N E W S
OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES
ISSN 1991-346X
Volume 2, Number 306 (2016), 40–47

UDC 342.7(574)

INVESTIGATION OF ATOMIZATION, IGNITION AND COMBUSTION PROCESSES OF DIFFERENT TYPES OF LIQUID FUEL

A. Askarova[1], S. Bolegenova[1], M. Gorokhovski[2], Sh. Ospanova[1], A. Nugymanova[1], S. Utelov[1]

[1]Al-Farabi Kazakh national university, Almaty, Kazakhstan
[2]Ecole Centrale de Lyon, Lyon, France
shinar_ospanova87@mail.ru

Key words: numerical modeling, combustion chamber, gasoline, heptane, tetradecane.

Abstract. This article presents the results of numerical modeling of atomization and combustion processes of various types of liquid fuel depending on the fuel injection speed in the combustion chamber. On the basis of the solution of differential equations of turbulent reacting flows have been studied combustion processes depending on different initial injection speed of liquid fuels drops. Optimal parameters of gasoline's, heptane's and tetradecane's combustion have been found. There have been obtained distributions of the flame by height, the drops radii, the temperature field and the fuel vapor during the optimal initial injection rate.

УДК 532.517.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПЫЛА, ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ РАЗЛИЧНОГО ВИДА ЖИДКОГО ТОПЛИВА

А. Аскарова[1], С. Болегенова[1], М. Гороховский[2], Ш. Оспанова[1], А. Нұғыманова[1],С. Утелов[1]

[1]Казахский национальный университет имени аль-Фараби, г .Алматы, Казахстан
[2]Центральный Лионский университет, г. Лион, Франция

Ключевые слова: численное моделирование, камера сгорания, бензин, гептан, тетрадекан.

Аннотация. В данной статье представлены результаты численного моделирования процессов распыла и горения различного вида жидкого топлива в зависимости от скорости впрыска в камере сгорания. На основе решения дифференциальных уравнений турбулентного реагирующего течения проведено исследование процессов горения в зависимости от различных начальных скоростей капель впрысков жидких топлив. Определены оптимальные параметры горения бензина, гептана и тетрадекана. Были получены распределения высоты температурного факела, капель по радиусам, поля температуры и паров топлива при оптимальной начальной скорости впрыска.

Горение жидких топлив отличается рядом специфических особенностей, обусловленных протеканием химических реакций в условиях динамического и теплового взаимодействия реагентов, интенсивного массопереноса при фазовых превращениях, а также зависимостью параметров процесса, как от термодинамического состояния системы, так и от ее структурных характеристик. Многообразие и сложность указанных факторов создают известные трудности при

разработке полноценной теории. Существенные результаты в этом направлении могут быть получены на основе последовательного приложения методов механики гетерогенных систем к описанию процессов горения двухфазных сред [1-2].

Явления конвективного тепломассообмена в турбулентных течениях с химическими реакциями широко распространены и играют большую роль в природных процессах, а также в различных отраслях промышленности. Знание закономерностей таких течений является важным при построении теории физики горения, при создании новых физико-химических технологий, а также при решении проблем теплоэнергетики и экологии. При этом в исследованиях сложный процесс горения необходимо анализировать в зависимости от влияния многочисленных физических и химических параметров реакции горения.Особый интерес при изучении явлений в многофазных системах представляет собой развитие теории образования жидких капель в развитой турбулентности. Дисперсия в нейтральных атмосферных течениях была хорошо изучена за последние десятилетия с помощью численных, лабораторных и натурных исследований [3].

Методы математического моделирования нашли широкое применение в различных областях науки и техники. Эти методы включают в себя разработку физических и математических моделей, численных методов и программного обеспечения, проведение численного эксперимента с привлечением средств вычислительной техники (его результаты анализируются и используются в практических целях). В науке и технике преимущества метода компьютерного моделирования очевидны: оптимизация проектирования, сокращение затрат на отработку, повышение качества продукции, уменьшение эксплуатационных расходов и т.д. Численное моделирование существенно преобразует также сам характер научных исследований, устанавливая новые формы взаимосвязи между экспериментальными и математическими методами.

Внедрение новых технологий требует значительных затрат, в связи с чем к методам проектирования и отработки оборудования предъявляются все возрастающие требования. Таким образом, в настоящее время, особое внимание приобретает не только создание эффективных физических и математических моделей, но и разработка новых более совершенных методов численной реализации систем разностных уравнений, описывающих конвективный тепломассоперенос в камерах сгорания. Математическое 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.

Математическая модель задачи о горении в камере сгорания жидкого топлива основывается на уравнениях движения для жидкой фазы, сопровождаемой капельным испарением, а также на уравнениях энергии и переноса массы с соответствующими начальными и граничными условиями [4-7]:

Уравнение неразрывности для компоненты реакции m имеет вид:

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

где D – коэффициент диффузии, ρ_m– массовая плотность жидкой фазы, ρ – полная массовая плотность, $\dot{\rho}_m^c$ – химический источниковый член; $\dot{\rho}^s$ – источниковый член вследствие впрыска; u– скорость жидкости.

Уравнение неразрывности для жидкости имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{u}) = \dot{\rho}^s \tag{2}$$

Уравнение движения для смеси жидкостей:

$$\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{u}\vec{u}) = -\frac{1}{a^2}\vec{\nabla}\mathrm{p} - \mathrm{A}_0 \vec{\nabla}(2/3\, \rho k) + \vec{\nabla}\vec{\sigma} + \vec{F}^s + \rho \vec{g}, \tag{3}$$

где p – давление жидкости, α - безразмерная величина, A_0 равно 0 при ламинарном течении и 1 – при турбулентности. Тензор вязких напряжений имеет вид:

$$\sigma = \mu\left[\vec{\nabla}\vec{u} + (\vec{\nabla}\vec{u})^T\right] + \lambda\vec{\nabla}\vec{u}\vec{I}. \tag{4}$$

Здесь μ – динамическая вязкость жидкости, λ – коэффициент вязкости, g – ускорение свободного падения и I – удельная внутренняя энергия.

Уравнение внутренней энергии представлено ниже:

$$\frac{\partial(\rho\vec{I})}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho\vec{u}\vec{I}) = -\rho\vec{\nabla}\vec{u} + (1 - A_0)\vec{\sigma}\vec{\nabla}\vec{u} - \vec{\nabla}\vec{J} + A_0\rho\varepsilon + \dot{Q}^c + \dot{Q}^s, \tag{5}$$

где $\dot{Q}^c$ – источниковый член, обусловленный тепловыделением в результате химической реакции и $\dot{Q}^s$ – тепло, которое приносит впрыскиваемое топливо. Вектор теплового потока J складывается из электропроводности и переноса энтальпии.

При использовании модели турбулентности (A_0=1) решаются уравнения для кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε :

$$\frac{\partial\rho k}{\partial t} + \vec{\nabla}\cdot(\rho\vec{u}k) = -\frac{2}{3}\rho k\vec{\nabla}\cdot\vec{u} + \sigma\cdot\nabla\vec{u} + \vec{\nabla}\cdot\left[\left(\left(\frac{\mu}{\mathrm{Pr}_k}\right)\vec{\nabla}k\right)\right] - \rho\varepsilon + \dot{W}^s, \tag{6}$$

$$\frac{\partial\rho\varepsilon}{\partial t} + \vec{\nabla}\cdot(\rho\vec{u}\varepsilon) = -(\frac{2}{3}c_{\varepsilon 1} - c_{\varepsilon 2})\rho\varepsilon\vec{\nabla}\cdot\vec{u} + \vec{\nabla}\cdot\left[\left(\left(\frac{\mu}{\mathrm{Pr}_\varepsilon}\right)\vec{\nabla}\varepsilon\right)\right] + \\ + \frac{\varepsilon}{k}\left[c_{\varepsilon 1}\vec{\sigma}\vec{\nabla}\vec{u} - c_{\varepsilon 2}\rho\varepsilon + c_s\dot{W}^s\right]. \tag{7}$$

Величина $\dot{W}^s$ возникает вследствие взаимодействия с распылителем. Константы $c_{\varepsilon 1}, c_{\varepsilon 2}, c_S, \mathrm{Pr}_k, \mathrm{Pr}_\varepsilon$ определяются из эксперимента [8-9].

Существует несколько моделей распыла топлива. Наиболее широко известна глобальная модель механизма распада топлива, включающая в себя классическую модель вторичного распада. В данной статье представлены результаты численного моделирования процессов распыления и горения жидкого топлива в зависимости от давления в камере использованием математической стохастической модели вторичного распыла [10]. В данной статье были использованы три вида жидкого топлива: бензин, гептан и тетрадекан.

Жидкое топливо массой 0,06 г при температуре 298 К распылялось через сопло, расположенное в центре основания камеры. Топливо, впрыскиваемое в камеру сгорания, которая была заполнена воздухом при температуре 800К, сначала испарилось, после чего сгорело в газовой фазе. Процесс горения жидкого топлива в среднем занимал 4 мс. Время распыления жидкого топлива равно $1{,}4\cdot10^{-3}$ с.

Камера сгорания представляет собой цилиндр, высотой 15 см, диаметром 4 см. Общий вид камеры сгорания представлен на рисунке 1. Расчетная область состоит из 600 ячеек. Время горения топлива 4 мс. Жидкое топливо впрыскивается в камеру сгорания через круглое сопло, расположенное в центре нижней части камеры. Время инжекции капель топлива 1,4 мс. Площадь инжектора составляет $2\cdot10^{-4}$ см^2.

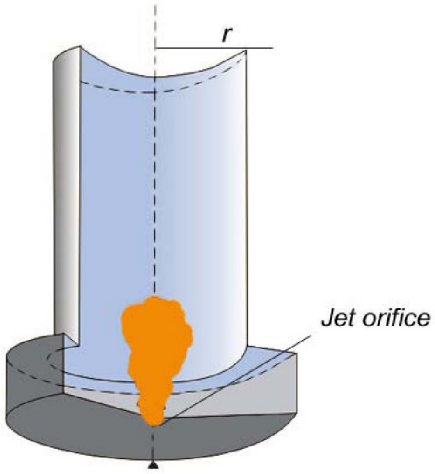

Рисунок 1 – Общий вид камеры сгорания

Целью данной статьи является изучение влияния скорости впрыска жидкого топлива на его горение с помощью численного моделирования на основе решения дифференциальных двумерных уравнений турбулентного реагирующего течения. Скорость впрыска жидкого топлива менялась от 150 до 350 м/с. На рисунке 2 показано изменение высоты температурного факела при изменении скорости впрыска жидких топлив. Было установлено, что при низких скоростях впрыска жидкого топлива (меньше 150 м/с) горение не происходит, поскольку в этом случае скорость впрыска не является достаточной для того, чтобы началось воспламенение и стабилизировалась реакция горения [11].

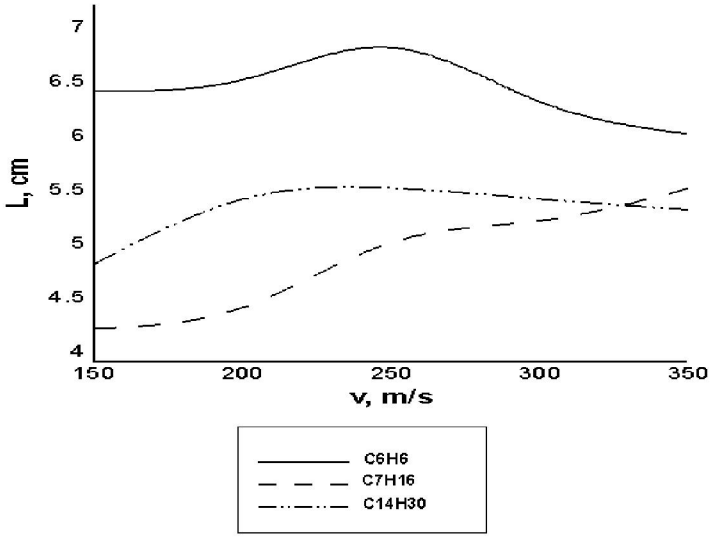

Рисунок 2 – Изменение высоты температурного факела при изменении скорости впрыска жидких топлив

Ниже приведены результаты численного моделирования по горению впрысков жидких топлив для оптимальных масс и скоростей впрыска и температуры газа в камере сгорания. Рисунок 3 показывает дисперсию и распределение температур капель для трех топлив в камере сгорания при оптимальных массах и скоростей впрыска и температурах газа.