

УДК 62-643;536.463

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА МОДИФИЦИРОВАННОГО НАНОЧАСТИЦАМИ ОКСИДА АЛЮМИНИЯ В СРЕДЕ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА

Е.П. Копьев, И.С. Садкин, Е.Ю. Шадрин

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

В работе исследовано влияние на характеристики процесса горения добавления нанопорошка алюминия (1% масс.) в жидкое углеводородное топливо, на примере дизельного топлива. Топливо распылялось перегретым водяным паром с регулируемой подачей окислителя в камеру газогенерации. Нанопорошок состоял преимущественно из оксида алюминия (~90%) с примесью металлического алюминия (до 10%). Результаты показали, что при сжигании модифицированного топлива максимальная температура внешнего факела снизилась примерно на 100°C по сравнению с чистым образцом. При этом на выходе из камеры газогенерации температура оказалась выше на ~100°C, а во внешнем пламени увеличилось содержание CO и H₂. Это свидетельствует об эффективном воспламенении топлива внутри камеры и снижении степени паровой газификации продуктов термического разложения из-за присутствия наномодификатора. Газовый анализ продуктов сгорания выявил незначительное влияние наночастиц на концентрацию вредных выбросов. В случае модифицированного топлива наблюдалось небольшое снижение уровня оксидов азота (NO_x) и повышение содержания монооксида углерода (CO). Несмотря на некоторые положительные эффекты, такие как интенсификация горения, в условиях парового распыла и сжигания в горелочном устройстве существенного снижения вредных выбросов зафиксировано не было.

Ключевые слова: горение, дизельное топливо, перегретый водяной пар, нанопорошок алюминия.

DOI: 10.17212/1727-2769-2025-2-35-50

Введение

Одним из перспективных способов улучшения процесса сгорания различных видов топлива является их модификация металлическими и оксидными наночастицами. В качестве добавок применяют порошки металлов, которые благодаря своим физико-химическим свойствам способствуют более полному и интенсивному горению [1]. Наиболее часто используются дисперсные частицы различной формы и размеров [2]. В последние годы особое внимание уделяется нанопорошкам, которые демонстрируют высокую эффективность в повышении КПД двигателей внутреннего сгорания, что подтверждается многочисленными исследованиями [3, 4]. Установлено,

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (регистрационный номер 121031800229-1).

что такие добавки способствуют снижению выбросов оксидов азота (NO_x) и углеродных соединений, одновременно улучшая эксплуатационные характеристики двигателя [5]. Среди наиболее изученных наномодификаторов можно выделить частицы Al_2O_3 , FeCl_3 , MnO , CuO , Fe_3O_4 , TiO_2 , ZnO_2 , CuO_2 и другие [6–8]. Как показывают исследования, кислородсодержащие добавки особенно эффективны, поскольку они облегчают процесс полного сгорания топлива, что приводит к снижению выбросов CO и углеводородов (HC) [4, 9].

Наиболее доступными и широко применяемыми добавками являются наночастицы Al_2O_3 и CuO [7, 10]. Современный объем мирового производства алюминиевых порошков достигает порядка 200 тысяч тонн в год [11]. Современные методы синтеза позволяют получать порошки с контролируемыми характеристиками – от микронных (10...100 мкм) до нанометровых (10...100 нм) размеров частиц [12, 13], что существенно расширяет область их практического применения. С точки зрения технико-экономической эффективности наиболее перспективным считается использование: чистого алюминия различной степени дисперсности [14–17]; его комбинаций с другими металлами [18]. Такие композиции позволяют создавать топливные смеси с улучшенными характеристиками. В частности, введение алюминиевого порошка в ракетное топливо способно повысить температуру горения до ~3000 К [19, 20].

Среди возможных альтернатив алюминию (литий, бор, бериллий) существуют принципиальные ограничения: высокая химическая активность лития; токсичность продуктов сгорания бериллия; ограниченные запасы и производство бора. При этом алюминий обладает рядом преимуществ: высокая распространенность в земной коре, масштабируемое производство, отработанные технологии применения. Однако использование чистого алюминия сопряжено с технологическими сложностями, что делает перспективным применение его оксида (Al_2O_3) в качестве модифицирующей добавки к топливам.

Одним из наиболее перспективных направлений использования нанопорошков является их добавление в жидкое топливо при сжигании в сочетании с водой [21]. Исследования показывают, что данный подход обеспечивает два ключевых эффекта: вторичное распыление водяных капель; каталитическую активность наночастиц. В результате достигается значительное снижение выбросов углеводородов (HC) на 19,4...55,6 %, оксида углерода (CO) – на 6,5...52,8 %, оксидов азота (NO_x) – на 23,2...41,5 % по сравнению с базовым топливом. Как отмечается в работах [7, 8], применение наночастиц в биодизеле и его водно-эмульсионных смесях позволяет улучшить физико-химические свойства топлива, повысить тепловую эффективность двигателя, сократить период задержки воспламенения и др. При этом степень улучшения характеристик зависит от ряда факторов: типа базового топлива, размера и концентрации наночастиц, равномерности распределения добавок в топливе, режимов работы двигателя [21].

В предыдущих исследованиях авторами данной работы был разработан инновационный метод сжигания жидких углеводородных топлив, преду-

смагивающий подачу в зону горения перегретого водяного пара вместо воды. В данном подходе пар выполняет двойную функцию: распыляющего агента и газа-разбавителя в камере газогенерации. На основе этой методики был создан ряд оригинальных горелочных устройств. Экспериментальные исследования проводились с различными видами топлив: дизельное топливо, отработанное машинное масло, мазут и нефтяные фракции. Результаты этих исследований подробно изложены в работах [22–25]. Как экспериментально, так и в ходе численного моделирования было установлено, что применение перегретого пара позволяет достичь значительного (в 1,5...5 раз) снижения выбросов оксидов азота (NOx); сохранения высокой полноты сгорания топлива. Особую ценность данный метод представляет для утилизации низкокачественных топлив и переработки производственных отходов, пригодных для сжигания. Однако до настоящего времени оставался неисследованным вопрос о возможности применения этого метода для сжигания топлив, модифицированных различными добавками. В частности, не было данных об эффективности использования перегретого пара при сжигании топлив с нанодобавками, что определило актуальность настоящего исследования.

Целью настоящей работы является анализ влияния добавки нанопорошка алюминия на характеристики горения модифицированного жидкого углеводородного топлива, распыляемого перегретым водяным паром [26, 27], при регулировании подачи окислителя в камеру газогенерации. Анализ основывается на основе сравнения температуры внешнего факела, концентрации содержания газов во внешнем пламени и в продуктах сгорания на примере чистого и модифицированного дизельного топлива с добавкой наночастиц алюминия.

1. Экспериментальный стенд и методика измерений

Изучение эффектов модификации жидкого углеводородного топлива путем добавления в него нанопорошка алюминия при сжигании в струе перегретого водяного пара проводилось на атмосферном распылительном горелочном устройстве с регулируемой подачей воздуха в камеру газогенерации. Схема горелки представлена на рис. 1.

Горелочное устройство реализует способ сжигания, в котором топливо распыляется струей перегретого водяного пара в камеру газогенерации, тем самым обеспечивается эффективное распыление топлива и частичная паровая газификация продуктов его неполного термического разложения. В нижнюю часть горелочного устройства у основания паровой форсунки обеспечивается регулируемый подвод воздуха, что позволяет управлять степенью газификации. Догорание углеводородных компонентов топлива происходит во внешней среде за счет свободного притока атмосферного воздуха, образуя внешний факел.

Исследование температуры внешнего факела при различных параметрах подачи окислителя в камеру газогенерации было проведено при помощи платиноводородных-платиноводородной термопары типа В (рис. 2).

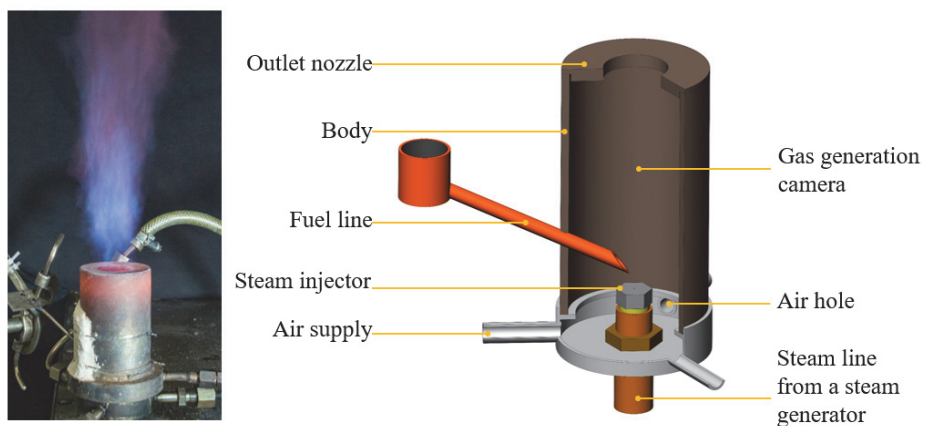


Рис. 1 – Схема горелочного устройства

Fig. 1 – Scheme of a burner device

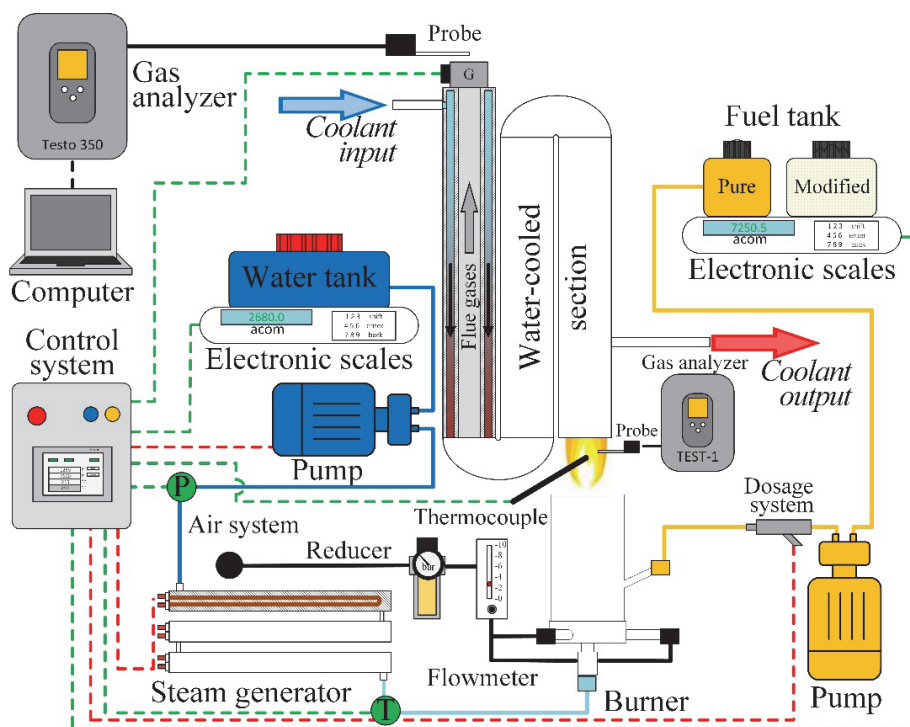


Рис. 2 – Схема экспериментальной установки

Fig. 2 – Scheme of experimental setup

Термопара устанавливалась на П-образное крепление для обеспечения симметричного возмущения, вносимого в поток горячего газа, выходящего из горелочного устройства. Само крепление монтировалось на координатно-перемещающее устройство, которое осуществляло позиционирование

ние горячего спая в пламени согласно заданному плану. Так, горячий спай перемещался вдоль оси симметрии горелочного устройства от его внешнего сопла наружу на расстояние 200 мм. Каждые 10 мм осуществлялось измерение температуры следующим образом: при установке горячего спая в измерительной точке проводится 7 с период релаксации температуры, далее в течение 10 с с частотой 100 Гц проводится запись данных термопары при помощи АЦП разрядностью 24 бит. Таким образом, на каждую измерительную точку получается 1000 измеренных значений. Так как термопара является инерционным прибором, то для каждой точки определялось среднее значение температуры. Далее полученное значение корректировалось с учетом поправки на излучение горячего спая.

Концентрация содержания газов во внешнем пламени определялась при помощи газового анализатора ТЕСТ-1. Устройство включает в себя электрохимические датчики O_2 , CO , C_nH_m и H_2 , а также оптический CO_2 . Измерения состава газов во внешнем факеле, аналогично определению температуры, проводилось вдоль оси симметрии горелочного устройства от его внешнего сопла наружу на расстояние 200 мм, измерительные точки располагались каждые 20 мм. Для отбора пробы использовался водоохлаждаемый зонд, представляющий из себя трубку диаметром 3 мм, вокруг которой смонтирована водяная рубашка. Зонд был установлен на координатно-перемещающее устройство совместно с термопарой. Измерение в каждой точке осуществлялось следующим образом: при установке зонда в измерительной точке 50 с проводится отбор пробы для релаксации значений датчиков, далее в течение 20 с с частотой 1 Гц осуществляется запись данных, после чего зонд выводится из внешнего пламени и выполняется продувка устройства чистым воздухом в течение 20 с. Таким образом, на каждую измерительную точку получается 20 измеренных значений, которые усреднялись. Более подробное описание методики приведено в [26].

Для определения концентраций газов в продуктах сгорания использовался газоанализатор Testo 350, так как в ТЕСТ-1 используются датчики с высоким измерительным диапазоном, не отражающим значения нормативных документов по горелочным устройствам. Testo 350 включает в себя электрохимические датчики O_2 , CO , NO , NO_2 и оптический датчик CO_2 . Для анализа продуктов сгорания прибором они пропускались через водоохлаждаемый участок, который позволил ограничить подсос внешнего воздуха во внешний факел горелочного устройства и остудить дымовые газы. Таким образом зонд газоанализатора устанавливался на выходе дымового тракта водоохлаждаемого участка (рис. 2).

Для модификации жидкого топлива использовался нанопорошок алюминия, состоящий из частиц оксида алюминия: ~ 90 % масс. Al_2O_3 и до 10 % неокисленного Al . Частицы имеют сферическую форму, средний размер 36...46 нм (рис. 3).

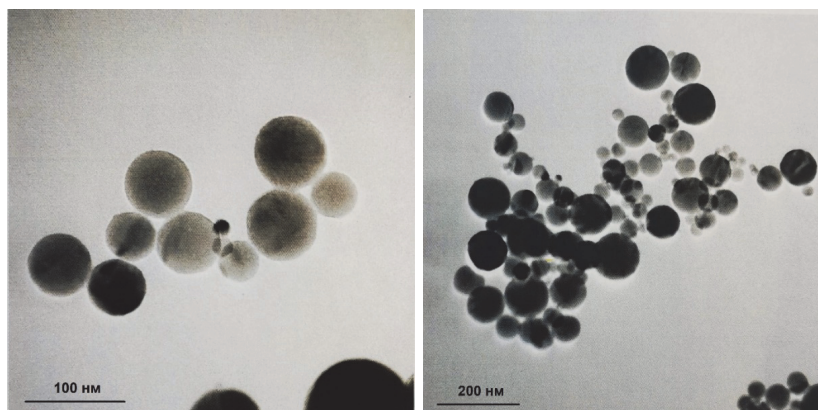


Рис. 3 – Характерные изображения порошка оксида алюминия

Fig. 3 – Characteristic images of aluminum oxide powder

2. Результаты измерений и их анализ

Для проведения эксперимента задавались следующие режимные параметры: расход дизельного топлива 1,2 кг/ч, расход пара 0,8 кг/ч, температура пара 250 °С. Выбор режимных характеристик обусловлен достижением на его примере лучших показателей по выбросам CO и NOx в ходе предыдущих исследований на дизельном топливе [28]. Массовое добавление порошка алюминия в дизельном топливе было выбрано на основе работы [21] и составило 1 %. При анализе влияния добавки нанопорошка алюминия на характеристики горения жидкого углеводородного топлива, распыляемого перегретым водяным паром, при регулировании подачи окислителя в камеру газогенерации в качестве окислителя подавался воздух в диапазоне расхода 4,5...14,5 кг/ч, что для выбранного для изучения режима работы горелки составляет избыток 0,25...0,8. Для сопоставления полученных данных эксперименты проводились на эквивалентных режимах как для модернизированного нанопорошком алюминия дизельного топлива, так и чистого дизельного топлива. В таблице приведены названия и параметры исследуемых режимов.

Параметры работы горелочного устройства

Operating parameters of the burner device

Режим / Mode	D12A4.5	D12A9.5	D12A14.5	MD12A4.5	MD12A9.5	MD12A14.5
Расход воздуха, кг/ч / Air supply, kg/h	4.5	9.5	14.5	4.5	9,5	14,5
Добавка нанопорошка, % масс. / Nanoparticles addition to fuel, w/w %	0			1		

Для исследуемых режимов были получены профили усредненной по времени температуры внешнего пламени вдоль оси симметрии горелочно-го устройства (рис. 4).

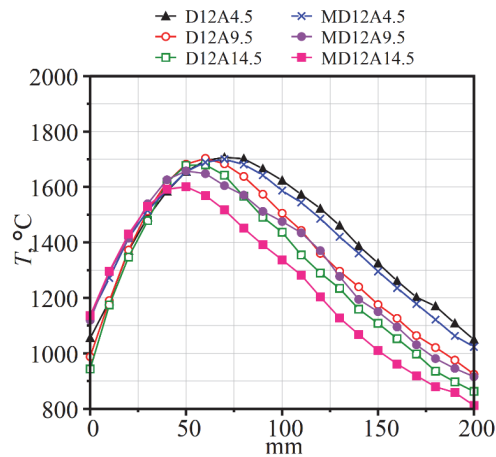


Рис. 4 – Сопоставление температур вдоль вертикальной оси симметрии факела горелочного устройства для различных режимов по расходу первичного воздуха

Fig. 4 – Comparison of temperatures along the vertical axis of symmetry of the burner device torch for different modes of primary air consumption

Анализ экспериментальных данных выявил схожий характер температурных распределений при сжигании обычного и модифицированного нанопорошком алюминия дизельного топлива в идентичных условиях. Однако обнаружены существенные различия в температурных характеристиках. При увеличении расхода первичного воздуха до 14,5 кг/ч в обоих случаях отмечается перемещение зоны максимальных температур в направлении выходного сечения горелки. При этом если для чистого дизельного топлива пиковые значения температуры остаются стабильными, то для топлива с алюминиевой добавкой фиксируется их снижение примерно на 100 °C. Параллельно зарегистрировано повышение температуры на 100 °C на выходе из камеры газогенерации при использовании модифицированного топлива. Этот эффект, вероятно, обусловлен каталитическим действием наночастиц алюминия, ускоряющих процессы воспламенения в начальной стадии горения. В результате наблюдается изменение баланса между процессами паровой газификации и горения – термическое разложение топлива в камере происходит более интенсивно, что снижает долю последующей газификации продуктов разложения. Такое перераспределение тепловых потоков свидетельствует о комплексном влиянии нанодобавки на термодинамику процесса, изменяющем как пространственную структуру факела, так и соотношение отдельных стадий горения. Полученные результаты требуют дальнейшего изучения для оптимизации режимов сжигания модифицированных топлив в подобных системах.

Далее приведены результаты газового анализа во внешнем пламени горелочного устройства, полученные путем отбора проб из вертикальной оси симметрии по центру выходного сопла горелочного устройства (рис. 5).

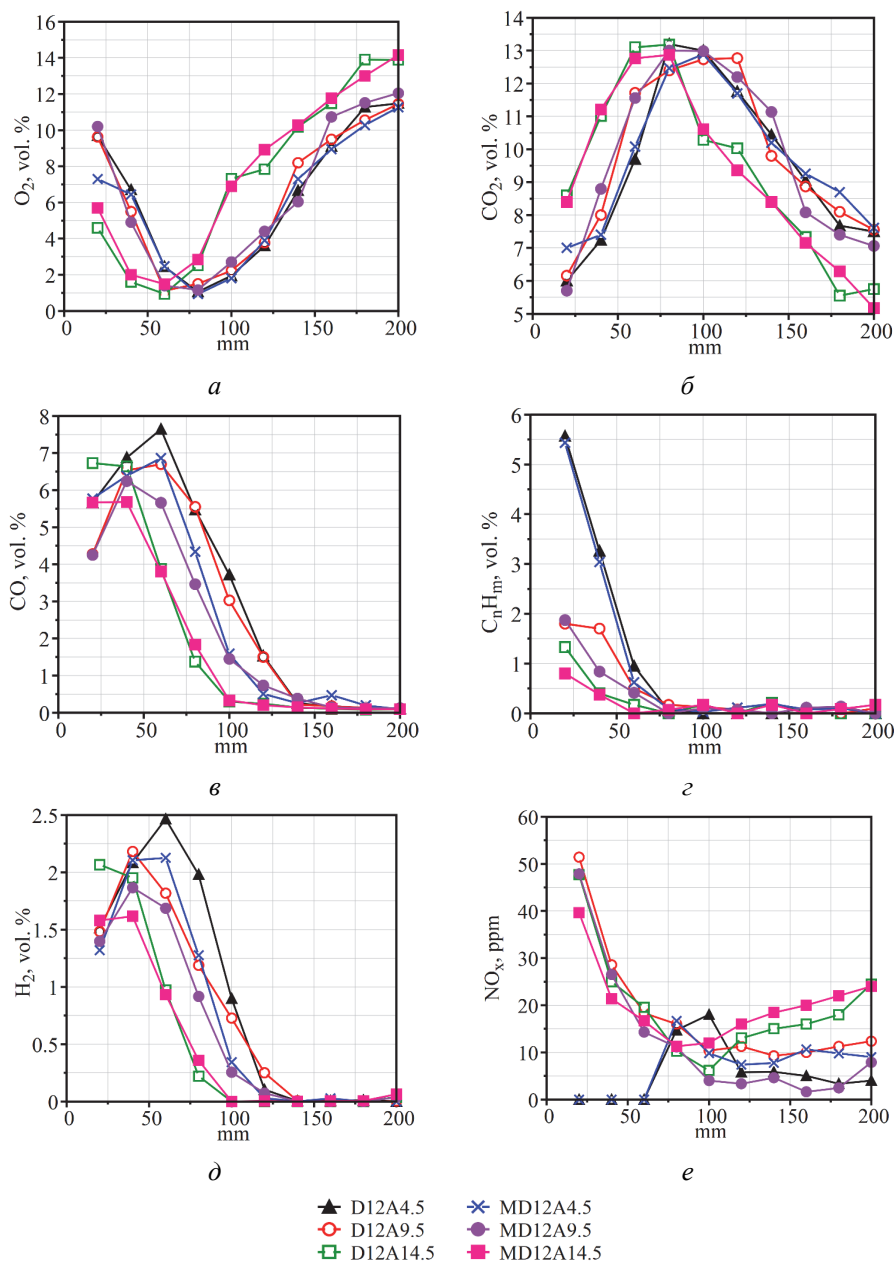


Рис. 5 – Концентрация веществ во внешнем пламени горелочного устройства вдоль вертикальной оси симметрии по центру выходного сопла горелочного устройства

Fig. 5 – Concentration of substances in the external flame of the burner device along the vertical axis of symmetry at the center of the outlet nozzle of the burner device

Анализ распределения компонентов в продуктах сгорания показывает схожесть концентрационных профилей O_2 , CO_2 , C_nH_m и NO_x для обоих видов топлива при одинаковых расходах воздуха. Наблюдается четкая корреляция между положением температурного максимума и зоной минимального содержания кислорода, что характерно для процессов полного окисления. При этом пиковые концентрации диоксида углерода смещены по потоку относительно минимальных значений O_2 , что объясняется последующим разбавлением продуктов сгорания окружающим воздухом. Особый интерес представляет различие в содержании оксида углерода и водорода. Для чистого дизельного топлива зафиксированы более высокие концентрации этих компонентов, что свидетельствует о различном влиянии нанопорошка алюминия на процесс газификации. Полученные данные согласуются с замеренными температурными характеристиками и подтверждают гипотезу о снижении степени паровой газификации термически разложенного топлива при введении алюминиевой добавки. Это проявляется в изменении баланса между процессами частичного окисления и полного сгорания, что находит отражение в перераспределении концентраций промежуточных продуктов горения во внешнем пламени. Обнаруженные закономерности подчеркивают комплексный характер влияния нанодобавки на химизм процесса горения, затрагивающий как первичные стадии термического разложения, так и последующие реакции окисления в газовой фазе. Сопоставление концентрационных и температурных профилей позволяет сделать вывод о модифицирующем действии алюминиевых наночастиц на механизм преобразования топлива в условиях парового распыления.

При определении концентраций газов в продуктах сгорания на водоохлаждаемом участке было получено, что зависимости для модифицированного дизельного топлива добавкой нанопорошка алюминия повторяют тенденции чистого дизельного топлива (рис. 6).

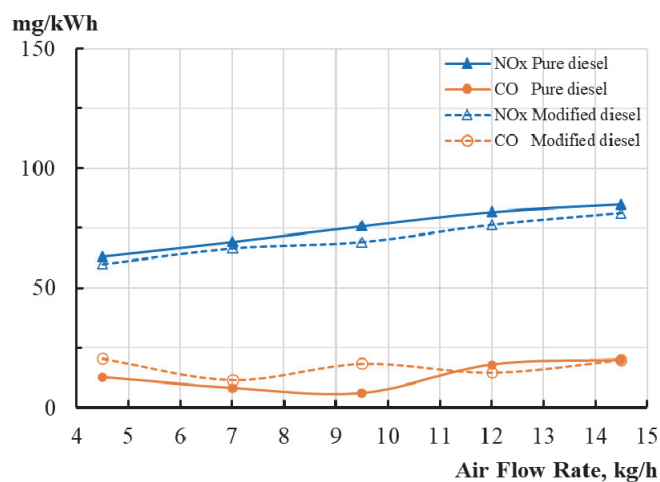


Рис. 6 – Зависимость выбросов CO и NOx в составе конечных продуктов сгорания.

Fig. 6 – Dependence of CO and NOx emissions in the composition of final combustion products

Отсутствие существенных видимых эффектов, вероятно, обусловлено особенностями физико-химических процессов в присутствии перегретого пара, что обеспечивает малоэмиссионное горение. В то же время количественно для модифицированного топлива отмечаются несколько меньшие концентрации оксидов азота, что, вероятно, связано с некоторым снижением их образования по термическому механизму из-за более низких температур [26]. С другой стороны, при горении дизельного топлива наблюдаются меньшие концентрации оксида углерода в продуктах сгорания, что свидетельствует о более полном выгорании топлива за счет более высокой степени паровой газификации продуктов термического разложения.

Заключение

Экспериментальное исследование позволило оценить влияние нанопорошка алюминия (90 % Al_2O_3 + 10 % Al, 1 % масс.) на процесс горения дизельного топлива, распыляемого перегретым водяным паром. Сравнительный анализ чистого и модифицированного топлива проводился по трем ключевым параметрам: температурному профилю факела, газовому составу пламени и характеристикам продуктов сгорания.

Основные результаты исследования выявили существенные различия. При увеличении расхода воздуха до 14,5 кг/ч модифицированное топливо демонстрировало снижение максимальной температуры факела на 100 °С по сравнению с чистым образцом. Однако на выходе из камеры газогенерации наблюдалась обратная картина – температура для топлива с добавкой была на 100 °С выше. Это свидетельствует о двойственном влиянии нанодобавки: с одной стороны, она интенсифицирует начальные стадии горения, с другой – изменяет баланс между процессами газификации и окисления. Повышенное содержание CO и H_2 в пламени при использовании чистого топлива указывает на более интенсивную паровую газификацию. В продуктах сгорания различия оказались менее выраженными: модифицированное топливо показало незначительное снижение концентрации NOx, тогда как обычное дизельное топливо – меньший уровень CO.

Важно отметить, что в условиях парового распыления алюминиевая добавка не продемонстрировала ожидаемого снижения вредных выбросов, характерного для двигателей внутреннего сгорания. Это подчеркивает зависимость эффективности наномодификаторов от конкретных условий сжигания и механизмов смесеобразования. Полученные результаты имеют значение для разработки методов утилизации жидких топлив и отходов с использованием перегретого пара, указывая на необходимость дальнейшего изучения влияния нанодобавок в подобных системах.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Breiter A.L., Mal'tsev V.M., Popov E.I.** Means of modifying metallic fuel in condensed systems // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – 1990. – Vol. 26 (1). – P. 86–92. – DOI: 10.1007/BF00742280.
2. **Ritter H., Braun S.** high explosives containing ultrafine aluminum ALEX // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. – 2001. – Vol. 26. – P. 311–314. – DOI: 10.1002/1521-4087.

3. **Basha J.S.** An experimental analysis of a diesel engine using alumina nanoparticles blended diesel fuel // SAE Technical Papers. – 2014. – Art. 2014-01-1391. – DOI: 10.4271/2014-01-1391.
4. A comprehensive review of the influences of nanoparticles as a fuel additive in an internal combustion engine (ICE) / S.N.A. Yusof, N.A.C. Sidik, Y. Asako, W.M.A.A. Japar, S.B. Mohamed, N.M. Muhammad // Nanotechnology Reviews. – 2021. – Vol. 9. – P. 1326–1349. – DOI: 10.1515/NTREV-2020-0104.
5. Comparative study of nanoparticles and alcoholic fuel additives-biodiesel-diesel blend for performance and emission improvements / M.A. Mujtaba, M.A. Kalam, H.H. Masjuki, M. Gul, M.E.M. Soudagar, H.C. Ong, W. Ahmed, A.E. Atabani, L. Razzaq, M. Yusoff // Fuel. – 2020. – Vol. 279. – P. 118434. – DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118434.
6. Comparative behavior of various nano additives in a DIESEL engine powered by novel *Garcinia gummi-gutta* biodiesel / S. Janakiraman, T. Lakshmanan, V. Chandran, L. Subramani // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Vol. 245. – P. 118940. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118940.
7. **Saxena V., Kumar N., Saxena V.K.** A comprehensive review on combustion and stability aspects of metal nanoparticles and its additive effect on diesel and bio-diesel fuelled C.I. engine // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2017. – Vol. 70. – P. 563–588. – DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.067.
8. Effect of dispersion of various nanoadditives on the performance and emission characteristics of a CI engine fuelled with diesel, biodiesel and blends – A review / T. Shaafi, K. Sairam, A. Gopinath, G. Kumaresan, R. Velraj // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2015. – Vol. 49. – P. 563–573. – DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.086.
9. Combustion characteristics, engine performances and emissions of a diesel engine using nanoparticle-diesel fuel blends with aluminium oxide, carbon nanotubes and silicon oxide / A.F. Chen, M.A. Adzmi, A. Adam, M.F. Othman, M.K. Kamaruzzaman, A.G. Mrwan // Energy Conversion and Management. – 2018. – Vol. 171. – P. 461–477. – DOI: 10.1016/j.enconman.2018.06.004.
10. **Dinesha P., Mohan S., Kumar S.** Impact of alumina and cerium oxide nanoparticles on tailpipe emissions of waste cooking oil biodiesel fuelled CI engine // Cogent Engineering. – 2021. – Vol. 8. – P. 1902067. – DOI: 10.1080/23311916.2021.1902067.
11. Пористые композиты на основе оксид-алюминиевых керметов (синтез и свойства) / С.Ф. Тихов, В.Е. Романенков, В.А. Садыков, В.Н. Пармон, А.И. Ратько. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, Фил. «Гео», 2004. – 205 с.
12. Производство и применение алюминиевых порошков и пудр / В.Г. Гопиенко, Б.Р. Осипов, Б.П. Назаров, В.М. Рюмин, И.В. Волков, Н.И. Ясаков. – М.: Металлургия, 1980. – 67 с.
13. **Котов Ю.А.** Импульсные технологии и наноматериалы. – Екатеринбург: УрО РАН, 2013. – 357 с.
14. Characterization of aluminum nanopowder compositions / Q.S.M. Kwok, R.C. Fouchard, A.-M. Turcotte, P.D. Lightfoot, R. Bowes, D.E.G. Jones // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2002. – Vol. 27. – P. 229–240. – DOI: 10.1002/1521-4087.
15. Взаимодействие металлов с продуктами разложения пластифицированного нитроэфирнитроаминными соединениями тетраэольного полимера / А.Г. Вакутин, М.В. Комарова, В.Ф. Комаров, А.Б. Ворожцов, Г.В. Сакович // Ползуновский Вестник. – 2008. – № 3. – С. 57–61.

16. Взрывчатые характеристики алюминизированных нанокомпозитов на основе октогена / М.Ф. Гоголя, М.Н. Махов, М.А. Бражников, А.Ю. Долгобородов, В.И. Архипов, А.Н. Жигач, И.О. Лейпунский, М.Л. Кусков // *Физика горения и взрыва*. – 2008. – Т. 44, № 2. – С. 85–100.
17. **Гоголя М.Ф., Бражников М.А.** Влияние дисперсности компонентов взрывчатых материалов на скорость детонации и чувствительность к механическим воздействиям // *Химическая Физика*. – 2010. – Т. 29, № 4. – С. 33–50.
18. **Глотов О.Г., Суродин Г.С.** Горение свободно падающих в воздухе агломератов из алюминия и бора. I. Экспериментальный подход // *Физика горения и взрыва*. – 2019. – Т. 55, № 3. – С. 100–109.
19. Горение порошкообразных металлов в активных средах / П.Ф. Похил, А.Ф. Беляев, Ю.В. Фролов, В.С. Логачёв, А.И. Коротков. – М.: Наука, 1972. – 294 с.
20. **Цуцуран И.В., Петрухин П.В., Гусев С.А.** Военно-технический анализ состояния и перспективы развития ракетных топлив. – М.: МО РФ, 1999. – 332 с.
21. **Kumar N., Raheman H.** Production, characterization and utilization of second generation biodiesel blend in diesel engine using water and nanoparticles as additives // *Fuel*. – 2022. – Vol. 308. – P. 122063. – DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122063.
22. Характеристики процесса сжигания дизельного топлива в горелочном устройстве с подачей струи перегретого водяного пара / С.В. Алексеенко, И.С. Ануфриев, М.С. Вигриянов, Е.П. Копьев, О.В. Шарыпов // *Физика горения и взрыва*. – 2016. – Т. 52, № 3. – С. 37–44.
23. Diesel fuel combustion in a direct-flow evaporative burner with superheated steam supply / I.S. Anufriev, S.V. Alekseenko, O.V. Sharypov, E.P. Kopyev // *Fuel*. – 2019. – Vol. 254. – P. 115723. – DOI: 10.1016/j.fuel.2019.115723.
24. Влияние параметров перегретого водяного пара на процесс горения жидких углеводородов / С.В. Алексеенко, И.С. Ануфриев, С.С. Арсентьев, М.С. Вигриянов, Е.П. Копьев, О.В. Шарыпов // *Теплофизика и аэромеханика*. – 2019. – Т. 26, № 1. – С. 109–113.
25. Diesel and waste oil combustion in a new steam burner with low NOX emission / I.S. Anufriev, E.P. Kopyev, I.S. Sadkin, M.A. Mukhina // *Fuel*. – 2021. – Vol. 290. – P. 120100. – DOI: 10.1016/j.fuel.2020.120100.
26. NOx reduction by steam injection method during liquid fuel and waste burning / I.S. Anufriev, E.P. Kopyev, I.S. Sadkin, M.A. Mukhina // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2021. – Vol. 152. – P. 240–248. – DOI: 10.1016/j.psep.2021.06.016.
27. Experimental investigation of size of fuel droplets formed by steam jet impact / I.S. Anufriev, E.Y. Shadrin, E.P. Kopyev, O.V. Sharypov // *Fuel*. – 2021. – Vol. 303. – P. 121183. – DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121183.
28. New ecology safe waste-to-energy technology of liquid fuel combustion with superheated steam / I.S. Anufriev, E.P. Kopyev, S.V. Alekseenko, O.V. Sharypov, M.S. Vigriyanov // *Energy*. – 2022. – Vol. 250. – Art. 123849. – DOI: 10.1016/J.ENERGY.2022.123849.

EXPERIMENTAL STUDY OF COMBUSTION OF HYDROCARBON FUEL MODIFIED WITH ALUMINUM OXIDE NANOPARTICLES IN A SUPERHEATED STEAM MEDIUM

Kopyev E.P., Sadkin I.S., Shadrin E.Yu.

Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

The paper studies the effect of aluminum nanopowder (1% by weight) on the combustion characteristics of liquid hydrocarbon fuel using diesel fuel as an example. The fuel was sprayed with superheated steam with a controlled supply of oxidizer to the gas generation chamber. The nanopowder consisted mainly of aluminum oxide (~90%) with an admixture of metallic aluminum (up to 10%). The results showed that during combustion of the modified fuel, the maximum temperature of the external flame decreased by about 100°C compared to the pure sample. At the same time, the temperature at the outlet of the gas generation chamber was higher by ~100°C, and the content of CO and H₂ in the external flame increased. This indicates efficient ignition of the fuel inside the chamber and a decrease in the degree of steam gasification of thermal decomposition products due to the presence of the nanomodifier. Gas analysis of the combustion products revealed an insignificant effect of nanoparticles on the concentration of harmful emissions. In the case of the modified fuel, a slight decrease in the level of nitrogen oxides (NO_x) and an increase in the content of carbon monoxide (CO) were observed. Despite some positive effects, such as combustion intensification, no significant reduction in harmful emissions was recorded under steam spray and combustion in a burner device.

Keywords: combustion, diesel fuel, superheated steam, aluminum nanopowder.

DOI: 10.17212/1727-2769-2025-2-35-50

REFERENCES

1. Breiter A.L., Mal'tsev V.M., Popov E.I. Means of modifying metallic fuel in condensed systems. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1990, vol. 26 (1), pp. 86–92. DOI: 10.1007/BF00742280.
2. Ritter H., Braun S. High explosives containing ultrafine aluminum ALEX. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2001, vol. 26, pp. 311–314. DOI: 10.1002/1521-4087.
3. Basha J.S. An experimental analysis of a diesel engine using alumina nanoparticles blended diesel fuel. *SAE Technical Papers*, 2014, art. 2014-01-1391. DOI: 10.4271/2014-01-1391.
4. Yusof S.N.A., Sidik N.A.C., Asako Y., Japar W.M.A.A., Mohamed S.B., Muhammad N.M. A comprehensive review of the influences of nanoparticles as a fuel additive in an internal combustion engine (ICE). *Nanotechnology Reviews*, 2021, vol. 9, pp. 1326–1349. DOI: 10.1515/NTREV-2020-0104.
5. Mujtaba M.A., Kalam M.A., Masjuki H.H., Gul M., Soudagar M.E.M., Ong H.C., Ahmed W., Atabani A.E., Razzaq L., Yusoff M. Comparative study of nanoparticles and alcoholic fuel additives-biodiesel-diesel blend for performance and emission improvements. *Fuel*, 2020, vol. 279, p. 118434. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.118434.
6. Janakiraman S., Lakshmanan T., Chandran V., Subramani L. Comparative behavior of various nano additives in a DIESEL engine powered by novel *Garcinia gummi-gutta* biodiesel. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 245, p. 118940. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.118940.

7. Saxena V., Kumar N., Saxena V.K. A comprehensive review on combustion and stability aspects of metal nanoparticles and its additive effect on diesel and bio-diesel fuelled C.I. engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 70, pp. 563–588. DOI: 10.1016/j.rser.2016.11.067.
8. Shaafi T., Sairam K., Gopinath A., Kumaresan G., Velraj R. Effect of dispersion of various nanoadditives on the performance and emission characteristics of a CI engine fuelled with diesel, biodiesel and blends – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, vol. 49, pp. 563–573. DOI: 10.1016/j.rser.2015.04.086.
9. Chen A.F., Adzmi M.A., Adam A., Othman M.F., Kamaruzzaman M.K., Mrwan A.G. Combustion characteristics, engine performances and emissions of a diesel engine using nanoparticle-diesel fuel blends with aluminium oxide, carbon nanotubes and silicon oxide. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 171, pp. 461–477. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.06.004.
10. Dinesha P., Mohan S., Kumar S. Impact of alumina and cerium oxide nanoparticles on tailpipe emissions of waste cooking oil biodiesel fuelled CI engine. *Cogent Engineering*, 2021, vol. 8, p. 1902067. DOI: 10.1080/23311916.2021.1902067.
11. Tikhov S.F., Romanenkov V.E., Sadykov V.A., Parmon V.N., Ratko A.I. *Poristye kompozity na osnove oksid-alyuminievykh kermetov (sintez i svoystva)* [Porous composites based on oxide-aluminum cermet (synthesis and properties)]. Novosibirsk, SB RAS Publ., 2004. 205 p.
12. Gopienko V.G., Osipov B.R., Nazarov B.P., Ryumin V.M., Volkov I.V., Yaskov N.I. *Proizvodstvo i primeneniye alyuminievykh poroshkov i pudr* [Production and application of aluminum powders]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1980. 67 p.
13. Kotov Yu.A. *Impul'snye tekhnologii i nanomaterialy* [Pulsed technologies and nanomaterials]. Ekaterinburg, Ural Branch of RAS, 2013. 457 p.
14. Kwok Q.S.M., Fouchard R.C., Turcotte A.-M., Lightfoot P.D., Bowes R., Jones D.E.G. Characterization of aluminum nanopowder compositions. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2002, vol. 27, pp. 229–240. DOI: 10.1002/1521-4087.
15. Vakutin A.G., Komarova M.V., Komarov V.F., Vorozhtsov A.B., Sakovich G.V. Vzaimodeystvie metallov s produktami razlozheniya plastifitsirovannogo nitroefirnitroaminnyimi soedineniyami tetrazol'nogo polimera [Interaction of metals with decomposition products of plasticized nitroester-nitroamine tetrazole polymer compounds]. *Polzunovskii vestnik = Polzunov Bulletin*, 2008, no. 3, pp. 57–61.
16. Gogulya M.F., Makhov M.N., Brazhnikov M.A., Dolgoborodov A.Yu., Arkhipov V.I., Zhigach A.N., Leipunsky I.O., Kuskov M.L. Explosive characteristics of aluminized nanocomposites based on octogen. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2008, vol. 44 (2), pp. 198–212. Translated from *Fizika goreniya i vzryva*, 2008, vol. 44, no. 2, pp. 85–100.
17. Gogulya M.F., Brazhnikov M.A. Vliyanie dispersnosti komponentov vzryvchatykh materialov na skorost' detonatsii i chuvstvitel'nost' k mekhanicheskim vozdeistviyam [Effect of dispersion of explosive material components on detonation velocity and sensitivity to mechanical impacts]. *Khimicheskaya Fizika = Russian Journal of Physical Chemistry B*, 2010, vol. 29, no. 4, pp. 33–50. (In Russian).
18. Glotov O.G., Surodin G.S. Combustion of aluminum and boron agglomerates free falling in air. I. Experimental approach. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2019, vol. 55 (3), pp. 335–344. DOI: 10.1134/S0010508219030110. Translated from *Fizika goreniya i vzryva*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 100–109.
19. Pokhil P.F., Belyaev A.F., Frolov Yu.V., Logachev V.S., Korotkov A.I. *Gorenie poroshkoobraznykh metallov v aktivnykh sredakh* [Combustion of powdered metals in active media]. Moscow, Nauka Publ., 1972. 294 p.

20. Tsutsuran I.V., Petrukhin P.V., Gusev S.A. *Voenno-tekhnicheskii analiz sostoyaniya i per-spektivy razvitiya raketnykh topliv* [Military-technical analysis and prospects for the development of rocket fuels]. Moscow, Ministry of Defense of RF Publ., 1999. 332 p.
21. Kumar N., Raheman H. Production, characterization and utilization of second generation biodiesel blend in diesel engine using water and nanoparticles as additives. *Fuel*, 2022, vol. 308, p. 22063. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122063.
22. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Vigriyanov M.S., Kopyev E.P., Sharypov O.V. Characteristics of diesel fuel combustion in a burner device with supply of superheated water vapor jet. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, 2016, vol. 52 (3), pp. 286–293. DOI: 10.1134/S0010508216030059. Translated from *Fizika goreniya i vzryva*, 2016, vol. 52, no. 3, pp. 37–44.
23. Anufriev I.S., Alekseenko S.V., Sharypov O.V., Kopyev E.P. Diesel fuel combustion in a direct-flow evaporative burner with superheated steam supply. *Fuel*, 2019, vol. 254, p. 115723. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.115723.
24. Alekseenko S.V., Anufriev I.S., Arsentiev S.S., Vigriyanov M.S., Kopyev E.P., Sharypov O.V. Influence of superheated water vapor parameters on the process of liquid hydrocarbon combustion. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2019, vol. 26 (1), pp. 103–107. DOI: 10.1134/S0869864319010104. Translated from *Teplofizika i aeromekhanika*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 109–113.
25. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Sadkin I.S., Mukhina M.A. Diesel and waste oil combustion in a new steam burner with low NOX emission. *Fuel*, 2021, vol. 290, p. 120100. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.120100.
26. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Sadkin I.S., Mukhina M.A. NOx reduction by steam injection method during liquid fuel and waste burning. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, vol. 152, pp. 240–248. DOI: 10.1016/j.psep.2021.06.016.
27. Anufriev I.S., Shadrin E.Y., Kopyev E.P., Sharypov O.V. Experimental investigation of size of fuel droplets formed by steam jet impact. *Fuel*, 2021, vol. 303, p. 121183. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.121183.
28. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Sharypov O.V., Vigriyanov M.S. New ecology safe waste-to-energy technology of liquid fuel combustion with superheated steam. *Energy*, 2022, vol. 250, art. 123849. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2022.123849.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Копьев Евгений Павлович – родился в 1991 г., канд. техн. наук, заведующий лабораторией экологических проблем теплоэнергетики, ФГБУН «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН». Область научных интересов: энергетика, сжигание топлива. Опубликовано 100 научных работ (РИНЦ). (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр-т Лаврентьева, д. 1. E-mail: kopyev.evgeniy@mail.ru).

Kopyev Evgeny Pavlovich (b. 1991) – Candidate of Sciences (Eng.), Head of Laboratory of Environmental Problems of Thermal Power Engineering, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS. His research interests are currently focused on Thermal Engineering and Combustion of Fuels. He is author of about 100 scientific papers (RSCI). (Address: 1, Lavrentyev Av., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: kopyev.evgeniy@mail.ru).



Садкин Иван Сергеевич – родился в 1998 г., аспирант НГТУ, инженер-исследователь лаборатории экологических проблем теплоэнергетики, ФГБУН «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН». Область научных интересов: энергетика, сжигание топлива. Опубликовано 58 научных работ (РИНЦ). (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр-т Лаврентьева, д. 1. E-mail: sadkinvanya@mail.ru).

Sadkin Ivan Sergeevich (b. 1998) – PhD student of NSTU, engineer researcher of Environmental Problems of Thermal Power Engineering, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS. His research interests are currently focused on Thermal Engineering and Combustion of Fuels. He is author of about 58 scientific papers (RSCI). (Address: 1, Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: sadkinvanya@mail.ru).



Шадрин Евгений Юрьевич – родился в 1992 г., канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник лаборатории экологических проблем теплоэнергетики, ФГБУН «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН». Область научных интересов: энергетика, сжигание топлива. Опубликовано 100 научных работ (РИНЦ). (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр-т Лаврентьева, д. 1. E-mail: evgen_zavita@mail.ru).

Shadrin Evgeny Yurievich (b. 1992) – Candidate of Sciences (Phys. & Math.), Junior Researcher of Environmental Problems of Thermal Power Engineering, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS. His research interests are currently focused on Thermal Engineering and Combustion of Fuels. He is author of about 100 scientific papers (RSCI). (Address: 1, Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: evgen_zavita@mail.ru).

*Статья поступила 11 февраля 2025 г.
Received February 11, 2025*

To Reference:

Kopyev E.P., Sadkin I.S., Shadrin E.Yu. Eksperimental'noe issledovanie goreniya uglevodorodnogo topliva modifitsirovannogo nanochastitsami oksida alyuminiya v srede peregretogo vodyanogo para [Experimental study of combustion of hydrocarbon fuel modified with aluminum oxide nanoparticles in a superheated steam medium]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2025, no. 2 (67), pp. 35–50. DOI: 10.17212/1727-2769-2025-2-35-50.