

Аскарова А., Болегенова С.,
Гороховский М., Туякбаев А.,
Оспанова Ш., Нугыманова А.,
Манабаева Р.

**Компьютерное моделирование
процессов дисперсии и горения
жидких топлив при высокой
турбулентности**

Численное исследование горения жидких топлив является сложной задачей теплофизики, так как требует учета большого количества сложных взаимосвязанных процессов и явлений. Поэтому вычислительный эксперимент становится все более важным элементом исследования процессов горения и проектирования различных устройств, использующих процесс горения. В работе изложена математическая модель и основные уравнения, описывающие процесс горения жидких топлив при высокой турбулентности. Проведено исследование процессов распыла и дисперсии в зависимости от давления и начальной массы впрыска в камере сгорания для двух видов жидкого топлива: октана и додекана. В результате проведенных компьютерных экспериментов были получены зависимости максимальной температуры от давления, распределения двуокиси углерода от массы впрыска, распределения капель по радиусам и поля температуры при оптимальном режиме горения.

Ключевые слова: численное моделирование, октан, додекан, камера сгорания, давление, температура, масса, оптимальный режим.

Askarova A., Bolegenova S.,
Gorokhovski M., Tuyakbaev A.,
Ospanova Sh., Nugymanova A.,
Manabayeva P.

**Computer simulation of dispersion
and combustion processes of liquid
fuels at high turbulence**

Numerical research of burning of liquid fuels is a complex challenge of thermo physics as demands the accounting of a large number of the difficult interconnected processes and the phenomena. Therefore computing experiment becomes more and more important element of research of processes of burning and design of various devices using burning process. In work the mathematical model and the main equations describing process of burning of liquid fuels at high turbulence is stated. Research of processes of disintegration and dispersion depending on pressure and an initial lot of injection in the combustion chamber for two types of liquid fuel is conducted: octane and dodecane. As a result of the made computer experiments dependences of the maximum temperature on pressure were received, distributions of carbon dioxide from a lot of injection, distribution of drops on radiuses and temperature fields at the optimum mode of burning

Key words: numerical modeling, octane, dodecane, combustion chamber, pressure, temperature, weight, optimum mode.

Аскарова Ә., Бөлегенова С.,
Гороховский М., Туякбаев А.,
Оспанова Ш., Нұғыманова А.,
Манабаева Р.

**Жоғары турбуленттіліктегі сұйық
отындардың дисперсиясы және
жану процестерін компьютерлік
модельдеу**

Сұйық отындардың жануын сандық зерттеу күрделі өзара процестер мен құбылыстарды есепке алуды талап ететіндіктен, жылуфизикадағы маңызды мәселе болып табылады. Сондықтан есептеуіш эксперимент жану процестерін зерттеу мен жану процестерін қолданатын әртүрлі құрылғыларды жобалауда негізгі элемент болып табылады. Жұмыста жоғары турбуленттіліктегі сұйық отындардың жану процесін сипаттайтын математикалық модель мен негізгі теңдеулер берілген. Екі сұйық отын түрі октан және додекан үшін жану камерасындағы қысым мен бастапқы бүрку массасына қатысты бүрку және дисперсия процестеріне зерттеу жүргізілді. Жүргізілген компьютерлік модельдеу нәтижелерінде максимал температураның қысымға тәуелділігі, көміртегі қос тотығының массаға қатысты таралуы, тамшылардың радиус бойынша таралуы және тиімді жану режиміндегі температура өрістері алынды.

Түйін сөздер: сандық модельдеу, октан, додекан, жану камерасы, қысым, температура, масса, тиімді режим.

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ДИСПЕРСИИ И ГОРЕНИЯ ЖИДКИХ ТОПЛИВ ПРИ ВЫСОКОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Введение

Численное исследование горения жидких топлив является сложной задачей теплофизики, так как требует учета большого количества сложных взаимосвязанных процессов и явлений. Поэтому вычислительный эксперимент становится все более важным элементом исследования процессов горения и проектирования различных устройств, использующих процесс горения. Можно с уверенностью говорить, что его роль будет возрастать и в дальнейшем. В этой связи все большее распространение в теплофизике получают методы вычислительной гидродинамики, когда появляется возможность оптимизировать эксперимент на основе его виртуального прототипа.

Благодаря достигнутому высокому уровню исследований открываются перспективы широкого применения методологии и конкретных физических результатов в рассматриваемых направлениях, а также пути более эффективного применения методов математического моделирования с использованием современной вычислительной техники в различных предметных областях [1].

В качестве актуальности вопроса использования жидких топлив можно сказать, что в течение последних лет выпускаются 60 миллионов легковых автомобилей, то есть 165000 автомобилей производятся за день. Двигатели автомобилей нынешнего поколения существенно отличаются от тех, что использовались несколько десятилетий назад. Основной процесс горения в двигателях остается прежним, но виды впрысков существенно различаются. Например, современные двигатели с электронным управлением системы впрыска в месте с механизмами сжатия воздуха, который способствует улучшению процесса горения, используют только требуемое количество топлива [2-3].

Таким образом, проблемы экономии энергоресурсов и улучшения экологического состояния теплоэнергетического объекта во многом зависят от организации качественного сжигания топлива.

Однако, учитывая тот факт, что все имеющиеся технологии топливподготовки и собственно сжигания доведены практически до совершенства, а КПД и экологическая чистота котлоагрегатов во многих случаях оставляет желать лучшего, остро встает проблема поиска новых методов в данной области. В этом случае актуальным в решении поставленных задач является моделирование процессов распада, дисперсии, испарения и горения капель жидкого топлива при различных начальных условиях.

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 тепло-массообмен 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 постановка задачи

Большинство течений по своей природе имеют турбулентный характер и состояние турбулентности при движении потока сильно влияет на такие параметры течения, как перенос импульса, температуры и концентрации веществ в смеси. В этой работе приведена математическая модель, описывающая горение жидких топлив на основе уравнений сохранения массы (ρ), импульса ($\rho\vec{u}$), энергии (E) и концентрации (c).

Уравнение сохранения массы записывается следующим образом:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho\vec{u}) = S_{mass}, \quad (1)$$

где u – скорость жидкости. Источниковый член S_{mass} представляет локальное изменение плотности газа за счет испарения или конденсации.

Уравнение сохранения импульса газа имеет следующий вид:

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho(\vec{u} \cdot \text{grad})\vec{u} = \text{div}\vec{\xi} + \rho\vec{g} + S_{mom}. \quad (2)$$

Если рассматривается однофазное течение газа, то $S_{mom}=0$; если течение двухфазное, то S_{mom} представляет собой локальную скорость изменения импульса в газовой фазе за счет движения капель.

Уравнение сохранения внутренней энергии:

$$\rho \frac{\partial E}{\partial t} = \vec{\tau} : \vec{D} - \rho \text{div}\vec{u} - \text{div}\vec{q} + S_{energy}, \quad (3)$$

где q – удельный тепловой поток, представляет собой закон Фурье о передаче тепла, выражение $\vec{\tau} : \vec{D}$ представляет скорость увеличения внутренней энергии за счет вязкой диссипации. Источниковый член S_{energy} обозначает вклад в изменение внутренней энергии за счет присутствия распыленной жидкой или твердой фазы.

Уравнение сохранения концентрации компоненты m имеет вид:

$$\frac{\partial(\rho c_m)}{\partial t} = - \frac{\partial(\rho c_m u_i)}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\rho \cdot D_{c_m} \cdot \frac{\partial c_m}{\partial x_i} \right) + S_{mass} \quad (4)$$

где ρ_m – массовая плотность компоненты m , ρ – полная массовая плотность.

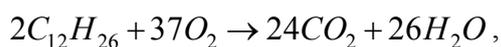
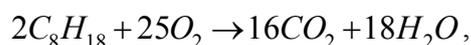
Более универсальными моделями в инженерных расчетах турбулентных потоков являются модели с двумя дифференциальными уравнениями. Наиболее часто в технических течениях используется модель с двумя дифференциальными уравнениями [4-5]. Это $k - \varepsilon$ модель, когда решаются два уравнения для кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ε :

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \frac{\partial \bar{u}_j k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + G - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \frac{\partial \bar{u}_j \varepsilon}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] = c_{\varepsilon_1} \frac{\varepsilon}{k} G - \left[\left(\frac{2}{3} c_{\varepsilon_2} - c_{\varepsilon_3} \right) \rho \varepsilon \delta_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right] - c_{\varepsilon_2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

Это стандартные $k - \varepsilon$ уравнения. Величины $c_{\varepsilon_1}, c_{\varepsilon_2}, c_{\varepsilon_3}, \sigma_k, \sigma_\varepsilon$ являются модельными константами, которые определяются из эксперимента. Стандартные значения этих констант обычно используются в инженерных вычислениях и взяты из справочной литературы [6-7].

Химическая кинетика процесса горения представлена в виде обобщенных химических реакций для двух видов топлива – октана и додекана:



в результате которых образуются следующие продукты горения: CO_2 и H_2O .

Физическая постановка задачи

В работе была использована модель камеры сгорания в форме цилиндра, высота которой 15 см, диаметр 4 см. Общий вид камеры сгорания представлен на рисунке 1. Расчетная область состоит из 650 ячеек. С помощью сопла, которое располагается в центре нижней части камеры сгорания, впрыскивается жидкое топливо. Площадь форсунки равна $2 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$. Температура стенок камеры сгорания 353 К. Начальная температура газа в камере сгорания 900 К, топливо впрыскивается при 300 К. Начальный радиус впрыскиваемых капель 25 мкм. Угол, при котором впрыскиваются капли, равен 10^0 . Давление в камере сгорания составляет 80 бар, скорость впрыска жидкого топлива равна 250 м/с.

В данной статье были проведены исследования по влиянию давления и массы впрысков жидких топлив на процесс распыла и дисперсии

октана и додекана в камере сгорания. Было исследовано влияние давления на различные параметры процесса горения двух видов жидких топлив: октана и додекана. В процессе проведения вычислительного эксперимента были взяты значения давления от 20 бар до 200 бар с интервалом в 20 бар для октана C_8H_{18} и додекана $C_{12}H_{26}$. Аналогичные вычисления ранее проводились учеными лаборатории моделирования проблем теплопереноса и механики жидкости, которые были отражены в некоторых значимых научных трудах [4-6].

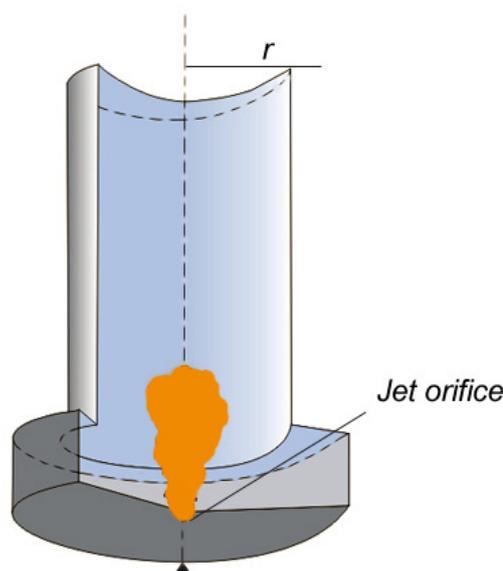


Рисунок 1 – Общий вид камеры сгорания

На рисунке 2 представлено распределение максимальной температуры в зависимости от давления в камере сгорания. При сравнении кривых октана и додекана можно увидеть, что с ростом давления максимальная температура в камере сгорания при горении октана увеличивается. Максимальная температура в камере сгорания при сжигании октана составила 1948,79 К при давлении 100 бар. А при горении додекана температура монотонно растет и достигает наибольшего значения 1954,98 К при давлении 80 бар.

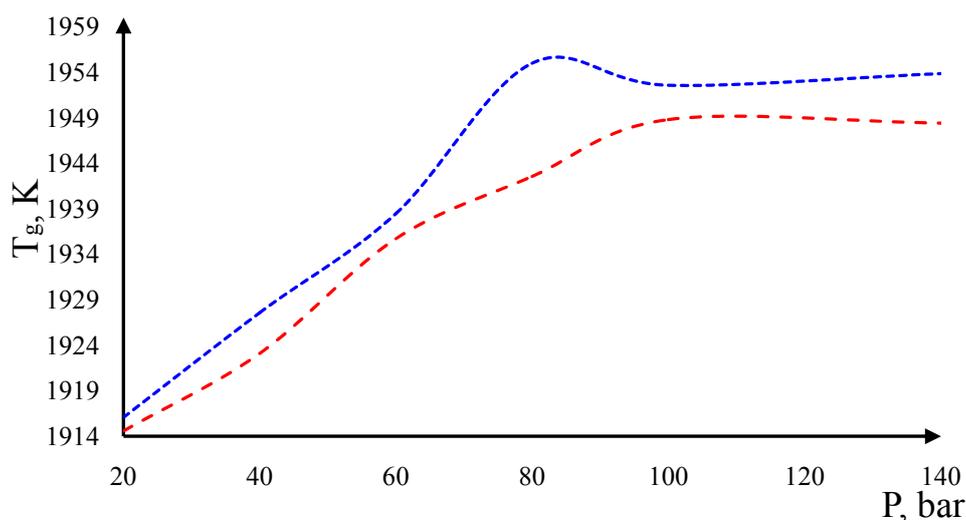


Рисунок 2 – Зависимость максимальной температуры октана C_8H_{18} и додекана $C_{12}H_{26}$ от давления в камере сгорания (красная линия – октан, синяя линия – додекан)

Анализ полученных результатов численного моделирования позволяет сделать вывод о том, что оптимальным для октана является давление 100 бар и для додекана 80 бар. При этих давлениях температура капель и температура горения в камере сгорания достигает максимальных значений. При данных значениях давления начинается интенсивное испарение капель жидкого топлива. Также при исследовании влияния давления в камере сгорания на процессы распыла и дисперсии жидких топлив было показано, что для двух видов топлив рост давления приводит к увеличению области высоких температур [7-8].

Также в работе были проведены компьютерные эксперименты по влиянию массы впрысков жидких топлив (октан и додекан) в камеру сгорания на процесс горения. Данные вычисления проводились при оптимальных значениях давления в камере сгорания: для октана 100 бар и для додекана 80 бар. При вычислениях масса топлива варьировалась от 4 мг до 20 мг.

На рисунке 3 представлено влияние массы впрыска октана и додекана на распределение концентрации двуокиси углерода. Анализ кривых показывает очевидное увеличение концентрации CO_2 с ростом массы впрыска жидкого топлива. При массе впрыска 6 мг для октана и 7 мг для додекана выделяется небольшая концентрация углекислого газа в пределах допустимых норм.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что оптимальной для октана можно назвать массу впрыска равной 6 мг и для додекана 7 мг. При этих значениях массы впрыска жидкого топлива температура достигает максимальных значений. Дальнейшее увеличение массы впрыска, как для октана, так и для додекана при оптимальных давлениях ухудшает процесс горения и приводит к последующему понижению температуры [9-12].

На рисунке 4 представлено распределение капель октана по размерам по высоте камеры в момент времени $t=2,5$ мс. В момент времени $t=2,5$ мс капли октана поднялись на высоту камеры равной 0,62 см и 0,72 см, соответственно. Анализируя поведение додекана, можно отметить, что его капли поднимаются на высоту 0,72 см в момент времени $t=2,5$ мс, а размеры капель чуть больше капель октана (рисунок 4b).

Обращая внимание на распределение октана и додекана по радиусам можно заметить, что капли додекана быстрее испаряются и плотность распределения более высокая. Также со временем размер капель октана растет. Так, к примеру, в момент времени 2 мс в нижней части камеры располагаются капли с радиусом 0,024762 мкм. А в это время капли додекана с такими же размерами полностью выгорают, а капли с меньшими радиусами движутся по высоте камеры к выходу.

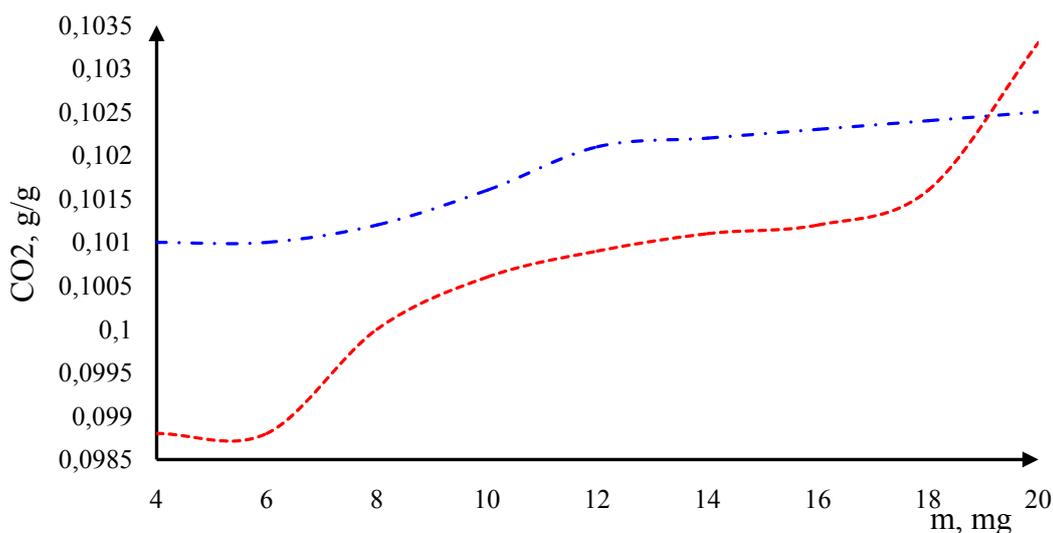


Рисунок 3 – Распределение концентрации углекислого газа при горении октана C_8H_{18} и додекана $C_{12}H_{26}$ в камере сгорания в зависимости от массы жидкого топлива

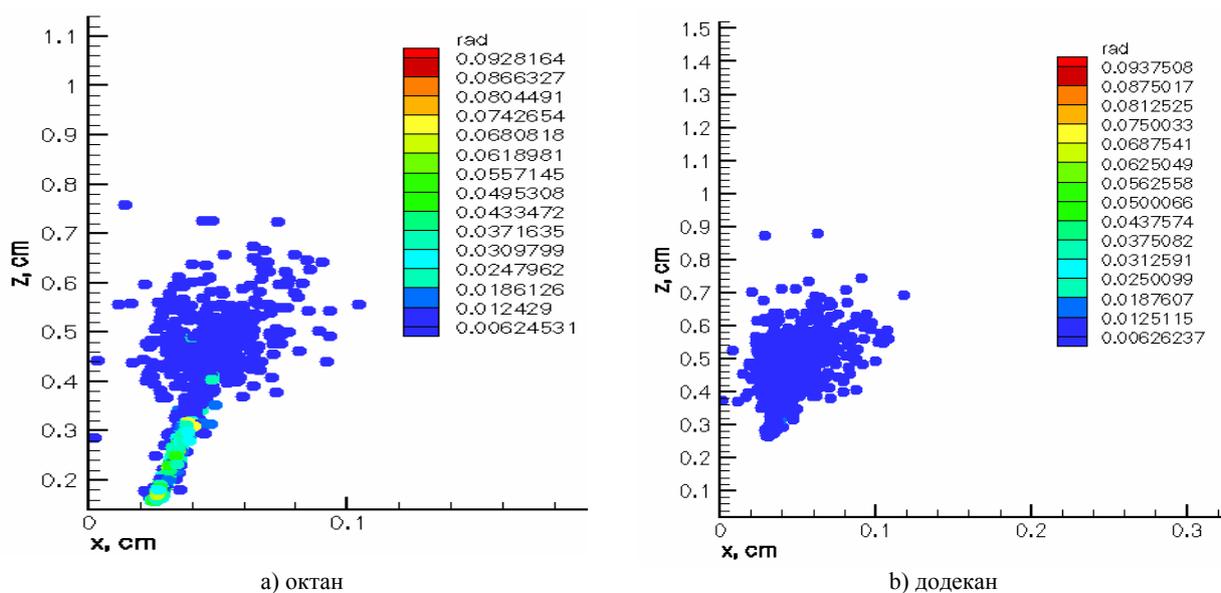


Рисунок 4 – Распределение капель октана додекана по радиусам по высоте камеры сгорания в момент времени $t=2,5$ ms

На рисунке 5 показаны поля температуры в камере сгорания при горении октана и додекана в момент времени $t=2,5$ мс. Эти графики свидетельствует о том, что при горении октана большая часть камеры прогревается до 987,192 К, а при го-

рении додекана в камере дольше всего держится значение температуры равное 1003,05 К. В момент времени $t=2,5$ мс в ядре температурного факела при горении октана температура достигает значения 2687,32 К (рисунок 5а).

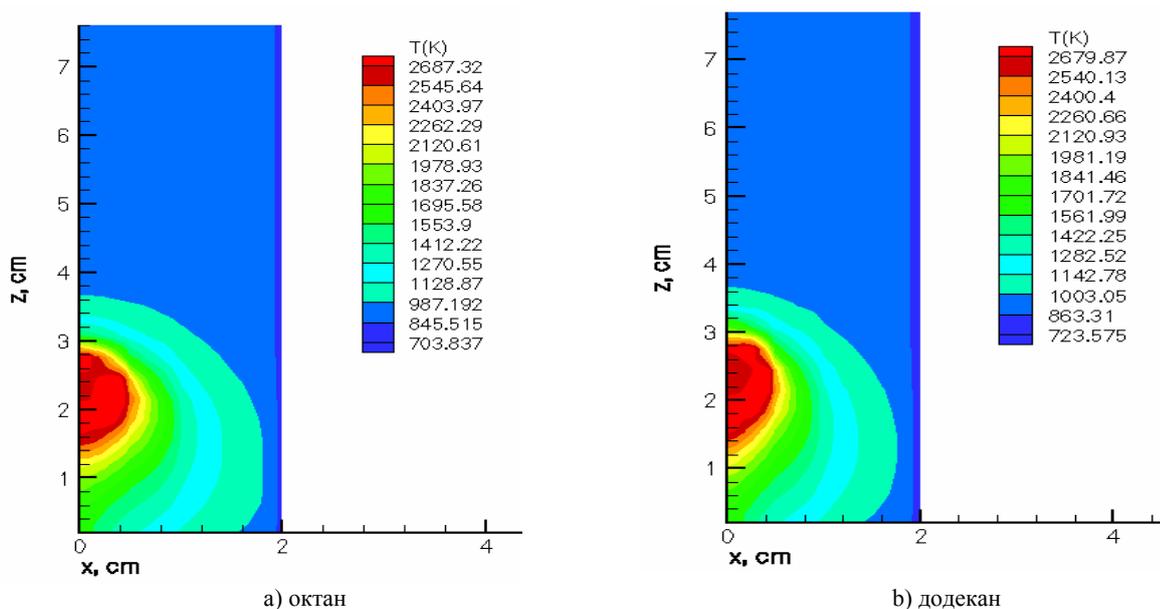


Рисунок 5 – Профили температуры в камере сгорания при горении октана и додекана в момент времени $t=2,5$ мс

При горении додекана максимальная температура составила 2679,87 К, а температура всей камеры, кроме зоны факела, достигает 1003,05 К (рисунок 5б). Для двух рассматриваемых видов топлив при распределении температур наблюдается следующая картина: область, охватываемая максимальной температурой, при горении обоих топлив в различные моменты времени почти одинаковая, но по сравнению с октаном весь объем камеры при сжигании додекана быстрее прогревается до высоких значений температуры. Анализируя полученные данные, можно сделать вывод, что процесс горения октана и додекана происходит в газовой фазе, и по всему объему камеры сгорания наблюдается равномерное распределение температуры.

При исследовании влияния давления в камере сгорания на процессы распыла и дисперсии жидких капель при высокой турбулентности установлено, что оптимальным для октана является давление 100 бар и для додекана 80 бар. Показано, что при этих давлениях температура капель и температура горения в камере сгорания достигает максимальных значений, начинается интенсивное испарение капель жидкого топлива и для двух видов топлив (октана и додекана), рост давления приводит к увеличению области высоких температур.

Определены оптимальные массы впрыска двух видов жидких топлив. Для октана наилучшая масса впрыска составляет 6 мг, а для додекана – 7 мг. При увеличении массы жидкого топлива концентрация углекислого газа ожидаемо повышается. Дальнейшее увеличение массы двух топлив приводит к последующему понижению температуры.

Заключение

По полученным результатам вычислительных экспериментов по горению двух видов жидких топлив можно сделать заключение:

- капли октана и додекана поднимаются на различные высоты, но имеют почти одинаковые размеры;
- при горении обоих видов топлив температура в камере сгорания достигает максимальных значений, но при горении октана в большей части камеры сгорания сохраняется меньшая температура, чем при горении додекана;
- концентрации паров топлив (октан и додекан) в начальные моменты времени имеют почти одинаковые значения, но с течением времени достигают максимальных значений по всему объему камеры.

Литература

- 1 Askarova A., Bolegenova S., Bolegenova Symbat, Berezovskaya I., Ospanova Sh. et al. Numerical Simulation of the Oxidant's Temperature and Influence on the Liquid Fuel Combustion Processes at High Pressures // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2015. – Vol. 10, №4. – P. 90-95.
- 2 Bolegenova S.A., Askarova A.S., Gabitova Z., Bekmuhamet A., Ospanova Sh. Using 3d modeling technology for investigation of conventional combustion mode of bkz-420-140-7c combustion chamber // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2014. – Vol. 9. – P.24-28.
- 3 Askarova A.S., Bolegenova S., Maximov V. et al. Investigation of turbulence characteristics of burning process of the solid fuel in BKZ 420 combustion chamber // WSEAS Transactions on Heat & Mass Transfer, 2014. – P.39-50.
- 4 Ustimenko A.B., Askarova A.S., Messerle V.E., Maximov V., Bolegenova S. Numerical simulation of the coal combustion process initiated by a plasma source // Journal of Thermophysics and Aeromechanics. – Vol. 21. – Issue 6, 2014. – P.747-754.
- 5 Askarova A.S., Loktionova I.V., Messerle V.E., Ustimenko A.B. 3D modeling of the two-stage combustion of Ekibastuz coal in the furnace chamber of a PK-39 boiler at the Ermakovo district power station // Journal of Thermal engineering, 2003. – Vol. 50, Issue 8. – P.633-638.
- 6 Maksimov V.Yu., Bolegenova S.A., Askarova A.S., Bekmuhamet A., Ospanova Sh. Numerical research of aerodynamic characteristics of combustion chamber BKZ-75 mining thermal power station // Journal of Procedia Engineering, 2012. – Vol.42, №389 (162). – P.1250-1259.
- 7 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 c.
- 8 Askarova A.S., Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B. Plasma enhancement of coal dust combustion // 35-th EPS Conference on Plasma Physics. – Hersonissos, 2008. – ECA. – Vol.32. – P.148-152.
- 10 Askarova A.S., Gorokhovskii M.A., Chtab-Desportes A., Voloshina I. Stochastic simulation of the spray formation assisted by a high pressure // 6-th International Symposium on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion. Book Series: AIP Conference Proceedings, 2010. – Vol. 1207. – P.66-73.
- 11 Bekmukhamet A., Bolegenova S.A., Askarova A.S., Beketayeva M.T., Maximov V., OspanovaSh.S., Gabitova Z.K. Numerical modeling of turbulence characteristics of burning process of the solid fuel in BKZ-420-140-7c combustion chamber // International Journal of Mechanics, 2014. – Vol.8. – P.112-122.
- 12 Askarova A., Bolegenova S., Bolegenova Symbat, Berezovskaya I., Ospanova Sh., ShortanbayevaZh., Maksutkhanova A., MukashevaG. andErgalievaA. Numerical Simulation of the Oxidant's Temperature and Influence on the Liquid Fuel Combustion Processes at High Pressures // Journal of Engineering and Applied Sciences. – 2015. – Vol. 10, №4. – P. 90-95.

References

1. Askarova A., Bolegenova S., Bolegenova Symbat, Berezovskaya I., Ospanova Sh. et al. // Journal of Engineering and Applied Sciences, 4, (2015),90-95.
2. Bolegenova S.A., Askarova A.S., Gabitova Z., Bekmuhamet A., Ospanova Sh. / Journal of Engineering and Applied Sciences, 9, (2014), 24-28.
3. Askarova A.S., Bolegenova S., Maximov V. et al. / WSEAS Transactions on Heat & Mass Transfer, (2014), 39-50.
4. Ustimenko A.B., Askarova A.S., Messerle V.E., Maximov V., Bolegenova S. / Journal of Thermophysics and Aeromechanics.6, (2014), 747-754.
5. Askarova A.S., Loktionova I.V., Messerle V.E., Ustimenko A.B. Journal of Thermal engineering, 8, (2003),633-638.
6. Maksimov V.Yu., Bolegenova S.A., Askarova A.S., Bekmuhamet A., Ospanova Sh. / Journal of Procedia Engineering, 42, 389 (162). (2012),1250-1259.
7. Amsden A.A., O'Rourke P.J., Butler, T.D. KIVA-II: A computer program for chemically reactive flows with sprays. – Los Alamos, 1989,p. 160.
8. Askarova A.S., Messerle V.E., Karpenko E.I., Ustimenko A.B. Plasma enhancement of coal dust combustion .35-th EPS Conference on Plasma Physics. – Hersonissos,32, (2008), 148-152.
10. Askarova A.S., Gorokhovskii M.A., Chtab-Desportes A., Voloshina I. Stochastic simulation of the spray formation assisted by a high pressure . 6-th International Symposium on Multiphase Flow, Heat Mass Transfer and Energy Conversion. Book Series: AIP Conference Proceedings, 1207, (2010), 66-73.
11. Bekmukhamet A., Bolegenova S.A., Askarova A.S., Beketayeva M.T., Maximov V., OspanovaSh.S., Gabitova Z.K. Numerical modeling of turbulence characteristics of burning process of the solid fuel in BKZ-420-140-7c combustion chamber .International Journal of Mechanics, 8, (2014), 112-122.
12. Askarova A., Bolegenova S., BolegenovaSymbat, Berezovskaya I., Ospanova Sh., ShortanbayevaZh., Maksutkhanova A., Mukasheva G. and Ergalieva A. / Journal of Engineering and Applied Sciences, 4, (2015), 90-95.