

УДК 536.46:532.517.4

*А. С. АСКАРОВА¹, М. А. ГОРОХОВСКИ²,
С. А. БОЛЕГЕНОВА¹, И. Э. БЕРЕЗОВСКАЯ¹, Ш. С. ОСПАНОВА¹*

¹Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан,

²Лионский центральный университет, Лион)

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СКОРОСТИ ВПРЫСКА НА ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА РАЗЛИЧНОГО ВИДА ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ВЫСОКИХ ЧИСЛАХ РЕЙНОЛЬДСА В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Аннотация. Целью данной работы является изучение влияния скорости впрыска на процесс горения различных видов жидких топлив в зависимости от давления и числа Рейнольдса в цилиндрической камере сгорания. Исследование осуществляется методами численного моделирования с использованием дифференциальных уравнений, описывающих турбулентное течение при наличии химических реакций. В настоящей работе для достижения цели описана физическая и математическая модели поставленной задачи. Проведено численное исследование процесса горения двух видов жидкого топлива: октана и додекана в камере сгорания при высоких давлениях и высоких числах Рейнольдса. Получены распределения температуры и концентрации углекислого газа в зависимости от скорости впрыска.

Ключевые слова: жидкое топливо, октан, додекан, горение, численное исследование.

Тірек сөздер: сұйық отын, октан, додекан, жану, сандық модельдеу.

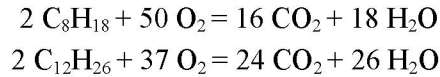
Keywords: liquid fuel, octane, dodecane, combustion, numerical modeling.

Эффективность работоспособности двигателей внутреннего сгорания в значительной степени основана на результатах фундаментальных исследований физико-химических процессов горения. В настоящее время одним из эффективных путей фундаментальных исследований является численный эксперимент, этот метод используется в многочисленных задачах теплофизики и совершенствуется с полученными в результате знаниями и развитием вычислительной техники.

Численный эксперимент базируется на использовании математических моделей реальных процессов [1]. Известно, что в топках электростанций сжигается твердое, жидкое и газообразное топливо. В этой связи использование численного эксперимента с привлечением средств вычислительной техники позволяет разработать новые технологии, требующие малых затрат и более совершенные методы численной реализации систем дифференциальных уравнений, описывающих процессы теплопереноса в камерах сгорания [2].

Целью данной работы является изучение влияния скорости впрыска на процесс горения различных видов жидких топлив в зависимости от давления и числа Рейнольдса в цилиндрической камере сгорания с помощью численных методов. Процесс сжигания углеводородных топлив обусловлен 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 [3]. Горение жидкого топлива проходит через несколько стадий. Топливо впрыскивается в камеру сгорания, затем происходит испарение капель и смешение с окислителем, после чего наблюдается воспламенение и горение воздушно-топливной смеси. В данном процессе особую роль играет распыление топлива, так как эта стадия определяет эффективность горения самой смеси: чем меньше капля, тем быстрее происходит испарение, смешение с окислителем и воспламенение.

Для достижения цели описана физическая модель поставленной задачи. Процесс горения рассматривается в модельной камере сгорания с форсункой, расположенной в центре нижней части камеры, через которую в поток окислителя впрыскивается жидкое топливо. Камера имеет конструкцию цилиндра высотой 15 см и радиусом 2 см. Начальная температура в камере сгорания равна 800 К. Количество контрольных ячеек – 600. Температура стенок камеры сгорания составляет 353 К [1]. В настоящей работе использовались два вида жидкого топлива: октан (C_8H_{18}) и додекан ($C_{12}H_{26}$). Химические реакции окисления этих двух видов топлив представлены ниже:



Математическая модель задачи осуществляется методами численного моделирования с использованием дифференциальных уравнений, описывающих турбулентное течение при наличии химических реакций. Она представлена основными уравнениями: неразрывности, движения, внутренней энергии, k - ε модель турбулентности (1–5), а так же начальными и граничными условиями [4].

Уравнение неразрывности для компоненты реакции m записывается следующим образом:

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

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

Уравнение переноса импульса для жидкости можно записать как:

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

где p – давление жидкости, α – безразмерная величина, A_0 равно 0 при ламинарном течении и 1 – при турбулентности.

Уравнение внутренней энергии имеет следующий вид:

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

\dot{Q}^c и \dot{Q}^s – источниковые члены, обусловленные тепловыделением в результате химической реакции и тепла, которое приносит впрыскиваемое топливо.

Математическая модель включает два дополнительных уравнения движения для турбулентной кинетической энергии k и скорости ее диссипации ε :

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

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

Величина \dot{W}^s возникает вследствие взаимодействия с распылителем. Константы $c_{\varepsilon 1}, c_{\varepsilon 2}, c_s, Pr_k, Pr_\varepsilon$ определяются из эксперимента [4].

Результаты численного эксперимента по горению жидкого топлива. Вычислительный эксперимент проводился при высоких значениях давления 100 бар для октана и 80 бар для додекана, с массой 6 мг для октана и 7 мг для додекана. Скорость впрыска жидкого топлива менялась от 150 до 350 м/с, так как ранее [1] нами было установлено, что при низких скоростях впрыска жидкого топлива, меньше 150 м/с, горение не происходит, так как скорость впрыска не является достаточной, для того, чтобы началось самовоспламенение и реакция горения стабилизировалась. В связи с тем, что температура кипения всегда ниже температуры самовоспламенения, поэтому горение углеводородных топлив происходит в паровой фазе.

Механизм горения жидких топлив включает в себя несколько этапов: искра (или другой посторонний источник), воспламенение паровоздушной смеси, горение паровоздушной смеси у поверхности жидкости, повышение скорости испарения за счет передачи тепла от пламени (до того момента, пока не наступит равновесие). Поэтому наиболее эффективно процесс горения, как октана, так и додекана протекает при скорости впрыскивания топлива 350 м/с, когда температуры в камере сгорания принимают максимальные значения (рисунок 1). Из рисунка 1 видно, что для октана по оси ординат температура монотонно растет и максимум 1726 К приходится на скорость впрыска топлива равную 350 м/с. Для додекана при значениях скорости от 150 до 250 м/с наблюдается скачкообразный рост температуры от 1780 до 2075 К, максимальное значение 2080 К, аналогично достигается при 350 м/с.

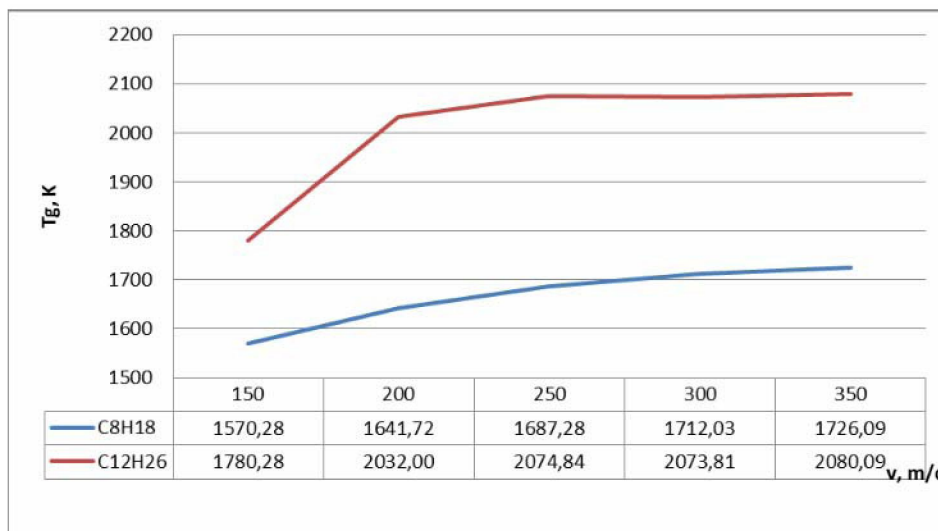


Рисунок 1 – Распределение температуры в камере сгорания (T , К) в зависимости от скорости впрыска (v , м/с) (синяя линия – октан (C_8H_{18}), красная линия – додекан ($C_{12}H_{26}$))

Когда смесь паров топлива с окислителем воспламеняется, то вся область камеры по ширине охватывается факелом, первое быстро сгорает часто без остатка. Однако одним из продуктов сжигания топлив является CO_2 . На рисунке 2 показано влияние скорости впрыска октана и додекана на распределение концентрации углекислого газа.

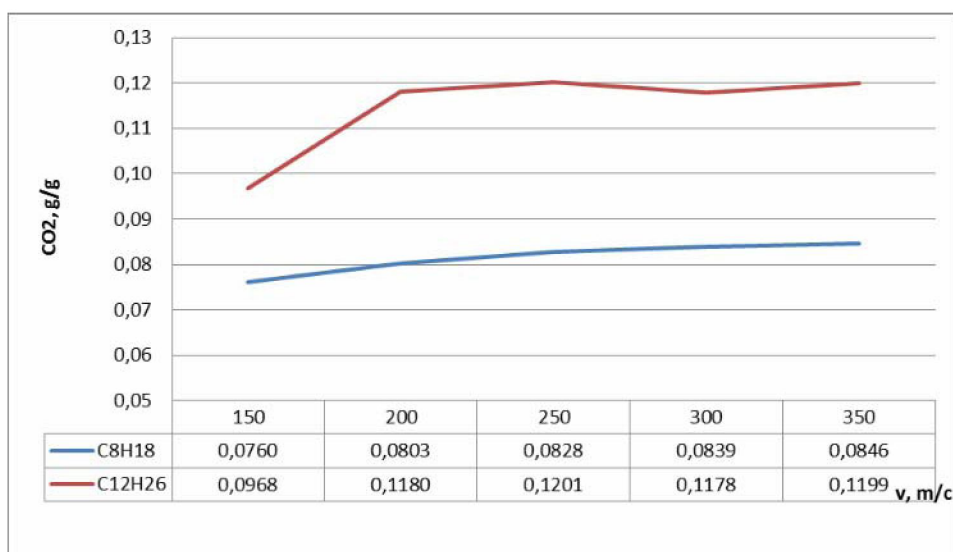


Рисунок 3 – Распределение концентрации углекислого газа (г/г) в камере сгорания в зависимости от скорости впрыска (v , м/с) (синяя линия – октан (C_8H_{18}), красная линия – додекан ($C_{12}H_{26}$))

При увеличении скорости впрыска C_8H_{18} количество двуокси углерода повышается по вполне понятным причинам: чем больше скорость, тем больше образуется CO_2 . Минимальная концентрация углекислого газа равная 0,0760 г/г образуется при впрыскивании октана со скоростью 150 м/с. Для додекана $C_{12}H_{26}$ при увеличении скорости выделяется большое количество CO_2 , но при скорости 300 м/с наблюдается небольшой спад концентрации CO_2 . Для $C_{12}H_{26}$ наименьшее количество углекислого газа 0,0968 г/г выделяется при начальной скорости (150 м/с) подачи топлива.

Как показал анализ вычислительных экспериментов, оптимальной для обоих видов топлива можно назвать скорость впрыскивания равную 350 м/с. При данной скорости инъекции концентрация выброса вредного вещества, такого как углекислый газ незначительна и лежит в допустимых пределах. Температура в камере сгорания достигает максимальных значений. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании различных технических устройств, использующих процесс горения распыленных жидких топлив.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Аскарлова А.С., Болегенова С.А., Березовская И.Э., Оспанова Ш.С. Численное моделирование процессов горения двух видов жидкого топлива в зависимости от скорости // Материалы IX Междунар. научно-практич. конф. «Современные научные достижения». – Прага, 2013. – С. 29-34.
- 2 Хитрин Л.Н. Физика горения и взрыва. Издательство Московского университета, 1957. – 452 с.
- 3 Аскарлова А.С., Гороховски М.А., Рыспаева М.Ж., Волошина И.Э. Численное моделирование горения и самовоспламенения двухфазных химически реагирующих течений с впрысками // Известия Томского политехнич. ун-та. – 2009. – Т. 315, № 4. – С. 5-9.
- 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. – 160 p.

REFERENCES

- 1 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Berezovskaja I.E., Ospanova Sh.S. Chislennoe modelirovanie processov gorenija dvuh vidov zhidkogo topliva v zavisimosti ot skorosti. Materialy IX Mezhdunar. nauchno-praktich. konf. «Sovremennye nauchnye dostizhenija». –Praga, 2013. S. 29-34.
- 2 Hitrin L.N. Fizika gorenija i vzryva. Izdatel'stvo Moskovskogo universiteta, 1957. 452 s.
- 3 Askarova A.S., Gorohovski M.A., Ryspaeva M.Zh., Voloshina I.E. Chislennoe modelirovanie gorenija i samovosplamenenija dvuhfaznyh himicheski reagirujushhih techenij s vpryskami. Izvestija Tomskogo politehnich. un-ta. 2009. T. 315, № 4. S. 5-9.
- 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. 160 p.

Резюме

*А. С. Асқарова¹, М. А. Гороховски²,
С. Ә. Бөлегенова¹, И. Э. Березовская¹, Ш. С. Оспанова¹*

¹әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан,

²Лион Орталық университеті, Лион)

ЖОҒАРЫ ҚЫСЫМДАР МЕН РЕЙНОЛЬДС САНЫНЫҢ ЖОҒАРЫ МӘНДЕРІНДЕГІ ЦИЛИНДРЛІК ЖАНУ КАМЕРАСЫНДАҒЫ ӨРТҮРЛІ СҰЙЫҚ ОТЫНДАРДЫҢ ЖАНУ ПРОЦЕСІНЕ БҮРКУ ЖЫЛДАМДЫҒЫНЫҢ ӨСЕРІН САНДЫҚ ЗЕРТТЕУ

Жұмыста қысым мен Рейнольдс санына қатысты цилиндрлік жану камерасындағы әртүрлі сұйық отын-дардың жануына бүрку жылдамдығының әсері зерттелінді. Зерттеу химиялық реакциялар болғандағы турбуленттік ағысты сипаттайтын дифференциалдық теңдеулерді қолдана отырып, сандық модельдеу әдістерімен жүзеге асырылды. Мақсатқа жету үшін алға қойылған мәселенің математикалық және физикалық модельдері бейнеленген. Екі сұйық отын түрінің жану процесіне сандық зерттеу жүргізілді: жоғары қысымдар мен Рейнольдс санының жоғары мәндеріндегі октан мен додекан. Бүрку жылдамдығына қатысты көмірқышқыл газының температурасы мен концентрацияларының таралуы алынды.

Тірек сөздер: сұйық отын, октан, додекан, жану, сандық модельдеу.

Summary

*A. S. Askarova¹, M. A. Gorokhovskii²,
S. A. Bolegenova¹, I. E. Berezovskaya¹, Sh. S. Ospanova¹*

¹al-Farabi Kazakh national university, Almaty, Kazakhstan,
²Lyon central university, Lyon)

NUMERICAL INVESTIGATION OF INJECTION SPEED INFLUENCE ON THE COMBUSTION PROCESS OF DIFFERENT KIND OF FUEL AT HIGH PRESSURES AND HIGH REYNOLDS'S NUMBERS IN THE CYLINDRICAL COMBUSTION CHAMBER

The purpose of this work is studying of injection speed influence on process of different types of liquid fuels burning depending on pressure and Reynolds' number in the cylindrical combustion chamber. Research is carried out by methods of numerical modeling with use of the differential equations describing turbulent flow in the presence of chemical reactions. In the real work for achievement of the purpose it is described physical and mathematical models of an assigned task. Numerical research of process of burning of two types of liquid fuel is conducted: octane and dodecane in the combustion chamber with high pressures and Reynolds's high numbers. Distributions of temperature and concentration of carbon dioxide depending on injection speed are received.

Keywords: liquid fuel, octane, dodecane, combustion, numerical modeling.