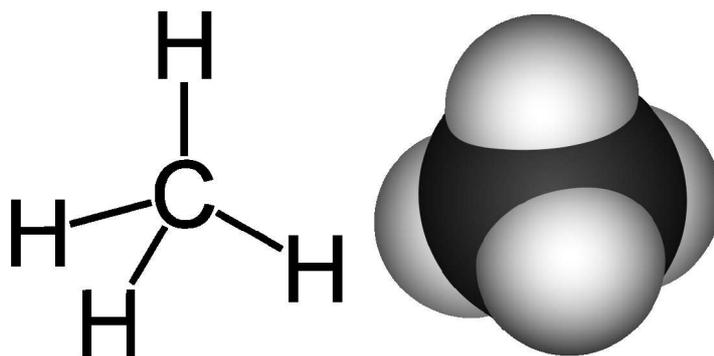


Рис.1. Химическая формула и вид молекулы метана [6].

Топливо при температуре 300К распыляется в камеру сгорания через круглое сопло, расположенное в центре нижней части камеры. Камера сгорания представляет собой цилиндр (рис.2) высотой 8 см и радиусом 2 см, заполненный воздухом при температуре 900К и при давлении 32 Бара.

Процесс горения метана является быстро протекающим, и его длительность не превышает в среднем 4 мс.

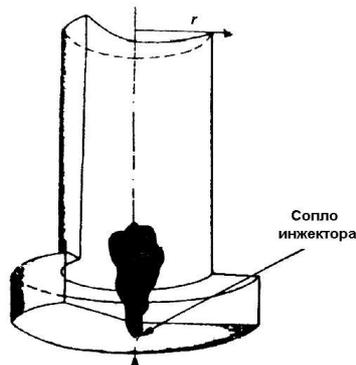


Рис.2. Геометрия камеры сгорания.

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

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

```
t3aaa k053190 20x1x22 2-d baseline, w/ qsou, chemeq 053190
  irest      0
  ipost      1
  nx         20
  ny         1
  nz         30
```

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:

c7h16 rho1 0.0

запишите:

ch4 rho1 0.0

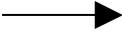
Запишите химическую реакцию для данного вида топлива, найдите стехиометрические коэффициенты реакции и поменяйте их значения. (см. лабораторная работа №1).

4.3 Для перехода численного расчета от жидкого топлива к газу, измените значения строк, соответствующих учету разрыва, испарения и слияния жидких капель:

breakup	1.0	на	breakup	0.0
evapp	1.0		evapp	0.0
kolide	1		kolide	0

4.4 Установите значение начальной скорости впрыска, равной 150 м/с. Необходимо в файл «ITARE» во всех строках «amp0» подставить значение равное 15 000.

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



amp0	0.0
	15000.0
	15000.0
	15000.0
	15000.0
	15000.0
	15000.0
	15000.0
	15000.0
	15000.0
	15000.0
	15000.0
	15000.0
	15000.0
	15000.0
	15000.0

Сохраните сделанные изменения и запустите файл «CH4.exe».

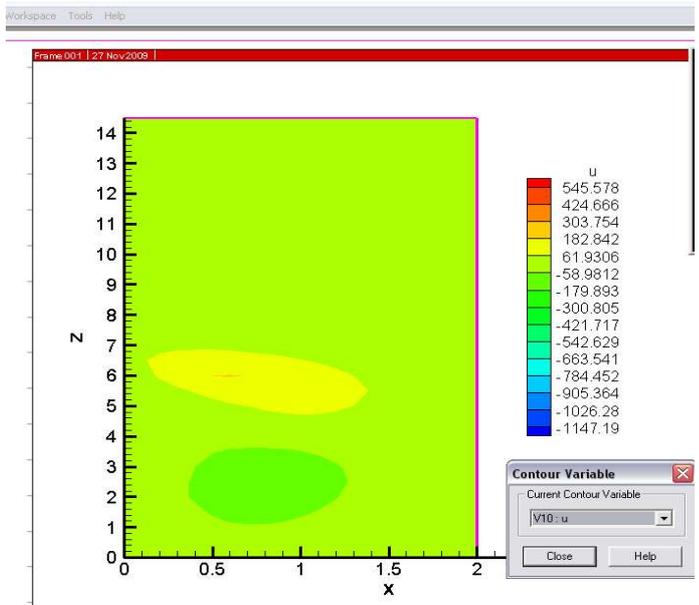
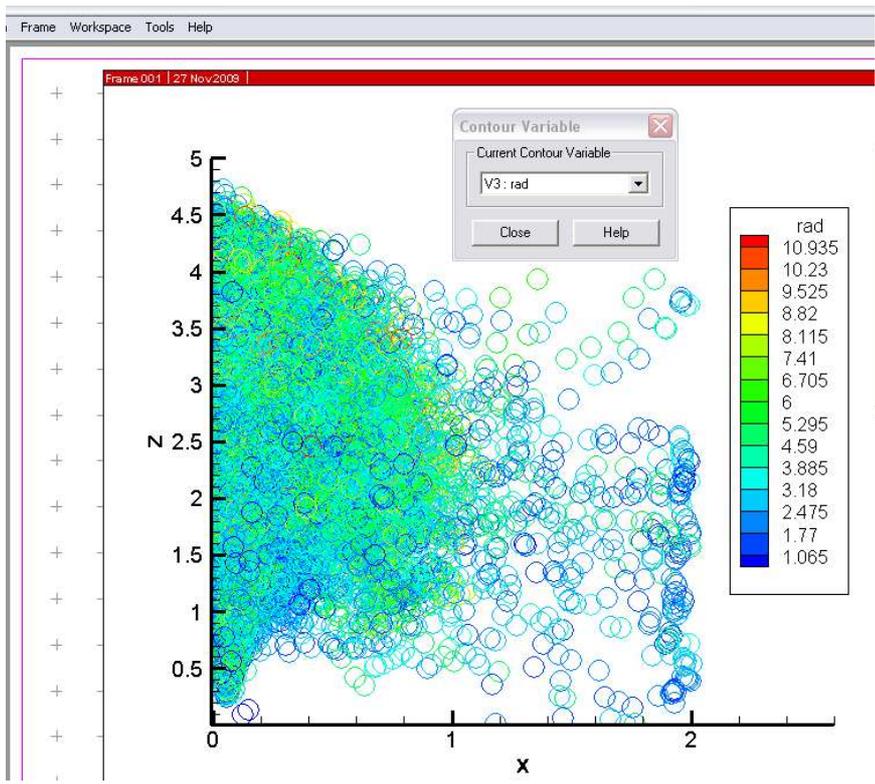
4.5 Повторите пункты 2-4 для каждой исследуемой скорости, каждый раз прибавляя к полученной 50 м/с до тех пор, когда скорость достигнет значения равного 350 м/с.

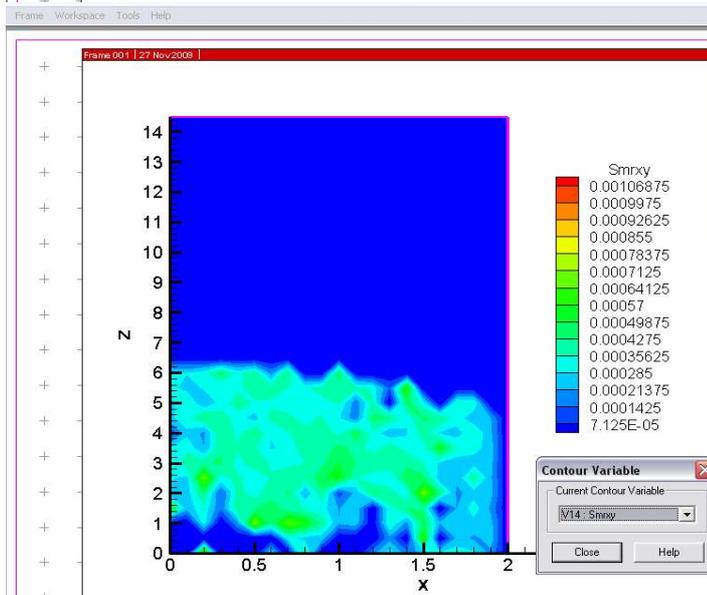
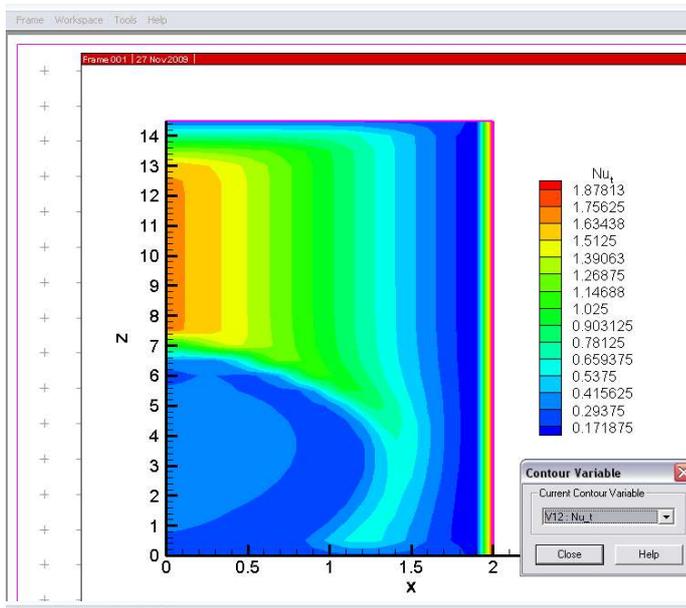
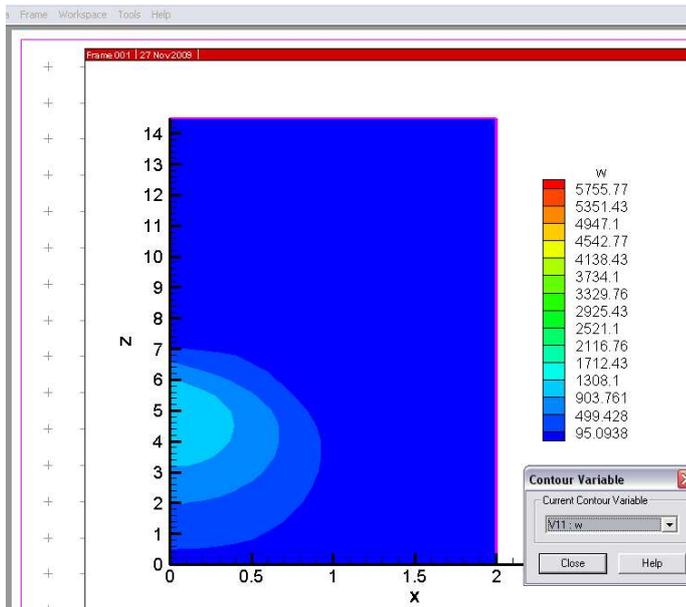
4.6 После окончания вычисления вы получите несколько файлов с данными расчета. «Vigie.plt» или «Vigie.tec» – в этом файле содержатся данные для газа: поля концентрации компонентов реакции, скоростей, температуры и давления. «Particle.plt» или «Particle.tec» - файл, содержащий следующие данные: координаты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

4.7 С помощью программы TecPlot 7 получите для различных скоростей впрыска в момент воспламенения графики распределения размера частиц 'rad', а также распределения скоростей 'u', 'w', числа Нуссельта 'Nu' и 'Smr' Саутеровского среднего радиуса r_{32} :

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

4.8 Для того чтобы построить графики, необходимо воспользоваться программой TecPlot 7. (Подробнее смотрите лабораторную работу №1). У вас получатся такие графики:





4.9 Постройте в программе Microsoft Excel или Mathcad кривые: зависимость максимальной температуры в камере сгорания от давления, максимальной концентрации O_2 и N_2 , для различных значений впрыска.

4.10 Оформите лабораторную в программе Microsoft PowerPoint и сравните полученные результаты. Какие выводы вы можете сделать?

5 Контрольные вопросы

5.1 Дайте определение процесса горения. Назовите виды горения. Приведите примеры.

5.2 Назовите сложности численного моделирования процесса горения метана. Опишите математическую модель этого процесса.

5.3 Как скорость впрыска метана влияет на процессы его самовоспламенения и горения?

5.4 Какой из исследуемых случаев организации процесса горения наиболее оптимальный? Почему?

6 Литература

1. *Ярин Л.П., Сухов Г.С.* Основы теории горения двухфазных сред.-Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1987. – 240 с.
2. *Основы практической теории горения.* Под ред. В.В.Померанцева. Уч. пособие для студ. высших учебных заведений. Л.: Энергия, 1973г., 264с.
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.
4. *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.
5. Аскарлова А.С., Болегенова С.А., Рыспаева М.Ж., Волошина И.Э. Влияние начальной концентрации топлива на горение ламинарных и турбулентных струй// Вестник КазНУ, №3 (27) серия физическая, 2008. – с. 177-180
6. Свободная энциклопедия Википедия: <http://ru.wikipedia.org>