

ТЕПЛОФИЗИКА

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ СКОРОСТИ ВПРЫСКИВАЕМЫХ КАПЕЛЬ

А.С. Аскарова, И.Э. Волошина, М.Ж. Рыспаева, Е.С. Невский
Казахский национальный университет им. Аль-Фараби, Алматы

Численно исследован процесс горения жидкого топлива в камере сгорания на основе решения дифференциальных двумерных уравнений турбулентного реагирующего течения. Изучено влияние скорости впрыска на горение жидкого топлива.

Введение

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 экологического способа сжигания топлива [1].

Для решения этой задачи необходимо детально исследовать сам процесс горения, поэтому все большее распространение в науке получают методы численного моделирования. В большинстве устройств, использующих процесс горения, большую роль играет турбулентность, и ее исследование является, пожалуй, самым сложным разделом гидродинамики. Необходимо также принять во внимание, что при горении турбулентность осложняется дополнительными факторами — большим количеством разнообразных химических реакций и излучением [2].

Таким образом, компьютерное моделирование становится все более важным элементом исследования процессов горения и проектирования различных установок, сжигающих жидкое топливо. Можно прогнозировать, что роль численного эксперимента будет возрастать и в дальнейшем. Но говорить о полной замене экспериментальных исследований численными расчетами было бы неправильно, поскольку моделирование имеет свои собственные методы, свои собственные трудности и свою собственную сферу применения, открывая новые перспективы для изучения физических процессов.

Целью данной работы является изучение влияния скорости впрыска жидкого топлива на его горение с помощью численного моделирования на основе решения дифференциальных двумерных уравнений турбулентного реагирующего течения.

Математическая модель горения жидкого топлива

Основные уравнения математической модели задачи о дисперсии и горении впрыска жидкого топлива, используемые в данной работе, имеют следующий вид [1-7]:

уравнение неразрывности для компоненты m :

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

уравнение импульса:

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

уравнение энергии:

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

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

Уравнения k-ε модели турбулентности:

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

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

Дополнительные члены в уравнениях (1)-(5), появляющиеся за счет межфазного обмена и за счет химической реакции можно записать следующим образом:

$$\dot{\rho}^s = - \int f \rho_p 4\pi r^2 R d\vec{u}_p dT_p dyd\vec{y},$$

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

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

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

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

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

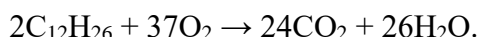
Здесь ρ_m - массовая плотность компоненты m , ρ - общая массовая плотность, \vec{u} -

скорость жидкости, $\dot{\rho}_m^c$ - источниковый член вследствие химических реакций, $\dot{\rho}_{\delta_m}^s$ - источниковый член вследствие впрыска, 1 - это вещество, из которого состоят впрыскиваемые капли, δ - дельта-функция Дирака, p - давление в жидкости, a - безразмерная величина, I - удельная внутренняя энергия, k - кинетическая энергия турбулентности, ε - скорость диссипации кинетической энергии турбулентности, \vec{J} - тепловой поток, \dot{Q}^c - источниковый член вследствие химического теплового эффекта, \dot{Q}^s -

источниковый член вследствие взаимодействия с впрыском, \vec{F}^s - скорость отдачи импульса на единицу объема из-за впрыска, \dot{W}^s - источниковый член вследствие взаимодействия с впрыском. Константы модели турбулентности: $c_{\varepsilon_1} = 1,44$; $c_{\varepsilon_2} = 1,92$; $c_{\varepsilon_3} = -1,0$; $Pr_k = 1,0$; $Pr_\varepsilon = 1,3$; $c_s = 1,50$.

Постановка задачи

В данной работе была исследована зависимость максимальной температуры горения топлива от скорости впрыска. Скорость впрыска жидкого топлива менялась от 180 до 500 м/с. Было выяснено, что при низких скоростях впрыска жидкого топлива горение не происходит. В качестве объекта исследования выступает додекан, чья химическая формула имеет вид $C_{12}H_{26}$. Для данного вида топлива химическая реакция горения с образованием углекислого газа и воды записывается следующим образом:



Данная реакция является экзотермической, т.е. протекает с большим выделением тепла.

Результаты вычислительных экспериментов

В результате проведенных вычислительных экспериментов было установлено, что минимальная скорость впрыскивания жидкого топлива в камеру сгорания, при которой происходит процесс горения, равна 200 м/с.

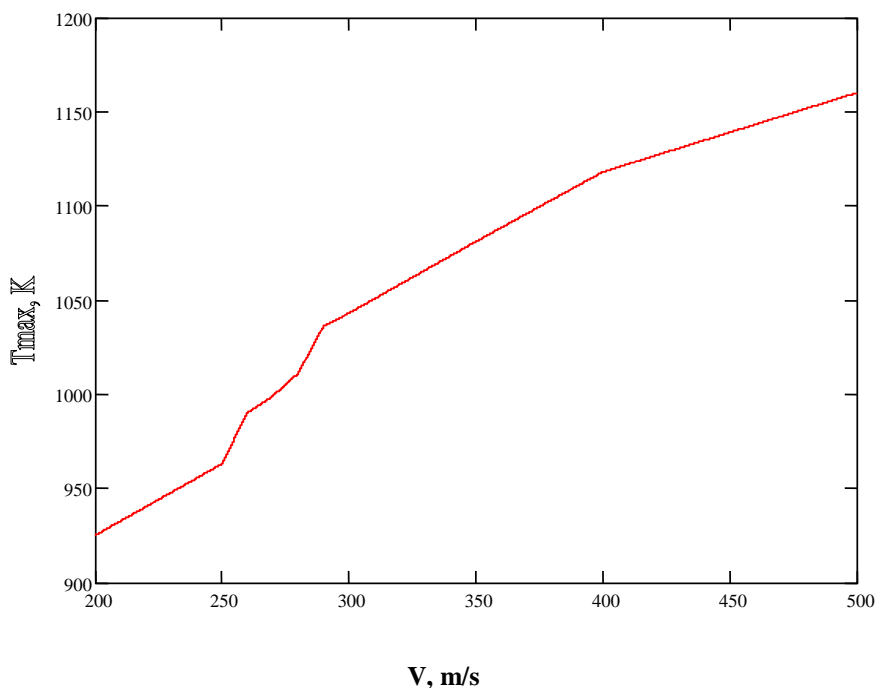


Рис. 1. Изменение максимальной температуры в камере сгорания в зависимости от скорости впрыскиваемых капель жидкого топлива.

Наиболее эффективно процесс горения протекает при скорости впрыскивания топлива в пределах от 250 до 260 м/с, при этом максимальная температура принимает значения от 963 K^0 до 991 K^0 (рис.1). Для данной оптимальной скорости впрыска, равной 250 м/с, были получены графики изменения со временем температуры и концентрации паров топлива в камере сгорания.

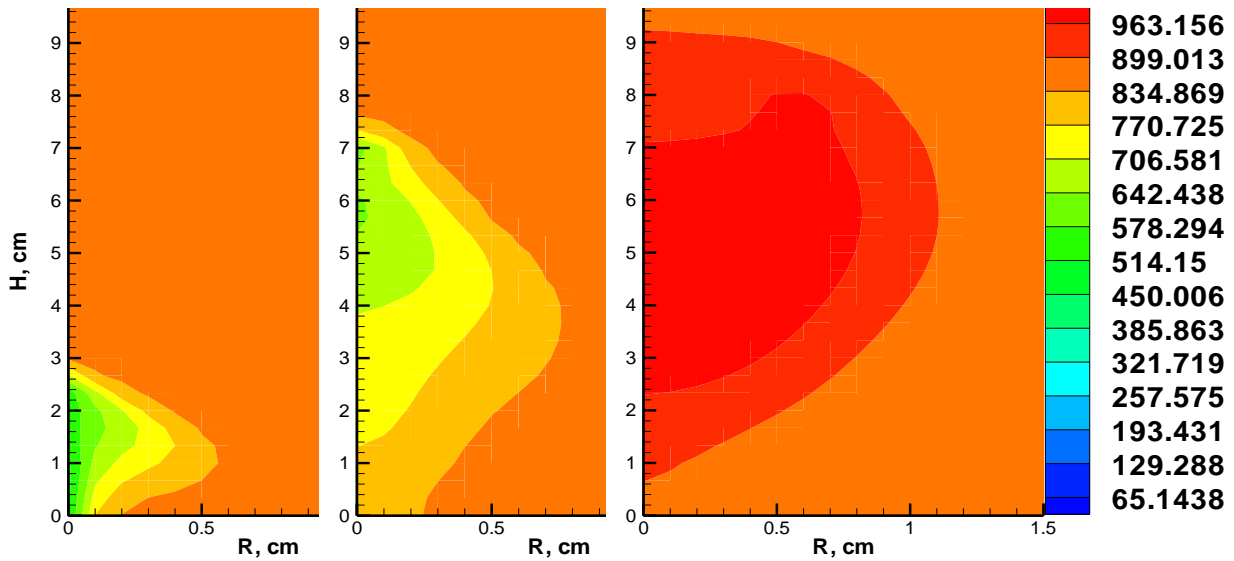


Рис.2. Изменение температуры с течением времени в камере сгорания.

На рис.2 представлено распределение температуры в пространстве камеры сгорания для скорости впрыска, равной 250 м/с, в различные моменты времени 0,4 мс, 2 мс и 3,5 мс, соответственно. В конечный момент времени максимальная температура достигает 963 К, видно, что температурный факел заполняет почти всю расчетную область.

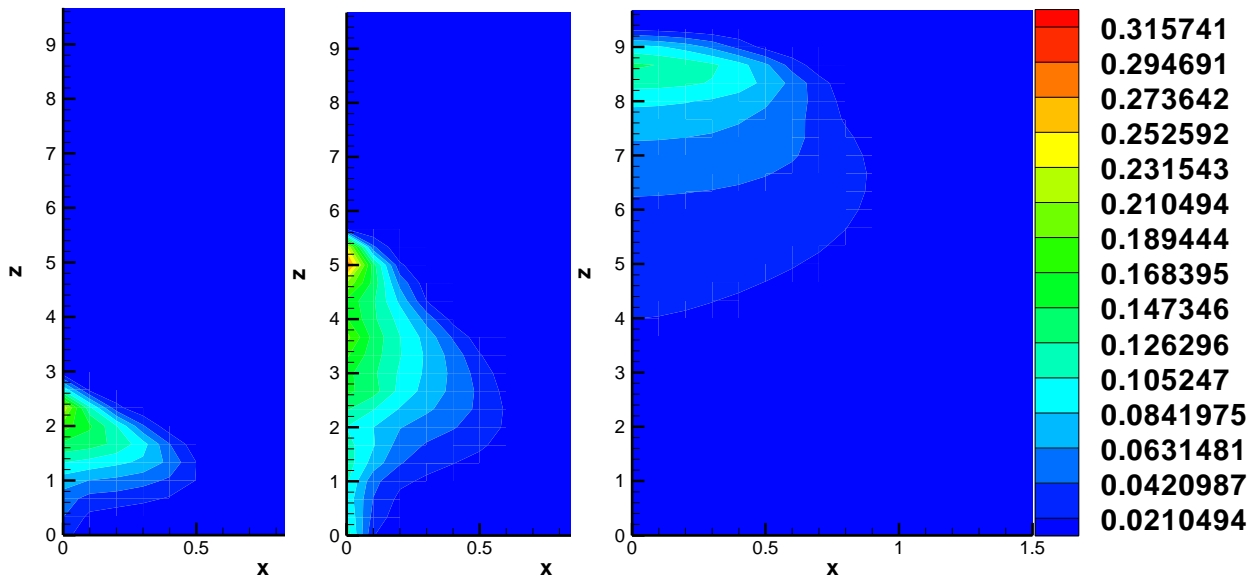


Рис.3. Распределение концентрации паров топлива в пространстве камеры сгорания в различные моменты времени для скорости впрыска 250 м/с.

Распределение концентрации паров топлива в те же моменты времени, что и для температуры для скорости впрыска 250 м/с приведено на рис.3. В начальный момент концентрация топлива имеет минимальное значение и с течением времени увеличивается за счет впрыскивания капель топлива в камеру сгорания. Топливо очень быстро испаряется, пары топлива смешиваются с окислителем, полученная смесь воспламеняется и сгорает за 4 мс. В конечный момент времени концентрация топлива снижается до нуля.

Заключение

Были получены графики распределения максимальной температуры в зависимости от скорости впрыска топлива, а также распределения топлива и температуры по пространству камеры сгорания в различные моменты времени (начальный, промежуточный и конечный) для эффективной скорости впрыскиваемых капель.

В результате проведенного численного моделирования по влиянию скорости впрыска на процесс горения жидкого топлива было установлено, что при скоростях впрыска меньше 200 м/с горение не происходит, поскольку в этом случае скорость впрыска не является достаточной для того, чтобы началась и стабилизировалась реакция горения.

Литература

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.
2. А.С.Аскарова, И.Э. Волошина, М.Ж.Рыспаева. Влияние массы на моделирование процесса горения впрыска жидкого топлива// Вестник КазНУ, серия физическая, №1 (23), 2007 г., с.68-72.
3. А.С.Аскарова, Гороховски М.А., И.В.Локтионова, М.Ж.Рыспаева. Горение жидких топлив в камере сгорания// Известия НАН РК, №3, 2006 – с.15-20.
4. А.С.Аскарова, И.Э. Волошина, М.Ж.Рыспаева. Численное исследование влияния начальной температуры на процесс горения в камере сгорания //Известия НАН РК, серия физико-математическая, № 2 (525), 2007 – с.55-60.
5. А.С.Аскарова, И.Э. Волошина, М.Ж.Рыспаева Численное моделирование образования продуктов реакции при сжигании жидких топлив // Вестник КазНУ, серия физическая, № 2(24), 2007, с. 3-7.
6. Askarova A.S., Voloshina I.E., Ryspayeva M.Zh. Numerical study of mass influence on the process of combustion of liquid fuel spray// Abstracts of V-th International conference “Problems of industrial heat engineering”, Kiev, Ukraine, 2007, p.27-28.
7. М.Ж.Рыспаева, И.Э. Волошина Компьютерное моделирование образования продуктов реакции при горении жидкого топлива различной массы // Материалы конференции. Всероссийская конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по физике, 14 - 16 ноября 2007 года, г. Владивосток, с.114-115.

СҰЙЫҚ ОТЫННЫҢ ЖАНУ ПРОЦЕСІНДЕГІ ЖЫЛДАМДЫҚТЫҢ БҮРКУ ТАМШЫСЫНЫҢ ӨЗГЕРУІН ЗЕРТТЕУ

Ә.С. Аскарова, И.Э. Волошина, М.Ж. Рыспаева, Е.С. Невский

Екі өлшемді дифференциалдық турбуленттік теңдеулердің реакцияға түскен кездегі негізгі шешімдеріне жану камерасында сұйық отынның жану процесіне сандық зерттеу жүргізілді. Сұйық отынның жануына бүрку жылдамдығының әсері қарастырылды.

RESEARCH OF THE COMBUSTION PROCESS OF LIQUID FUELS AT THE CHANGE OF THE INJECTED PARTICLE'S VELOCITY

A.S. Askarova, I.E.Voloshina, M.Zh. Ryspayeva, E.S. Nevskii

The combustion process of liquid fuel in the combustion chamber on the basis of the solution for differential two-dimensional equations of the turbulent reactive flows has been numerically researched. The influence of the spray velocity on the combustion of liquid fuel has been studied.