

Асқарова А.С., Болегенова С.А.,
Шортанбаева Ж.К.,
Березовская И.Э.,
Максутханова А.М.,
Мукашева Г.К.

**Математическая модель
горения жидких топлив,
впрыскиваемых в камеру
сгорания при высоких
давлениях и высоких числах
Рейнольдса**

В статье представлены результаты вычислительных экспериментов по исследованию влияния впрыскиваемой массы, скорости и начальной температуры на процессы распыла, воспламенения и горения жидкого топлива при высоких давлениях и числах Рейнольдса в цилиндрической камере сгорания. На основе созданной стохастической модели распыла жидких топлив, впрыскиваемых в камеру сгорания при высоких давлениях и высоких числах Рейнольдса, при заданных начальных и граничных условиях исследуемой задачи, процесс горения жидких топлив рассматривалась в модельной камере сгорания. Новизна данных исследований заключается в том, что фундаментальные исследования в области физики газа и жидкости, разработка методов вычислительного эксперимента с использованием современных средств автоматизации измерений и разрабатываемых программных кодов, позволяют получить новые знания о физико-механических свойствах газа и жидкости.

Ключевые слова. Горение, математическое моделирование, топливо, факел, числа Рейнольдса.

Askarova A.S., Bolegenova S.A.,
Shortanbayeva Zh.K.,
Berezovskaya I.E.,
Maksutkhanova A.M.,
Mukasheva G.K.

**Mathematical models of
combustion of liquid fuels, is
injected into the combustion
chamber at high pressure and
high Reynolds numbers**

The article presents the results of numerical experiments on the effect of the injected mass, velocity and initial temperature of the processes of spray, ignition and combustion of liquid fuel at high pressure and Reynolds numbers in a cylindrical combustion chamber. Based on a stochastic model created spray liquid fuel is injected into the combustion chamber at high pressures and high Reynolds numbers, for given initial and boundary conditions of the problem, the process of combustion of liquid fuels considered in a model combustor. The novelty of this research lies in the fact that basic research in the physics of gas and liquid, the development of methods of computational experiment with the use of modern automation and developed software codes, provides new information about the physical and mechanical properties of the gas and liquid.

Key words: Burning, mathematical modeling, fuel torch, the Reynolds number.

Асқарова Ә.С., Бөлегенова С.А.,
Шортанбаева Ж.К.,
Березовская И.Э.,
Мақсұтханова А.М.,
Мұқашева Г.К.

**Жоғарғы қысымда және
Рейнольдстің жоғарғы санында
жану камерасына бүркілетін
сұйық отындардың жануын
математикалық моделдеу**

Бұл мақалада цилиндр тәріздес жану камерасында жоғарғы қысым мен Рейнольдстің жоғарғы санында сұйық отынның жануы мен тұтану, жалындау процестеріне бастапқы температураның, жылдамдықтың, бүркілетін массаның әсері бойынша есептеуіш эксперименттердің нәтижелері берілген. Зерттеп отырған есептің берілген бастапқы және шекаралық шарттарда, жоғарғы қысым мен Рейнольдстің жоғарғы сандарында жану камерасына бүркілетін тозаңдалған сұйық отынның стохастикалық моделі негізінде сұйық отынның жануы моделденген жану камерасында қарастырылған. Бұл жұмыстың жаңалығы газ бен сұйық физикасы аясында іргелі зерттеулер жүргізілген, өңделген программалық кодтар мен өлшеулерді автоматизациялау жөнінде заманауи әдістерді пайдалана отырып есептеуіш эксперименттердің әдісін жасау, сұйық пен газдардың физика-механикалық қасиеттері жайында жаңа мәліметтерді алуға қол жеткізеді.

Түйін сөздер. Жану, математикалық моделдеу, отын, алау, Рейнольдс саны.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ
МОДЕЛЬ ГОРЕНИЯ
ЖИДКИХ ТОПЛИВ,
ВПРЫСКИВАЕМЫХ
В КАМЕРУ СГОРАНИЯ
ПРИ ВЫСОКИХ
ДАВЛЕНИЯХ
И ВЫСОКИХ ЧИСЛАХ
РЕЙНОЛЬДСА**

Введение

В связи с широким использованием распыленного жидкого топлива, к ним относятся нефть, бензин, керосин, солярка, гептил и другие, в различных двигателях в качестве автомобильного, авиационного, дизельного и ракетного топлив стало актуальным моделирование процессов распыления и горения этих топлив. Процесс горения будет оставаться основным источником энергии еще много лет, несмотря на то, что применение ядерной энергии в промышленно развитых странах расширяется, а методы использования энергии солнца, ветра и приливов интенсивно разрабатываются. Однако на первый план выходят особо актуальные в нашей стране экологические проблемы образования вредных веществ и ограниченность ресурсов топлива, что приводит к необходимости более экономичных способов сжигания различных топлив.

Исследование горения жидкого топлива осложнено 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. Поэтому для предсказания и изучения поведения таких сложных систем в теплофизике используется численное моделирование, поскольку появляется возможность оптимизировать эксперимент на основе его виртуального прототипа.

В статье описаны основные особенности горения впрысков жидких топлив, изложена математическая модель образования горения жидких впрысков при высоких давлениях и высоких числах Рейнольдса: система уравнений, описывающая процесс горения распыленных жидких топлив. Приведены начальные и граничные условия исследуемой задачи о горении жидких топлив в камере сгорания. Создана стохастическая модель распыла жидких топлив, впрыскиваемых в камеру сгорания при высоких давлениях и высоких числах Рейнольдса. Представлены основные уравнения математической модели горения жидких топлив, впрыскиваемых в камеру сгорания [1 – 7].

Математическая модель

Уравнение неразрывности для m -той компоненты 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 ρ_m – это массовая плотность компоненты m , ρ – полная массовая плотность, \vec{u} – скорость жидкости.

Уравнение переноса импульса для жидкой фазы записывается следующим образом:

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

где p – давление жидкости.

Уравнение внутренней энергии имеет следующий вид:

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

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

Также решаются два дополнительных уравнения движения для турбулентной кинетической энергии k и скорости ее диссипации ε :

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

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

Уравнение состояния для смеси газов:

$$p = R_0 T \sum_m (\rho_m / W_m), \quad (6)$$

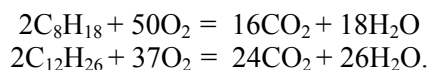
Изменение температуры капли обусловлено уравнением баланса энергии:

$$\rho_d \frac{4}{3} \pi r^3 c_l T_d - \rho_d 4 \pi r^2 RL(T_d) = 4 \pi r^2 Q_d, \quad (7)$$

где c_l – удельная теплоемкость жидкости, $L(T_d)$ – удельная теплота парообразования, и Q_d – теплопроводность на поверхности капли в единичном объеме. Уравнение (7) означает, что энергия, подводимая к капле, нагревает ее, вследствие чего происходит испарение.

Результаты

В настоящей работе использовались два вида жидкого топлива: октан (C_8H_{18}) и додекан ($C_{12}H_{26}$). Химические реакции для этих двух видов топлив имеют вид:



На основе созданной стохастической модели распыла жидких топлив, впрыскиваемых в камеру сгорания при высоких давлениях и высоких числах Рейнольдса, при заданных начальных и граничных условиях исследуемой задачи, процесс горения жидких топлив рассматривает-

ся в модельной камере сгорания с форсункой, расположенной по центру нижней части камеры, через которую в поток окислителя (подогретый воздух) подается основная часть расхода жидкого топлива. 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. Площадь сопла инжектора составляет $2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$. На основе исследований для октана оптимальное давление равно 100 бар и 80 бар - для додекана, при этом масса впрыскиваемого топлива менялась от 4 до 20 мг.

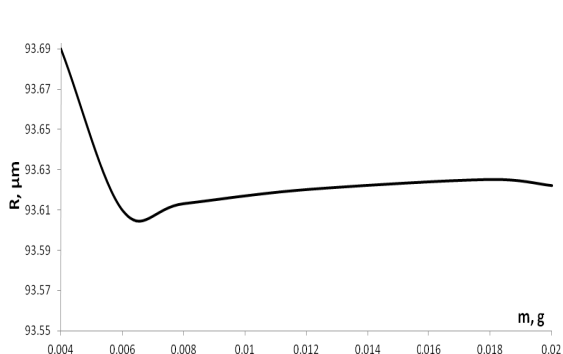


Рисунок 1 – Распределение капель по размерам (R, μm) в зависимости от массы топлива (m, g) камере сгорания

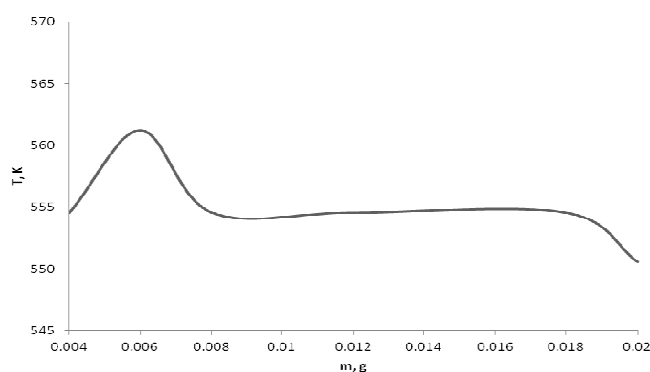


Рисунок 2 – Распределение температуры капель (T, K) в камере сгорания в зависимости от массы жидкого топлива (m, g)

Как и следовало ожидать, при увеличении массы жидкого топлива количество двуокси углерода повышается по вполне понятным причинам: чем больше топлива, тем больше образуется CO_2 (рис. 3). Минимальная концентрация углекислого газа равная 0,0989 г/г образуется при впрыскивании октана массой равной 6 мг.

При увеличении впрыскиваемой массы топлива концентрация сажи монотонно падает (рис. 4), что согласуется с предыдущим рис. 3.

При массе впрыска 6 мг для октана выделяется не большое количество сажи равное $58,4 \text{ г/м}^3$.

Таким образом, получено оптимальное значение впрыскиваемой массы октана равной 6 мг при которой размер капель топлива минимален 93,61 мкм, а температура его капель максимальна 561 К. Именно при этом значении массы октана выделяется небольшое количество сажи $58,4 \text{ г/м}^3$ и минимальное количество углекислого газа 0,0989 г/г.

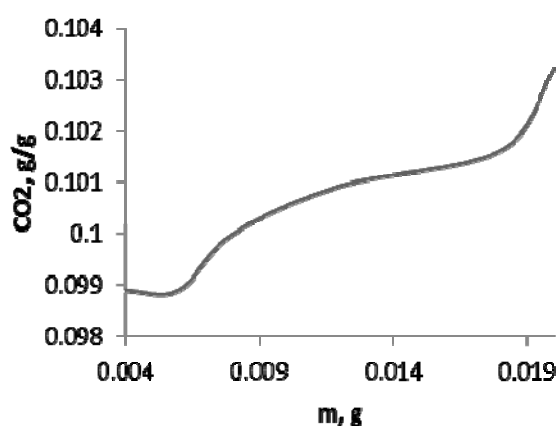


Рисунок 3 – Распределение концентрации углекислого газа (г/г) в зависимости от массы жидкого топлива (m, g)

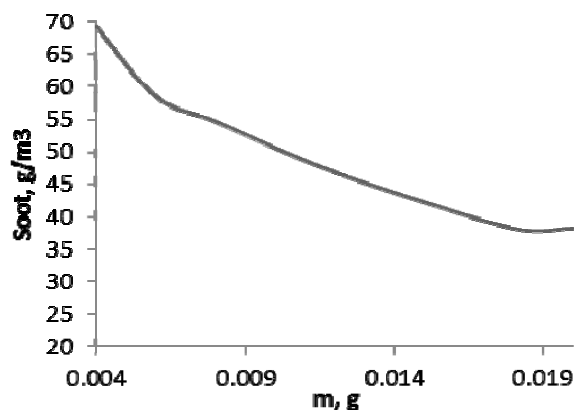


Рисунок 4 – Распределение концентрации сажи (г/м³) в зависимости от массы жидкого топлива (m, g)

Как видно из рисунка 5, 6 по понятным причинам, с увеличением массы топлива концентрация углекислого газа растет. При массе топлива равной 7 мг образуется минимальное количество CO₂, которое составляет 0,101 г/г. Мож-

но сделать предварительный вывод о том, что оптимальным значением массы додекана является 7 мг, при котором концентрация углекислого газа минимальна, а температура капель топлива максимальна.

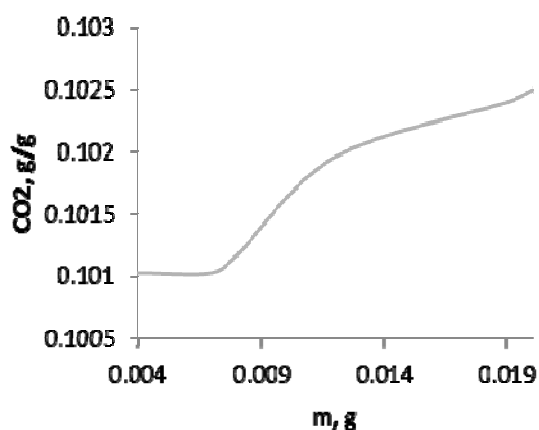


Рисунок 5 – Распределение концентрации CO₂ (г/г) в камере в зависимости от массы жидкого топлива (m, g)

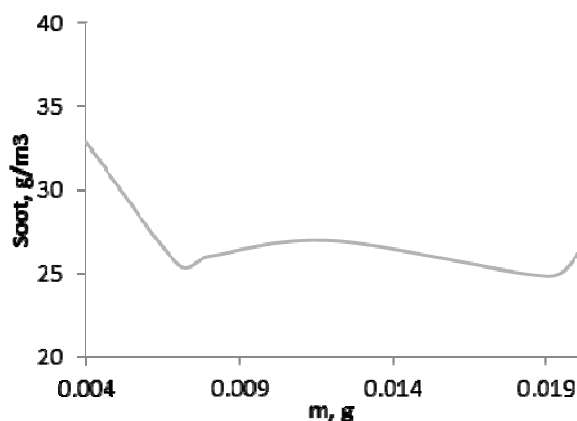


Рисунок 6 – Распределение концентрации сажи (г/м³) в камере сгорания в зависимости от массы жидкого топлива (m, g)

Вывод

Анализ зависимости массы жидкого топлива от концентрации сажи в пространстве камеры сгорания показывает противоположную карти-

ну, чем в случае с CO₂, при увеличении массы впрыска концентрация сажи уменьшается. Для додекана минимальное количество сажи 25,3 г/м³ образуется при впрыскивании топлива с массой 7 мг.

References

- 1 Aliyarov B.K., Aliyarova M.B., Szhiganiye kazakhstanskikh ugley na TES i na krupnykh kotel'nykh. – Almyty, 2012. - 130s.
- 2 Yun A.A., Krylov B.A. Raschet i modelirovaniye turbulentnykh techeniy s yeploobmenom, smesheniyem, khimicheskimi reaktsiyami i dvukhfaznykh techeniy v programmnom komplekse Fastest-3D: Uchebnoye posobiye. - M.: Izd-vo MAI, 2007. – 116 s.
- 3 Polezhayev YU.V., Vysokoeffektivnyye i ekonomicheski bezopasnyye parogazovyye ustanovki // Energiya. -2005. - №10. – 96 s. – 116 s.
- 4 Askarova A.S., Bolegenova S.A., Voloshina I.E., Ryspayeva M.ZH. Komp'yuternoye modelirovaniye protsessa obrazovaniya produktov reaktsii pri szhiganii zhidkikh topliv//Trudy mezhdunarodnom nauchno- tekhnicheskome kongresse. - Krasnoyarsk, 2010. - 91-92 s.
- 5 Askarova A., Bolegenova S., Maximov V., Bekmuhamet A. Numerical research of aerodynamic characteristics of combustion chamber BKZ-75 mining thermal power station // Procedia Engineering. – 2012. – V.42. – P. 1250-1259.