УДК 536.468

А.О. ПЛЕШКО, студент гр. 5БМ03 (ТПУ)
Д.М. КЛЕПИКОВ, аспирант гр. А1-13 (ТПУ)
С.В. БЕЛЯЕВ, аспирант гр. А0-13 (ТПУ)
Научный руководитель Д.О. ГЛУШКОВ, к.ф.-м.н., доцент ИШФВП (ТПУ)
г. Томск

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ГЕЛЕОБРАЗНЫХ ТОПЛИВ ПРИ НАГРЕВЕ ЧАСТИЦ В ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ

Введение

В настоящее время актуальным направлением развития теории горения конденсированных веществ является исследование процессов зажигания и горения гелеобразных топлив [1], которые по агрегатному состоянию занимают промежуточное положение между жидкими и твердыми топливами и сочетают их преимущества в плане относительно высоких энергетических и экологических характеристик, а также показателей безопасности при хранении и применении [2].

Для детального анализа закономерностей, условий и характеристик протекания процессов микровзрывного диспергирования гелеобразных топлив различного состава необходимо развитие современных подходов (например, [3]) к проведению экспериментальных исследований. До настоящего времени не известны результаты систематического анализа характеристик микровзрывного диспергирования при зажигании и горении частиц гелеобразных топлив [4].

Поэтому целью данной работы является экспериментальное исследование характеристик микровзрывного диспергирования при зажигании одиночных частиц группы составов гелеобразного топлива в высокотемпературной неподвижной воздушной среде с использованием программно-аппаратного комплекса высокоскоростной видеорегистрации процессов.

Экспериментальное исследование

Исследования выполнены для двух составов гелеобразного топлива на основе водного раствора (10 % масс.) поливинилового спирта (ПВС). Первый состав (No. 1) приготовлен без добавления твердых мелкодисперсных частиц: 50 % об. масло + 48 % об. водный раствор ПВС + 2 % об. эмульгатор. Второй состав (No. 2) приготовлен на основе первого путем добавления в первичную масляную эмульсию (50 % об. масло + 48 % об. водный рас-

твор ПВС + 2 % об. эмульгатор) 30 % мас. угольной пыли. Основные характеристики топливных компонентов приведены в работе [5]. Топливные составы приготовлены по методике, представленной в [6].

Исследование характеристик микровзрывного диспергирования одиночных частиц топлив выполнено с использованием хорошо апробированного экспериментального стенда [7], состоящего из трубчатой муфельной печи, высокоскоростной видеокамеры и координатного механизма с держателем для ввода частиц в печь. Скорости ввода (V_{in}) частиц топлива в муфельную печь составляли 0,06; 0,08; 0,10 м/с.

При проведении экспериментального исследования регистрировалась группа характеристик: время задержки зажигания (t_d) частицы топлива; среднее значение скорости движения (V_p) мелкодисперсных фрагментов, разлетающихся при диспергировании, капли расплава топлива, размеры области (D_c) их выгорания; температура пламени (T_f) в процессе горения топлива.

Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведены зависимости времен задержки зажигания частиц (начальные масса 10 мг и диаметр 2,8 мм) топливных составов No. 1 и No. 2 от температуры разогретого воздуха.

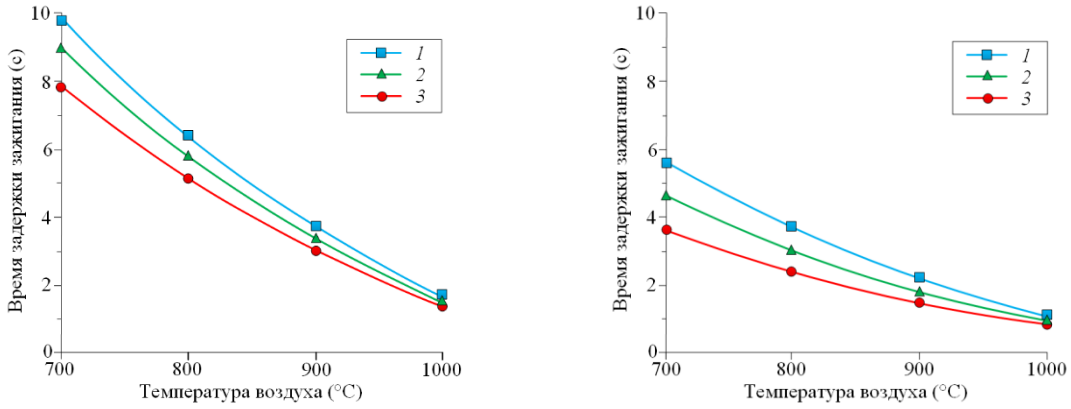


Рис. 1. Зависимости времен задержки зажигания топливных составов No. 1 (*а*) и No. 2 (*б*) от температуры при разных скоростях ввода частиц топлив в камеру сгорания: *1* – 0,06 м/с; *2* – 0,08 м/с; *3* – 0,10 м/с.

Чем выше скорость ввода частиц топлива в камеру сгорания, тем меньше времена задержки зажигания. Результат получен вследствие более высокой интенсивности нагрева частицы топлива, т.к. область с температурой T_g в камере достигается при вводе частицы за меньший промежуток времени.

Кроме этого, стоит отметить достаточно существенное отличие (50–90 %) времен задержки зажигания (рис. 1) частиц топливных составов No. 1

и No. 2. Полученный результат объясняется протеканием разных закономерностей физико-химических процессов при воспламенении разных топливных составов.

Для рассматриваемых в данной работе гелеобразных топлив в первом случае протекает следующая закономерность физико-химических процессов в течение индукционного периода.

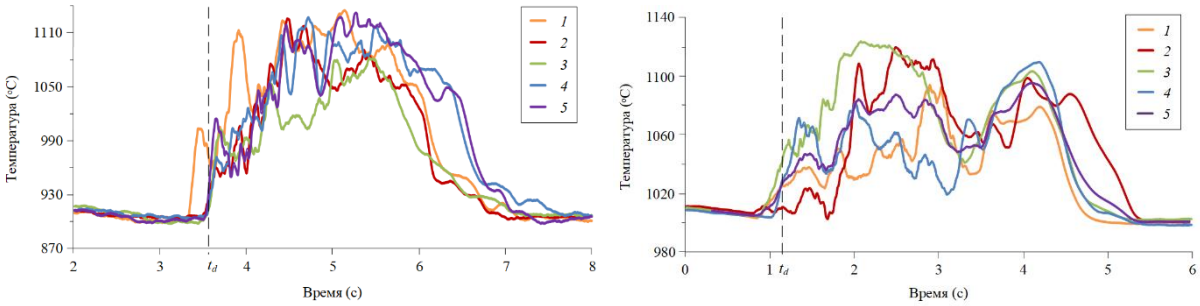
При плавлении маслонаполненных криогелей на их поверхности формируется оболочка из расплавленного загустителя, под которой находится горючая жидкость. Вследствие такой структуры протекают процессы, не характерные для процесса воспламенения капли однокомпонентной горючей жидкости: формирование большого числа пузырьков в приповерхностном слое; рост их числа и размеров; схлопывание пузырьков и диспергирование исходной капли; при достижении предельных условий происходит газофазное зажигание.

Во втором случае протекает несколько другая закономерность физико-химических процессов.

На начальном этапе прогрева мелкодисперсные твердые частицы увлекаются парами горючей жидкости со свободной поверхности. Вследствие более интенсивного прогрева этих частиц происходит их воспламенение. Но это не ведет к воспламенению парогазовой смеси. По истечению некоторого времени в окрестности капли расплава топлива формируется парогазовая смесь. В течение этого промежутка времени протекает аналогичная совокупность процессов как при зажигании маслонаполненных криогелей (состав No. 1). Существенное отличие состоит в том, что в высокотемпературную среду окислителя вдуваются пары горючей жидкости и мелкодисперсные частицы угля. Поэтому газофазное зажигание гелеобразного топлива, содержащего мелкодисперсные твердые частицы, происходит достаточно равномерно в большой по размерам области.

В рамках данной работы впервые были установлены температуры пламени при горении частиц гелеобразных топлив с использованием метода высокоскоростной двухцветной пирометрии [8]. На рис. 2, 3 приведены температурные тренды пламени в процессе горения, полученные в сериях из 5 экспериментов.

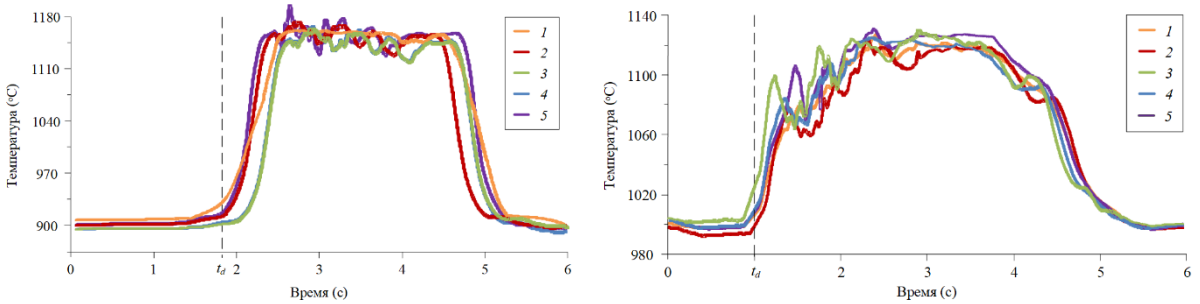
Для топливного состава No. 1 характерны серии микровзрывов после воспламенения частицы топлива. Экстремумы на трендах температуры (рис. 2), полученных при T_g=850–1000 °C, достаточно хорошо соответствуют описанному выше механизму зажигания и горения топливного состава No. 1, т.к. иллюстрируют серию микровзрывов, протекающих до полного выгорания компонентов топлива.



(*а*) (*б*)

Рис. 2. Температуры пламени при горении частиц гелеобразного топлива No. 1 при V_{in}=0,08 м/с и T_g=900 °C (*а*); T_g=1000 °C (*б*); *1–5* – номера экспериментов.

Добавление мелкодисперсных твердых горючих частиц в состав гелеобразного топлива No. 2 не только повышает интенсивность его воспламенения, но и обеспечивает протекание достаточно стабильного выгорания топлива без существенных пульсаций температуры (рис. 3).



(*а*) (*б*)

Рис. 3. Температуры пламени при горении частиц гелеобразного топлива No. 2 при V_{in}=0,08 м/с и T_g=900 °C (*а*); T_g=1000 °C (*б*); *1–5* – номера экспериментов.

Заключение

В результате выполненных экспериментальных исследований установлено принципиальное отличие механизмов воспламенения одиночных частиц двух составов гелеобразных топлив в высокотемпературной неподвижной воздушной среде.

При варьировании температуры разогретого воздуха в диапазоне 700–1000 °C и скоростей ввода в камеру сгорания 0,06–0,10 м/с установлены времена задержки зажигания топлив, скорости движения и размеры области выгорания мелкодисперсных фрагментов и парогазовой смеси после микровзрывного диспергирования капель расплавов топлив. В таких условиях для топливного состава без твердых включений средние скорости движения мелкодисперсных частиц после микровзрывного диспергирования и объемы области выгорания изменяются с 1,1 до 2,2 м/с (на 90–100%) и с 0,7 до

8,0 см^3 (более чем в 11 раз). Для топливного состава с твердыми включениями аналогичные характеристики изменяются с 1,6 до 2,5 м/с (на 45–55%) и с 1,5 до 13,5 см^3 (до 9 раз) в условиях микровзрывного диспергирования капель расплава гелеобразного топлива размеры области выгорания (диаметр около 15–25 мм) в 5–9 раз превышают начальные размеры частицы топлива (диаметр 2,8 мм).

Впервые в рамках метода двухцветной пирометрии, реализованного с применением оригинального ПО, установлены температурные тренды пламени при горении одиночных частиц гелеобразных топлив. Вид этих трендов достаточно хорошо соответствует установленным механизмам зажигания и горения разных топливных составов

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 18-13-00031, https://rscf.ru/project/18-13-00031/.

Список литературы:

1. Jyti B.V.S. et al. Hypergolicity and ignition delay study of gelled ethanolamine fuel // Combust. Flame. Elsevier Inc., 2017. Vol. 183. P. 102–112.

2. Ciezki H.K., Naumann K.W. Some aspects on safety and environmental impact of the German green gel propulsion technology // Propellants, Explos. Pyrotech. 2016. Vol. 41. № 3. P. 539–547.

3. Yang D. et al. Exprimental study on the evaporation characteristics of the kerosene gel droplet // Exp. Therm. Fluid Sci. Elsevier Inc., 2018. Vol. 93. P. 171–177.

4. Padwal M.B., Natan B., Mishra D.P. Gel propellants // Progress in Energy and Combustion Science. Elsevier Ltd, 2021. Vol. 83. P. 100885.

5. Glushkov D.O. et al. Ignition mechanism and characteristics of gel fuels based on oil-free and oil-filled cryogels with fine coal particles // Powder Technol. Elsevier B.V., 2020. Vol. 360. P. 65–79.

6. Vershinina K.Y. et al. Oil-Filled Cryogels: New Approach for Storage and Utilization of Liquid Combustible Wastes // Ind. Eng. Chem. Res. 2019. Vol. 58. № 16. P. 6830–6840.

7. Glushkov D.O. et al. Municipal solid waste recycling by burning it as part of composite fuel with energy generation // J. Environ. Manage. Academic Press, 2019. Vol. 231. P. 896–904.

8. Glushkov D.O., Egorov R.I., Klepikov D.M. High-speed contactless measurements of temperature evolution during ignition and combustion of coal-based fuel pellets // Int. J. Heat Mass Transf. Elsevier Ltd, 2021. Vol. 175. P. 121359.

Информация об авторах:

Плешко Андрей Олегович, студент гр. 5БМ03, ТПУ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, p.andrey12@mail.ru

Клепиков Дмитрий Михайлович, аспирант гр. А1-13, ТПУ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, klepikov.dima9@gmail.com

Беляев Савелий Викторович, аспирант гр. А0-13, ТПУ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, svb29@tpu.ru

Глушков Дмитрий Олегович, к.ф.-м.н., доцент ИШФВП, ТПУ, 634050, г. Томск, пр. Ленина, д. 30, dmitriyog@tpu.ru