

7. Vitaly Sergeev, Igor Ilin, Alexey Fadeev Transport and Logistics Infrastructure of the Arctic Zone of Russia // Transportation research procedia – Vol. 54 – 2021. – P. 936-944.
8. Kai Liu, Ming Wang, Tianjun Zhou Increasing costs to Chinese railway infrastructure by extreme precipitation in a warmer world // Transportation Research Part D – Vol. 93 – 2021. – P. 1-13.
9. Zhujun Chen, Mingkun Jiang, Lingfei Qi, Wu Wei, Ziyi Yu, Wendong Wei, Xinhai Yu, Jinyue Yan Using existing infrastructures of high-speed railways for photovoltaic electricity generation // Resources, Conservation & Recycling – Vol. 178 – 2021. – P. 1-12.

Научный руководитель: д.ф.-м.н. Н.В. Барановский, доцент НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ ТПУ.

## **ВЛИЯНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ТВЕРДЫХ ДОБАВОК К ГЕЛЕОБРАЗНЫМ ТОПЛИВАМ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОВЗРЫВНОГО ДИСПЕРГИРОВАНИЯ**

А.О. Плешко<sup>1</sup>, К.К. Паушкина<sup>2</sup>  
Томский политехнический университет  
ИШФВП, группа А2-13<sup>1</sup>, группа А1-13<sup>2</sup>

В настоящее время актуальным направлением развития теории горения конденсированных веществ является исследование процессов зажигания и горения гелеобразных топлив, которые по агрегатному состоянию занимают промежуточное положение между жидкими и твердыми топливами и сочетают их преимущества, как в плане относительно высоких энергетических и экологических характеристик, так и показателей безопасности при хранении [1]. Одним из широко известных способов повышения энергетических характеристик таких топлив является добавление в их состав мелкодисперсных частиц [2]. Наличие таких частиц в составе гелеобразного топлива может оказывать положительное влияние на характеристики микровзрывного диспергирования при зажигании и горении частиц топлива [3]. Топлива с добавлением мелкодисперсных металлических порошков представляют большой интерес для ракетно-космической отрасли из-за их повышенных энергетических характеристик процесса горения [4]. Металлы в качестве топливной добавки оказывают положительный эффект на повышение скорости и стабильности горения, снижение чувствительности топливного заряда к детонации, упрощение транспортировки и распыления и другие характеристики. В связи с этим перевод жидких топлив в гелеобразное состояние для модификации состава мелкодисперсными частицами металлов с целью улучшения их характеристик является достаточно перспективной задачей.

До настоящего времени не предпринимались попытки систематического изучения процессов зажигания и горения гелеобразных топлив на основе криогелей (характеризующихся трехмерной упруго-деформируемой структурой) с добавлением различных мелкодисперсных частиц (металлических и неметаллических). Поэтому целью данной работы является экспериментальное исследование с использованием программно-аппаратного комплекса высокоскоростной видеорегистрации процессов зажигания и горения одиночных частиц групп составов гелеобразных топлив, содержащих твердые мелкодисперсные металлические и неметаллические включения, в высокотемпературной неподвижной воздушной среде в условиях диспергирования капель расплава при интенсивном нагреве.

Исследования характеристик микровзрывного диспергирования выполнены с использованием экспериментального стенда [5] для одиночных частиц маслonaполненных криогелей на основе 10 %-го водного раствора поливинилового спирта как без твердых включений (состав No. 1), так и с добавлением 30 % мас. мелкодисперсных твердых компонентов: углеродистых микрочастиц (состав No. 2), а также наночастиц алюминия (состав No. 3), железа (состав No. 4) и меди

(состав No. 5). В ходе проведения экспериментов были зарегистрированы времена задержки зажигания частиц топлива ( $t_d$ ), средние значения скоростей движения мелкодисперсных фрагментов ( $V_p$ ), образующихся при диспергировании капли расплава топлива.

В результате проведенных экспериментальных исследований установлены отличия механизмов зажигания и горения одиночных частиц разных топливных составов. Вследствие многокомпонентной структуры гелеобразных топлив механизм их горения достаточно существенно отличается от механизма горения широко распространенных жидких топлив. На рисунках 1–3 приведены кадры видеogramм зажигания и горения частиц рассматриваемых типичных составов гелеобразных топлив (без добавления твердых частиц, с добавлением углеродистых и металлических частиц) в высокотемпературной неподвижной воздушной среде при  $T_g = 900$  °С.

На примере типичного гелеобразного топлива (рисунок 1) установлена следующая совокупность взаимосвязанных физико-химических процессов, протекающих при нагреве одиночной частицы гелеобразного топлива в высокотемпературной неподвижной среде окислителя. В процессе лучистого нагрева частица топлива начинает плавиться, а образующаяся на поверхности частицы жидкость – испаряться. В окрестности частицы формируется горючая парогазовая смесь. Жидкие компоненты топлива (горючее и загуститель) после его плавления разделяются. Из-за отличия поверхностного натяжения загуститель образует оболочку на поверхности капли расплава, горючая жидкость располагается внутри капли под слоем загустителя. Благодаря образовавшейся структуре дальнейший нагрев капли приводит к образованию многочисленных центров свободных границ раздела (гетерогенных центров зародышеобразования) именно на границе раздела жидкостей [6]. Это проявляется в виде формирования и роста единичных пузырьков, перемещающихся вдоль границы раздела *горючая жидкость / загуститель*. Установлено [7], что скорость зарождения пузырьков существенно зависит от взаимной растворимости компонентов топливной смеси. Скорость зародышеобразования для нерастворимых жидких компонентов выше, чем для растворимых [7]. На процесс образования пузырьков влияет отличие в характеристиках летучести компонентов топлива [8], а также степень перегрева [9].

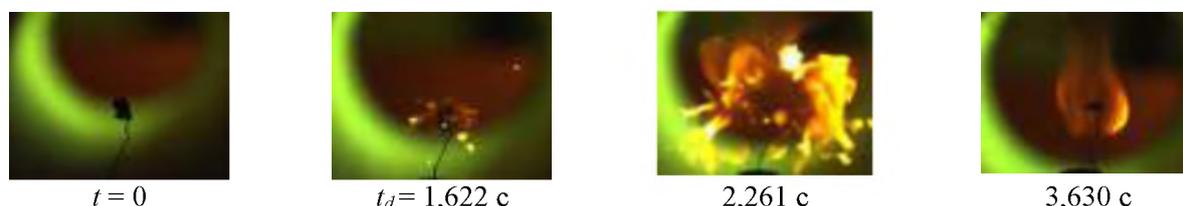


Рис. 1. Типичные кадры видеogramм зажигания и горения частицы гелеобразного топлива (состав No. 1 – маслонеполненный криогель без добавления твердых частиц)

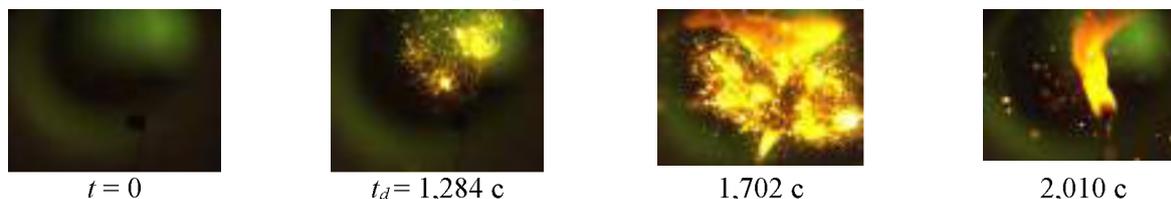


Рис. 2. Типичные кадры видеogramм зажигания и горения частицы гелеобразного топлива (состав No. 2 – маслонеполненный криогель, содержащий 30 % мас. углеродистых частиц)

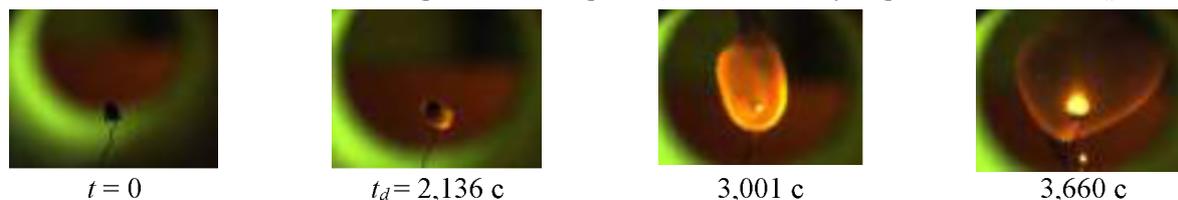


Рис. 3. Типичные кадры видеogramм зажигания и горения частицы гелеобразного топлива (состав No. 3 – маслонеполненный криогель, содержащий 30 % мас. частиц Al)

Для двухкомпонентных капель несмешивающихся жидкостей такой локальный перегрев происходит потому [10], что оболочка состоит из загустителя, обладающего значительно большей теплоемкостью и теплопроводностью, чем горючая жидкость. Оболочка загустителя (менее летучий компонент) на поверхности горючей жидкости (более летучий компонент) препятствует монотонному испарению горючей жидкости со свободной поверхности в окружающую среду. Поэтому горючая жидкость может быть нагрета до температур, достаточных для зарождения центров парообразования. С ростом размеров пузырей, они достигают границы *горючая жидкость / загуститель*. Пузыри передвигаются преимущественно вдоль поверхности раздела жидкостей. Совокупность пузырьков на границе *горючая жидкость / загуститель* создает термическое сопротивление для процесса прогрева горючей жидкости при теплоподводе от внешнего источника. Когда количество пузырьков и их размеры превышают критические значения, толщина оболочки загустителя уменьшается, происходит схлопывание пузырька, который разрушает слой загустителя. Пары горючего вдуваются в газовую среду нагретого окислителя вместе с микрокаплями топлива на достаточно большое расстояние от поверхности исходной капли, где температура окислителя выше, чем в окрестности поверхности капли (за счет эндотермического испарения и поступления холодных паров в газовую среду). Мелкодисперсные фрагменты, двигаясь в высокотемпературной среде, интенсивно испаряются, увеличивая концентрацию летучих, которые воспламеняются в достаточно большом по размерам объеме.

Стоит отметить, что добавление мелкодисперсных твердых металлических частиц в состав гелеобразного топлива снижает интенсивность протекания процесса диспергирования капли расплава топлива (рисунок 3) при прочих идентичных условиях. Исключение составляет топливный состав No. 2 с добавлением углеродистых частиц (рисунок 2), которые в отличие от металлических наночастиц обладают существенно более пористой структурой поверхности и содержат в микропорах пузырьки воздуха, которые могут служить центрами гетерогенной нуклеации [11].

Для рассматриваемых составов гелеобразных топлив (частиц с начальной массой 5 мг и диаметром 2,8 мм) были определены зависимости времен задержки зажигания от температуры разогретого воздуха. Более существенное отличие характеристик зажигания для топлив с разным компонентным составом характерно для относительно низких температур источника энергии ( $T_g = 600$  °C). При температурах в муфельной печи, соответствующих предельным условиям зажигания гелеобразных топлив ( $T_g = 600$  °C), времена задержки зажигания могут различаться более, чем в 2 раза (от 4 до 10 с). Времена задержки зажигания маслonaполненного криогеля без твердых включений (состав No. 1) выше на 25 % по сравнению с составом No. 2 во всем диапазоне варьирования температур. Для всех металлизированных составов гелеобразного топлива времена задержки зажигания на 30 % и более выше по сравнению с безметалльным составом No. 1. С одной стороны, это обусловлено уменьшением доли горючей жидкости, с другой стороны, увеличением теплоаккумулирующей способности металлических компонентов топлива.

Определены зависимости скоростей движения мелкодисперсных фрагментов, отделившихся от капель расплавов топлив (при их диспергировании) и движущихся в среде окислителя. При повышении температуры в камере сгорания скорости движения фрагментов ( $V_p$ ) возрастают, так как процессы теплопереноса протекают интенсивнее при больших значениях  $T_g$ . Важно отметить, что при определении скоростей учитывались движущиеся фрагменты, отделившиеся от основной капли, как до зажигания (если это имело место), так и после. Таким образом, усредненные значения скоростей  $V_p$  для некоторых составов могут быть ниже прогнозируемых из-за учета движения фрагментов с низкой кинетической энергией, характерной для индукционного периода. Скорости отлетающих фрагментов при диспергировании состава No. 2 имеют наибольшее значение во всем диапазоне температур в муфельной печи. Полученный результат объясняется тем, что на границе *топливо / воздух* при зажигании гелеоб-

разного топлива с добавлением мелкодисперсных углеродистых частиц образуется наибольший градиент температур. Скорости отлетающих фрагментов для всех составов при  $T_g$  от 600 до 1000 °С варьируются в пределах от 0,3 до 1,4 с.

Для всех исследованных составов гелеобразного топлива были установлены зависимости средних размеров (диаметров) области выгорания от температуры окружающей среды. Составы No. 3 и No. 5 мало подвержены диспергированию в процессе зажигания и выгорания. Данные составы в условиях лучистого нагрева после плавления монотонно испаряются. В окрестности частицы формируется сферическая горючая парогазовая смесь, которая воспламеняется при достижении температуры зажигания. Соответственно, чем выше температура окружающей среды, тем быстрее будут достигаться необходимые условия воспламенения парогазовой смеси, тем меньше успеет испариться горючей жидкости, и тем меньше будет область газофазного зажигания и выгорания. При горении составов No. 1, No. 2 и No. 4 преобладает диспергирование. Соответственно, область выгорания зависит от дальности разлета мелкодисперсных фрагментов исходной капли топлива. Следовательно, размеры области выгорания напрямую зависят от скорости движения мелкодисперсных фрагментов после диспергирования капли расплава. Увеличение температуры окружающей среды влечет за собой как возрастание скорости движения мелкодисперсных фрагментов, так и увеличение размеров областей выгорания. Средние диаметры области выгорания изменяются от 7 до 15 мм для разных топливных составов.

Полученные экспериментальные данные позволяют сделать вывод, что составы с добавлением мелкодисперсных металлических/неметаллических частиц могут обеспечивать стабильное диспергирование. При этом от их концентрации, как и от их теплофизических характеристик, зависят характеристики зажигания и выгорания конкретного топлива. Результаты выполненной работы являются основой для будущих исследований по поиску оптимальных концентраций порошков твердых включений и размеров их частиц в составе гелеобразных топлив для обеспечения наилучших энергетических показателей.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Some aspects on safety and environmental impact of the German green gel propulsion technology / H.K. Ciezki, K.W. Naumann // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. – 2016. – V. 41, № 3. – P. 539–547.
2. Gel propellants / M.B. Padwal, B. Natan, D.P. Mishra // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2021. – V. 83. – P. 100885.
3. Metal-based nanoenergetic materials: Synthesis, properties, and applications / D. Sundaram, V. Yang, R.A. Yetter // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2017. – V. 61. – P. 293–365.
4. Strategies to improve the performance of a spark ignition engine using fuel blends of biogas with natural gas, propane and hydrogen / J.P. Gómez Montoya et al. // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2018. – V. 43, № 46. – P. 21592–21602.
5. Ignition mechanism and characteristics of gel fuels based on oil-free and oil-filled cryogels with fine coal particles / D.O. Glushkov et al. // *Powder Technology*. – 2020. – V. 360. – P. 65–79.
6. Physics of puffing and microexplosion of emulsion fuel droplets / J. Shinjo et al. // *Physics of Fluids*. – 2014. – V. 26, № 10. – P. 103302.
7. Multicomponent fuel droplet combustion investigation using magnified high speed backlighting and shadowgraph imaging / A.M.D. Faik, Y. Zhang // *Fuel*. – 2018. – V. 221. – P. 89–109.
8. Combustion and microexplosion of freely falling multicomponent droplets / C.H. Wang, X.Q. Liu, C.K. Law // *Combustion Flame*. – 1984. – V. 56, № 2. – P. 175–197.
9. Experimental understanding on the dynamics of microexplosion and puffing in ternary emulsion droplets / M.M. Avulapati et al. // *Fuel*. – 2019. – V. 239. – P. 1284–1292.

10. Modeling the micro-explosion of miscible and immiscible liquid droplets / D.V. Antonov et al. // Acta Astronautica – 2020. – V. 171. – P. 69–82.
11. Physics of puffing and microexplosion of emulsion fuel droplets / J. Shinjo et al. // Physics of Fluids. – 2014. – V. 26, № 10. – P. 103302.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда [№ 18-13-00031, <https://rscf.ru/project/21-13-28043/>].

Научный руководитель: д.т.н. Д.О. Глушков, доцент ИШФВП ТПУ.

## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПОЛИМЕРНЫХ МИКРОЧАСТИЦ ГЕЛЯ С ГЛАДКОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ И МЕМБРАННЫМ ПОКРЫТИЕМ**

А.Е. Пискунова, Н.А. Хомутов  
Томский политехнический университет  
ИШЭ, НОЦ И.Н. Бутакова, группы А2-11, А1-11

В последнее время одним из наиболее активных направлений, развивающихся в области полимеров, являются микрогели. Состав, размеры и морфологию микрочастиц возможно варьировать в широких пределах в зависимости от области применения. В то же время довольно мало известно о механизмах, характеристиках и режимах гидродинамики и теплообмена для микрочастиц геля, взаимодействующих с твердой нагретой и не нагретой поверхностью. Данные результаты важны для развития технологий трехмерной печати и биопечати отверждаемыми полимерами, использовании микрогеля в качестве топлива в энергетике, производстве гидрогелей и микрогелей, тканевой инженерии и транспортировке лекарств и биологических клеток [1, 2]. Целью настоящих экспериментов является изучение взаимодействия первой частицы микрогеля с твердой гладкой поверхностью и мембранным покрытием, а также взаимодействия второй частицы микрогеля с первой.

Гелеобразование основано на взаимодействии сшиваемого полимера с кросслинкером (сшивающим агентом), предназначенным для создания химических связей между полимерными цепями. В настоящей работе в качестве полимера используется водный раствор альгината натрия (ALG), в качестве кросслинкера – водный раствор хлорида кальция ( $\text{CaCl}_2$ ) с добавлением этилового спирта (EtOH). Для формирования частиц микрогеля необходимо, чтобы коэффициент поверхностного натяжения двух взаимодействующих жидкостей отличался более, чем на 10 мН/м. В связи с этим, подобраны концентрации растворов альгината натрия и хлорида кальция. Для того, чтобы увеличить разницу коэффициентов поверхностного натяжения жидкостей, в раствор хлорида кальция добавлен этиловый спирт, снижающий поверхностное натяжение раствора. Свойства растворов полимера и кросслинкера приведены в таблице 1.

Таблица 1. Свойства исходных растворов полимера и кросслинкера

Раствор	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Динамическая вязкость, мПа·с	К-нт поверхностного натяжения, мН/м
2 mg/ml ALG	892	47,08	52,95±0,22
4 mg/ml ALG	926	161,08	56,37±0,13
6 mg/ml ALG	968	266,63	58,60±0,17
8 mg/ml ALG	973	397,85	65,76±0,53
15 mg/ml $\text{CaCl}_2$ + 10%EtOH	1010	2,22	42,91±0,148

В таблице 2 приведен состав образцов микрогеля, полученных в результате взаимодействия полимера с кросслинкером. Концентрация кросслинкера во всех случаях оставалась неизменной, а концентрация альгината натрия в растворах полимера варьировалась (2, 4, 6, 8 мг/мл) для того, чтобы получить частицы микрогеля с разной степенью гелеобразования.