

З.Д. Бегалы*, М.Ж. Рыспаева, И.Э. Березовская

Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

*e-mail: begalyzere98@gmail.com

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАЧАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ ТРИДЕКАНА В КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

Аннотация. В данной статье проведен анализ результатов численного исследования влияния начальной массы впрыска и начальной температуры окислителя на процесс горения тридекана ($C_{13}H_{28}$). В ходе исследовательской работы был использован программный пакет KIVA. На основании результатов проведенного численного моделирования получено распределение температуры капель топлива и концентрации CO_2 при различных значениях массы впрыскиваемого жидкого топлива в камере сгорания. Проанализировав результаты исследования, выяснилось, что эффективная начальная масса впрыска топлива равна 9 мг. Изучив зависимость максимальной температуры и концентрации углекислого газа в камере сгорания, образующейся в результате горения топлива, от начальной температуры окислителя в камере сгорания, был сделан вывод о том, что значение эффективной начальной температуры окислителя равно 900 К.

Ключевые слова: численное моделирование, жидкое топливо, тридекан, камера сгорания, KIVA, масса, температура.

Введение. Согласно мировой статистике, 40% общего потребления энергии достигается за счет сжигания жидкого топлива. Поэтому одним из важных вопросов на сегодняшний день является всестороннее изучение процесса горения и рассмотрение методов снижения количества вредного воздействия, выделяемого в процессе горения [1-4].

Изучение процесса горения жидкого топлива требует значительного количества взаимосвязанных процессов и явлений, поэтому лучшим решением является использование численного моделирования для прогнозирования и изучения поведения таких сложных систем [5].

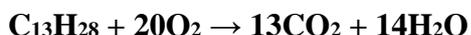
В статье рассматривается численное моделирование процессов распыла и горения впрыска жидкого топлива на основе решения дифференциальных уравнений турбулентного течения с впрыском. Сформулирована математическая модель горения жидких впрысков, которая основывается на уравнениях движения для жидкой стадии, а также уравнениях энергии и переноса массы с соответствующими граничными условиями.

Методы. Для проведения вычислительных экспериментов по численному моделированию процессов теплопереноса при горении жидкого топлива в реальных камерах сгорания, в работе использовался пакет компьютерных программ KIVA.

В данной работе исследуется горение жидкого топлива (тридекана) в камере сгорания высотой 15 см и радиусом 2 см, расчетная область состоит из 600 ячеек. Время горения топлива составляет 4 мс, топливо впрыскивается в камеру сгорания через круглое сопло, расположенное в середине нижней части камеры. Время инъекции капли топлива 1,4 мс, скорость впрыска топлива 250 м / с, площадь форсунки $2 \cdot 10^{-4}$ см². Температура стенки камеры сгорания 353 К.

Тридекан - органическое соединение, относящееся к классу алканов. При нормальных условиях вещество представляет собой бесцветную воспламеняющуюся жидкость плотностью 0,7568 г / мл, $T_{пл}=267,8$ К, $T_{кип}=508,6$ К. Тридекан содержится в нефтепродуктах, а один из компонентов входит в дизельное топливо [6].

Реакция горения тридекана в общем виде записывается следующим образом:



В ходе работы в первую очередь были проведены компьютерные эксперименты по изучению влияния массы жидкого топлива (тридекана), впрыскиваемого в камеру сгорания, на процесс его горения. При расчетах масса топлива варьировалась от 5 до 20 мг.

Результаты. На рисунках 1-2 показаны результаты вычислительных экспериментов по изучению влияния массы впрыскиваемого жидкого топлива на процесс горения тридекана. На рис. 1 показано распределение температуры каплей тридекана в камере относительно массы впрыскиваемого жидкого топлива. Анализ рисунка 1 показывает, что из-за увеличения массы температура тридекана также увеличивается, и при массе 9 мг составляет 657 К.

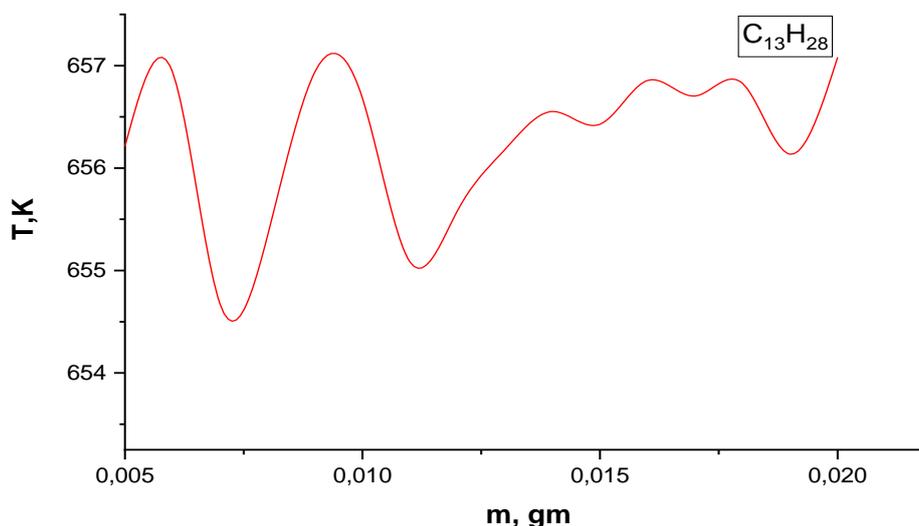


Рис. 1. График зависимости температуры каплей тридекана $C_{13}H_{28}$ от массы впрыска жидкого топлива

На рис. 2 изображено влияние массы впрыска на распределение концентрации углекислого газа. Согласно результатам анализа приведенных кривых, по мере увеличения массы впрыска жидкого топлива увеличивается и концентрация CO_2 , что было доказано и в ранее исследованных работах [7-8].

В рамках предельно допустимых норм для тридекана выделяется не слишком большая концентрация углекислого газа в массе 9 мг.

Таким образом, можно сделать вывод, что значение эффективной массы для тридекана составляет 9 мг. В этой массе топливо полностью сгорает без остатка и наблюдается минимальная концентрация углекислого газа.

Теперь остановимся на результатах численного моделирования горения тридекана относительно начальной температуры окислителя в камере сгорания. Исследования проводились в соответствии со значением эффективной массы обнаруженного тридекана, а значения температуры окислителя варьировали от 500 К до 1500 К.

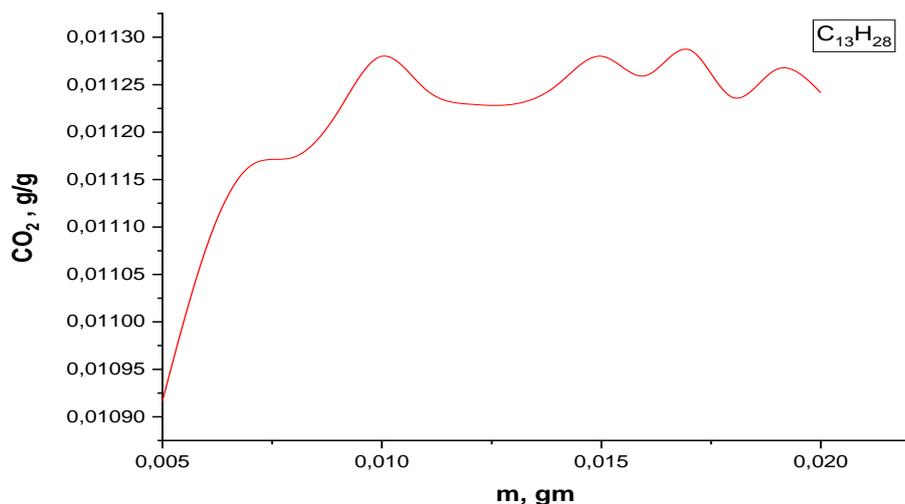


Рис. 2. Распределение концентрации углекислого газа CO_2 по отношению к массе жидкого топлива m при горении тридекана $\text{C}_{13}\text{H}_{28}$ в камере сгорания

Анализ рисунка 3 показывает, что если температура окислителя в камере сгорания имеет значения выше 800 К, то в данном случае топливо интенсивно сгорает, выделяется огромное количество тепла и камера сгорания нагревается до 2500 К. В этом случае начальная температура окислителя существенно влияет на горение тридекана [9-11], так как из-за изменения значений начальной температуры с 900 К до 1500 К максимальное значение температуры увеличивается с 2069,55 К до 2486,6 К.

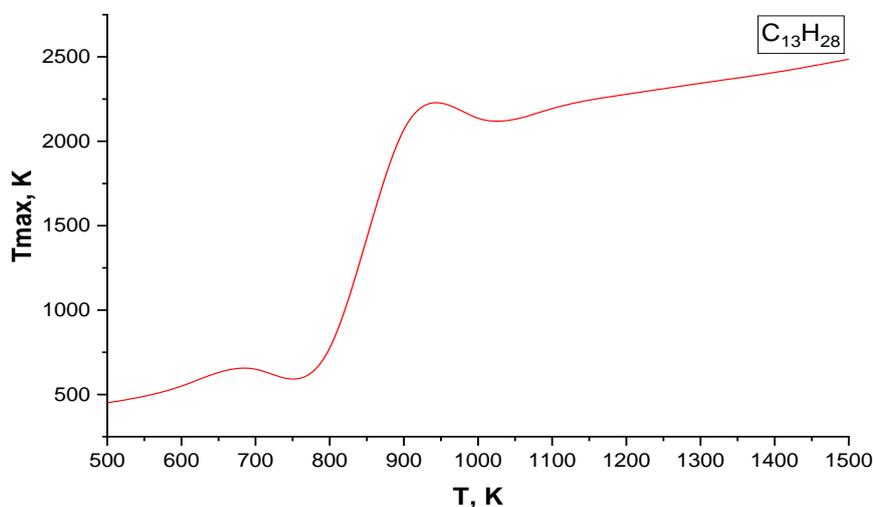


Рис. 3. Зависимость максимальной температуры горения T_{\max} , образующейся в результате горения тридекана $\text{C}_{13}\text{H}_{28}$, от начальной температуры окислителя T в камере сгорания

На рис. 4 изображено распределение максимальной концентрации углекислого газа для горящего топлива (тридекана) относительно начальной температуры окислителя в камере сгорания. В результате горения тридекана образуется достаточно высокая концентрация углекислого газа. Как видно из рисунка, при увеличении значения температуры с 900 К до 1500 К концентрация выделяющегося углекислого газа изменяется от 0,0120849 г/г до 0,0123537 г/г.

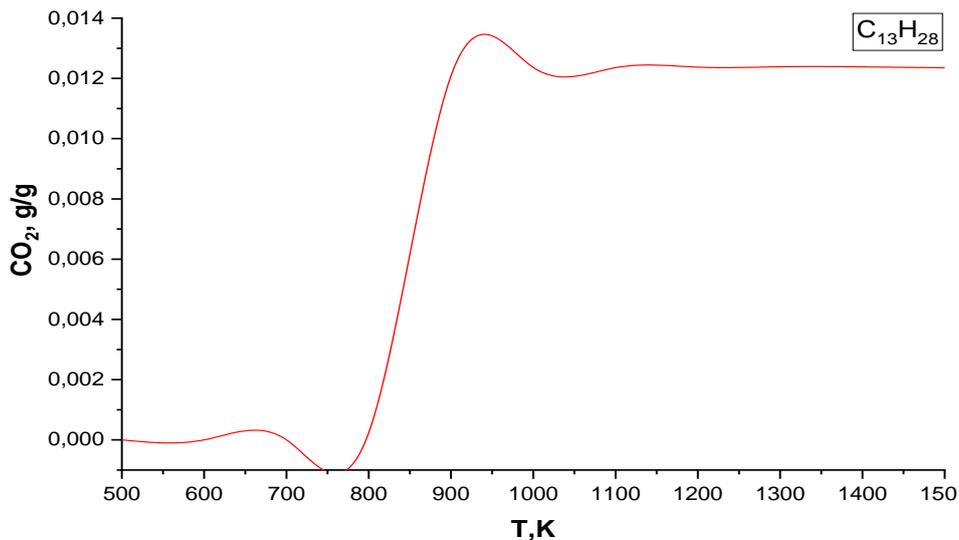


Рис. 4. Зависимость концентрации CO_2 углекислого газа, образующегося в результате горения тридекана $\text{C}_{13}\text{H}_{28}$, от начальной температуры окислителя T в камере сгорания

Анализируя рисунки 3-4, можно сделать вывод о том, что эффективная начальная температура окислителя в камере сгорания для тридекана равна 900 К. При заданном значении температуры топливо быстро взаимодействует с окислителем, камера нагревается до высоких температур, а концентрация образующегося углекислого газа не превышает предельной нормы.

На рис.5 изображено распределение температуры в камере сгорания тридекана в моменты времени $t=2,5$ мс, $t=4$ мс в соответствии со значением начальной температуры окислителя 900 К и эффективным значением массы. На этих графиках можно увидеть, как меняется температура в камере сгорания в данный момент времени.

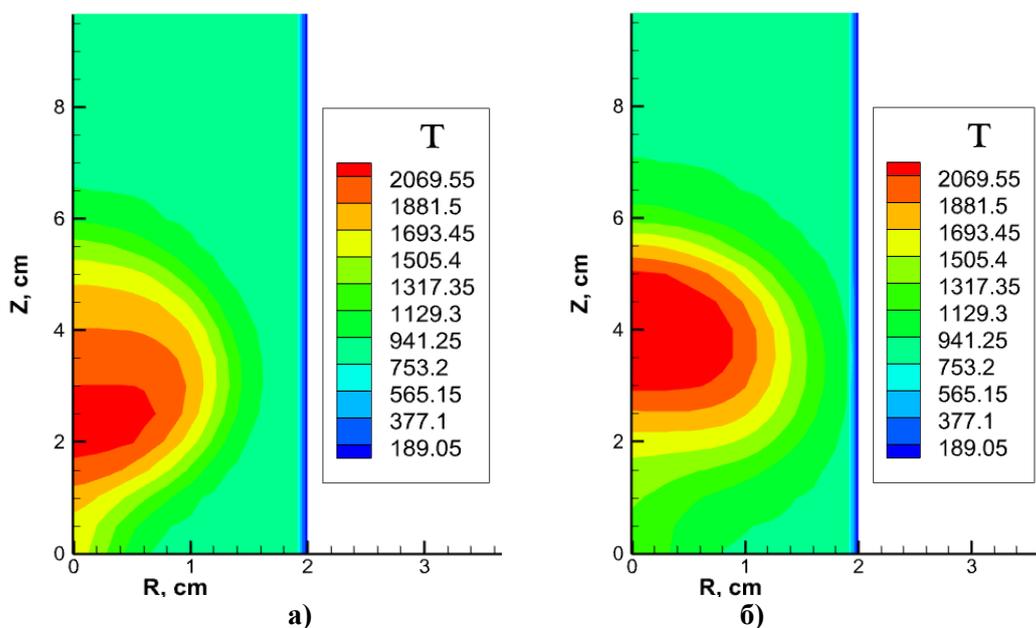


Рис. 5. Поле температуры в разные моменты времени
а) $t = 2,5$ мс, б) $t = 4$ мс.

Как видно из рисунка 5 а, при горении тридекана в момент времени $t=2,5$ мс область максимальных температур достигает высоты 4.8 см вдоль камеры сгорания, а остальная часть камеры нагревается до 1000 К. На рисунке 5б изображено распределение температуры в момент времени $t=4$ мс. При воспламенении паров топлива в смеси с окислителем топливо (тридекан) начинает быстро воспламеняться, охватывая факелом объемную площадь по ширине камеры сгорания.

На рисунке 6 показано изменение концентрации паров тридекана в момент времени $t = 2,5$ мс и $t = 4$ мс в соответствии с начальной температурой окислителя 900 К и эффективным значением массы.

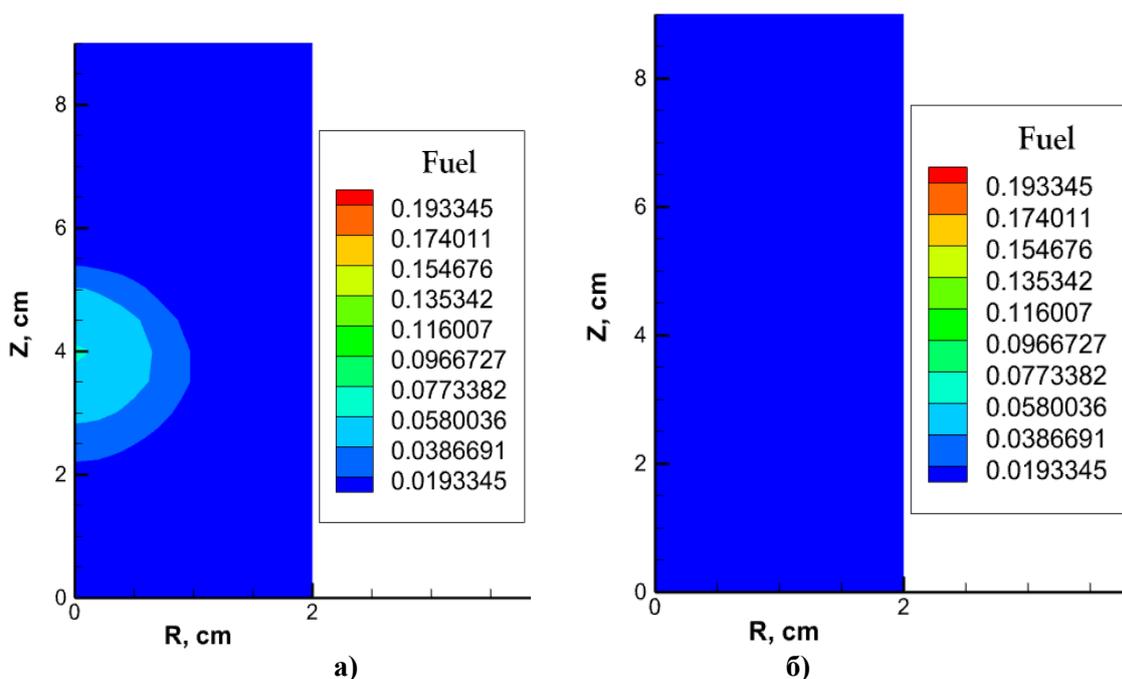


Рис. 6. Поле концентрации паров топлива в разные моменты времени:
а) $t = 2,5$ мс, б) $t = 4$ мс.

Из-за высокой турбулентности объем топлива в камере уменьшается. В данный момент времени в результате горения тридекана на оси камеры сгорания пары топлива рассеиваются до 5 см.

В остальной части камеры сгорания концентрация паров топлива минимальна. Рисунок 6б показывает изменение пара тридекана в соответствии с моментом времени $t=4$ мс при начальной температуре $T=900$ К. Как видно из рисунка, тридекан горит без остатка, пары топлива почти нулевые. В момент времени 4 мс образуется минимальная концентрация пара тридекана, равная 0,01 г/г.

На рис. 7 представлены результаты численного моделирования углекислого газа, образующегося в процессе горения тридекана в соответствии с эффективным значением температуры 900 К и массы. Результаты анализа рисунков показали, что максимальное количество углекислого газа при горении тридекана, равное 0,0120849 г/г, образуется на оси камеры сгорания. На выходе из камеры сгорания концентрация углекислого газа медленно уменьшается и принимает минимальное значение. Например, при значении эффективной температуры 900 К концентрация углекислого газа была равна 0,0010078 г/г.

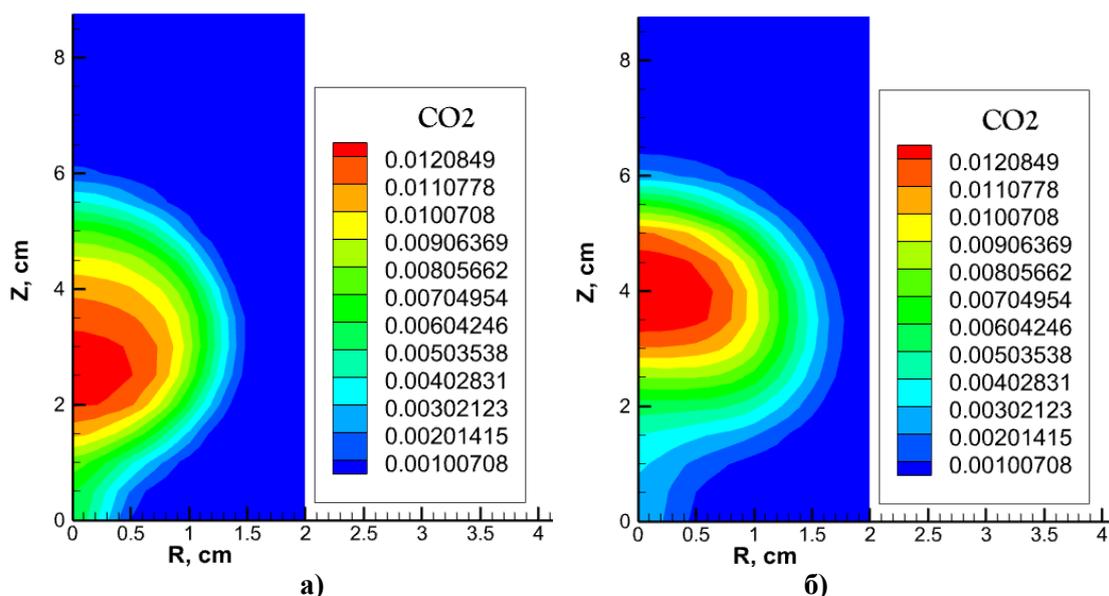


Рис. 7. Распределение концентрации CO_2 углекислого газа, образующегося в результате горения тридекана в разные моменты времени:
а) $t = 2,5$ мс, б) $t = 4$ мс.

Выводы. В результате изучения и анализа результатов экспериментов, описывающих влияние массы впрыска и начальной температуры окислителя на горения жидкого топлива в камере сгорания с высокой турбулентностью, можно сделать следующие выводы.

Увеличение массы впрыскиваемого топлива приводит к увеличению площади пламени и повышению общей температуры в камере сгорания. Анализируя результаты эксперимента, мы пришли к выводу, что эффективная начальная масса впрыска тридекана составляет 9 мг. Кроме того, экспериментально доказано, что наиболее эффективное значение начальной температуры окислителя в камере сгорания равно 900 К. При заданной температуре топливо полностью сгорает, а камера сгорания нагревается до достаточно высоких температур, соответственно концентрация образующегося углекислого газа принимает минимальное значение.

Эти полученные результаты вносят свой вклад в решение проблемы повышения эффективности горения топлива и снижения количества вредных веществ, образующихся в результате процесса горения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Аскарлова А. С., Волошина И. Э., Рыспаева М. Ж. Численное моделирование образования продуктов реакции при сжигании жидких топлив //Вестник КазНУ, серия физическая. – 2007. – №. 2. – С. 24.
- [2] Inam S. A., Hussain M., Baig M. M. Numerical Simulation of Liquid Fuel Injection in Combustion Chamber //Arabian Journal for Science and Engineering. – 2019. – Т. 44. – №. 6. – С. 5889-5895.
- [3] Von Helldorff H., Micklow G. Gaseous and Liquid Jet Direct Injection Simulations Using KIVA-3V //Journal of Multidisciplinary.
- [4] Askarova A. S. et al. Computer simulation of liquid fuel combustion in developed turbulence using the soot formation and oxidation model. – 2020.
- [5] Amsden A. A., O'Rourke P. J., Butler T. D. KIVA-II: A computer program for chemically reactive flows with sprays. – Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States), 1989. – №. LA-11560-MS.
- [6] Rumble J. R. et al. (ed.). CRC handbook of chemistry and physics. – Boca Raton, FL : CRC press, 2018. – Т. 100.

[7] Белегенова С.А., Бекмухамет А., Оспанова Ш.С., Ергалиева А.Б. Исследование влияния впрыскиваемой массы жидкого топлива на процессы образования вредных веществ // 19-ая Всероссийская научная конференция студентов-физиков и молодых ученых. – Архангельск, 2013.- С. 490-491.

[8] Аскарова А. и др. Компьютерное моделирование процессов дисперсии и горения жидких топлив при высокой турбулентности //Вестник. Серия Физическая (ВКФ). – 2016. – Т. 56. – №. 1. – С. 28-35.

[9] Askarova A. 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. – Т. 10. – №. 4. – С. 90-95.

[10] Ospanova S. et al. 3D modelling of heat and mass transfer processes during the combustion of liquid fuel //Proceedings of 15th International Scientific Conference on Renewable Energy and Innovative Technologies, Tech Coll Smolyan, Smolyan, Bulgaria. Bulgarian Chemical Communications. – 2016. – Т. 48. – С. 229-235.

[11] Askarova A. S. et al. On the effect of the temperature boundary conditions on the walls for the processes of heat and mass transfer //International journal of mechanics. – 2016. – Т. 10. – С. 349-355.

REFERENCES

[1] Askarova A. S., Voloshina I. Je., Ryspaeva M. Zh. Chislennoe modelirovanie obrazovaniya produktov reakcii pri szhiganiy zhidkih topliv //Vestnik KazNU, seriya fizicheskaja. – 2007. – №. 2. – S. 24.

[2] Inam S. A., Hussain M., Baig M. M. Numerical Simulation of Liquid Fuel Injection in Combustion Chamber //Arabian Journal for Science and Engineering. – 2019. – Т. 44. – №. 6. – С. 5889-5895.

[3] Von Helldorff H., Micklow G. Gaseous and Liquid Jet Direct Injection Simulations Using KIVA-3V //Journal of Multidisciplinary.

[4] Askarova A. S. et al. Computer simulation of liquid fuel combustion in developed turbulence using the soot formation and oxidation model. – 2020.

[5] Amsden A. A., O'Rourke P. J., Butler T. D. KIVA-II: A computer program for chemically reactive flows with sprays. – Los Alamos National Lab.(LANL), Los Alamos, NM (United States), 1989. – №. LA-11560-MS.

[6] Rumble J. R. et al. (ed.). CRC handbook of chemistry and physics. – Boca Raton, FL : CRC press, 2018. – Т. 100.

[7] Bolegenova S.A., Bekmuhamet A., Ospanova Sh.S., Ergaliev A.B. Issledovanie vlijaniya vpryskivaemoj massy zhidkogo topliva na processy obrazovaniya vrednyh veshhestv // 19-aja Vserossijskaja nauchnaja konferencija studentov-fizikov i molodyh uchenyh. – Arhangel'sk, 2013.- S. 490-491.

[8] Askarova A. i dr. Komp'yuternoe modelirovanie processov dispersii i gorenija zhidkih topliv pri vysokoj turbulentsi //Vestnik. Seriya Fizicheskaja (VKF). – 2016. – Т. 56. – №. 1. – S. 28-35.

[9] Askarova A. 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. – Т. 10. – №. 4. – С. 90-95.

[10] Ospanova S. et al. 3D modelling of heat and mass transfer processes during the combustion of liquid fuel //Proceedings of 15th International Scientific Conference on Renewable Energy and Innovative Technologies, Tech Coll Smolyan, Smolyan, Bulgaria. Bulgarian Chemical Communications. – 2016. – Т. 48. – С. 229-235.

[11] Askarova A. S. et al. On the effect of the temperature boundary conditions on the walls for the processes of heat and mass transfer //International journal of mechanics. – 2016. – Т. 10. – С. 349-355.

З.Д. Бегалы*, М.Ж. Рыспаева, И.Э. Березовская

эл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

*e-mail: begalyzere98@gmail.com

ЖАНУ КАМЕРАСЫНДАҒЫ ТРИДЕКАННЫҢ ЖАНУ ПРОЦЕССИНЕ БАСТАПҚЫ ПАРАМЕТРЛЕРДІҢ ӘСЕРІН САНДЫҚ ЗЕРТТЕУ

Аңдатпа. Бұл мақалада сұйық отын тридеканның (C₁₃H₂₈) жану процессіне бастапқы бүрку массасы мен тотытырғыштың бастапқы температурасының әсерін сандық зерттеу нәтижелеріне

• Физико-математические науки

талдау жасалынды. Зерттеу жұмыстары барысында KIVA бағдарламалық пакеті қолданылды. Жүргізілген сандық модельдеу нәтижелері негізінде жану камерасындағы бүркілетін сұйық отынның әртүрлі масса мәндерінде отын тамшыларының температурасының және CO₂ концентрациясының таралуы алынды. Отынның тиімді бастапқы бүрку массасы 9 мг-ға тең екендігі анықталды. Отынның жануы нәтижесінде түзілетін жану камерасындағы максимал температура мен көмірқышқыл газы концентрациясының жану камерасындағы тотықтырғыштың бастапқы температурасынан тәуелділігін зерттей келе, тотықтырғыштың тиімді бастапқы температурасының мәні 900К-ге тең деген қорынды жасалынды.

Негізгі сөздер: сандық модельдеу, сұйық отын, тридекан, жану камерасы, KIVA, масса, температура.

Z. Begaly*, M. Ryspayeva, I. Berezovskaya
al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
*e-mail: begalyzere98@gmail.com

NUMERICAL RESEARCH OF THE INFLUENCE OF INITIAL PARAMETERS ON THE PROCESS OF TRIDECANE COMBUSTION IN THE COMBUSTION CHAMBER

Abstract. This article analyzes the results of a numerical study of the effect of the initial injection mass and the initial temperature of the oxidizer on the tridecane (C₁₃H₂₈) combustion process. During the research work, the KIVA software package was used. Based on the results of the performed numerical simulation, the distribution of the temperature of the fuel droplets and the concentration of CO₂ were obtained for various values of the mass of injected liquid fuel in the combustion chamber. After analyzing the results of the study, it turned out that the effective initial mass of fuel injection is 9 mg. Having studied the dependence of the maximum temperature and concentration of carbon dioxide in the combustion chamber, formed as a result of fuel combustion, on the initial temperature of the oxidizer in the combustion chamber, it was concluded that the value of the effective initial temperature of the oxidizer is 900 K.

Keywords: numerical modeling, liquid fuel, tridecane, combustion chamber, KIVA, mass, temperature.