

УДК 621.43.03; 621.43.05

СОВМЕСТНЫЙ РАСПЫЛ НЕСМЕШИВАЮЩИХСЯ ЖИДКОСТЕЙ СТРУЕЙ ПЕРЕГРЕТОГО ВОДЯНОГО ПАРА И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СЖИГАНИЯ

Е.Б. Бутаков, Е.П. Копьев, И.С. Садкин, Е.Ю. Шадрин

Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

В статье представлены результаты экспериментального исследования совместного распыла несмешивающихся жидкостей (дизельное топливо / вода) струей перегретого водяного пара и последующего их сжигания в низкоэмиссионном горелочном устройстве с камерой газогенерации. Показано, что парознергетическая форсунка обеспечивает эффективное диспергирование обеих фаз без предварительного эмульгирования: преобладающий размер капель составляет 10...40 мкм. При добавлении воды в количестве 0,2...0,4 кг/ч к 1 кг/ч топлива достигается снижение максимальной температуры факела на 300...400 °С и уменьшение выбросов NO_x на 30...50 %. При дальнейшем увеличении доли воды наблюдается рост концентраций СО и C_nH_m , а также усиление пульсаций пламени. Полученные результаты подтверждают эффективность метода отдельного распыла без эмульгаторов и определяют область оптимальных режимов для сжигания.

Ключевые слова: распыление, перегретый пар, несмешивающиеся жидкости, водотопливные системы, NO_x , низкоэмиссионное сжигание.

DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-26-37

Введение

Жидкое углеводородсодержащее топливо остается основой энергетики благодаря высокой энергоемкости и технологичности хранения. Однако сжигание топлива сопровождается образованием оксидов азота, сажи и СО, что требует совершенствования технологий экологически безопасного использования [1,2]. Наиболее распространенные методы интенсификации и экологизации процесса включают оптимизацию конструкций камер сгорания, применение газов-разбавителей и модификацию состава топлива [3, 4].

Среди направлений модификации особый интерес представляют несмешивающиеся жидкостные системы, позволяющие целенаправленно влиять на тепловой режим пламени и кинетику реакций [5, 6]. Наиболее изучены водно-углеводородные композиции (дизель/мазут и вода), где введение воды снижает пиковую температуру и подавляет термический механизм образования NO_x [7]. Аналогичные принципы используются в топливно-окислительных парах [8], металл-водных системах [9], составах для связывания сернистых соединений [10] и смесях углеводородов с аммиаком для снижения NO_x [11]. Во всех случаях определяющим фак-

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (126021217042-8).

© 2026 Е.Б. Бутаков, Е.П. Копьев, И.С. Садкин, Е.Ю. Шадрин

тором является качество распыла и смесеобразования, от которого зависят полнота выгорания и уровень выбросов [12].

Технологии распыления подразделяются на эмульсионные и отдельные. Водотопливные эмульсии обеспечивают снижение NO_x на 30...50 % и уменьшение сажи [13, 14] за счет понижения температуры пламени и микровзрывного дробления капель [15], что улучшает смесеобразование и выравнивает температурное поле [16, 17]. Однако необходимость использования эмульгаторов, риск расслоения и коррозии, а также дополнительные энергетические затраты ограничивают применение метода [18]. Развитие связано с созданием стабилизированных систем и интеллектуального контроля качества [19].

Альтернативой является отдельный распыл компонентов с их смешением непосредственно в факеле [20]. Такой подход исключает эмульгаторы и обеспечивает гибкое регулирование состава смеси, однако требует точного контроля дисперсности и динамики струи для обеспечения устойчивого горения.

В настоящей работе рассматривается способ отдельного распыла дизельного топлива и воды струей перегретого водяного пара [21]. Метод позволяет сочетать интенсивную атомизацию с дополнительным разбавлением реакционной зоны. Основным научным интересом представляет влияние данного способа на температурную структуру пламени, подавление термических NO_x и полноту окисления топлива. Комплексное исследование характеристик распыления и сжигания необходимо для определения оптимальных режимов, обеспечивающих снижение выбросов при сохранении энергетической эффективности.

1. Экспериментальный стенд и методика измерений

Исследование совместного распыления несмешивающихся жидкостей (на примере дизельного топлива и воды) проведено при помощи пароэнергетической форсунки, используемой в низкоэмиссионном лабораторном образце горелочного устройства. Основной особенностью горелки является то, что в устройстве реализован способ сжигания путем распыла топлива струей перегретого водяного пара в камеру газогенерации. Ранее на базе реального водогрейного котла малой мощности было продемонстрировано, что такой подход позволяет обеспечить низкие показатели по вредным выбросам при сжигании как дизельного, так и низкокачественного топлива [22].

Изучение характеристик получаемого спрея было проведено на экспериментальной установке по исследованию распыла жидкости струей перегретого водяного пара [21]. Схема экспериментального стенда представлена на рис. 1. Основными элементами установки являются: пароэнергетическая форсунка (блок распыла лабораторного образца горелочного устройства), автоматизированная система подачи топлива и пара, измерительные приборы, вытяжная система.

Для исследования характеристик формируемого газочапельного потока использовался метод цифровой визуализации, основанный на использовании широко известного метода PIV. Поток освещается импульсным лазером (Nd:YAG лазер Quantel EVERGreen с длиной волны 532 нм), свет которого сфокусирован в виде лазерного ножа. Образы освещенных капель регистрируются цифровой ПЗС-камерой ImperX Bobcat 6620 для последующей компьютерной обработки. В исследуемые жидкости предвари-

тельно был подмешан люминесцентный краситель Nile Red: длина волны возбуждающего света соответствует длине волны лазера – 532 нм. При этом использовалось чистое дизельное топливо, а к воде добавлялось небольшое количество этилового спирта для лучшего растворения красителя. Длина волны переизлучаемого красителем света для дизельного топлива составляла 585 нм, для воды – 660 нм, что при использовании различных пороговых светофильтров позволило регистрировать жидкости по отдельности.

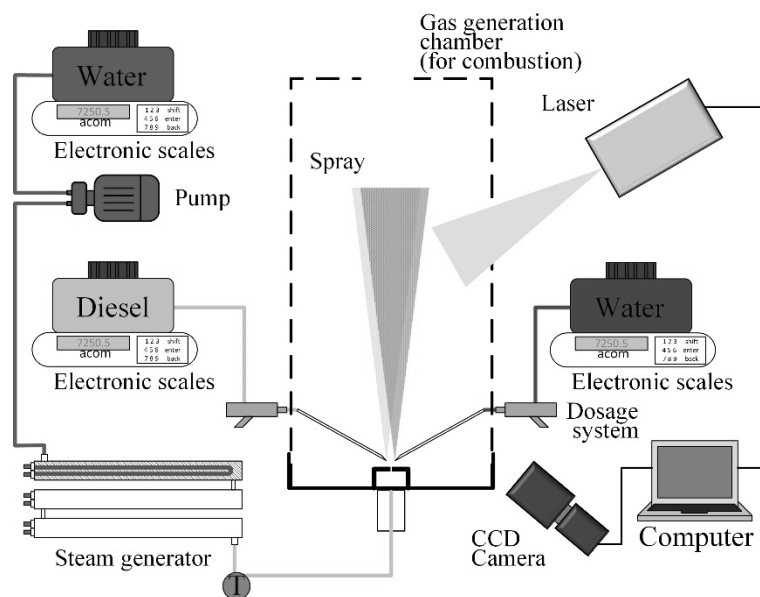


Рис. 1 – Схема экспериментального стенда по исследованию распыления несмешивающихся жидкостей струей перегретого водяного пара [21]

Fig. 1 – Scheme of an experimental setup for studying the spraying of immiscible liquids with a jet of superheated steam [21]

Помимо изучения характеристик распыла несмешивающихся жидкостей струей перегретого водяного пара было проведено исследование характеристик работы лабораторного образца горелочного устройства, в котором применяется данный подход подачи топлива с дополнительной подачей воды в парогенераторную форсунку. По аналогии с предыдущими работами авторов [23] была проведена серия измерений, которая включает измерение температуры факела и анализ продуктов сгорания как во внешнем пламени вдоль вертикальной оси симметрии горелочного устройства, так и на выходе из водоохлаждаемого участка сбора дымовых газов. Для измерения температуры использовалась платинородий-платинородиевая термопара типа Б. Для исследования состава продуктов сгорания использовались газоанализаторы ТЕСТ-1 и Testo 350 соответственно. Более подробно описание методики приведено в [23].

2. Результаты измерений и их анализ

На рис. 2 представлены характерные фотографии, полученные методом PIV при совместном распыле обеих жидкостей с расходом 0,6 кг/ч для каждой: а) теневая фотография; б) подсветка лазером без фильтров;

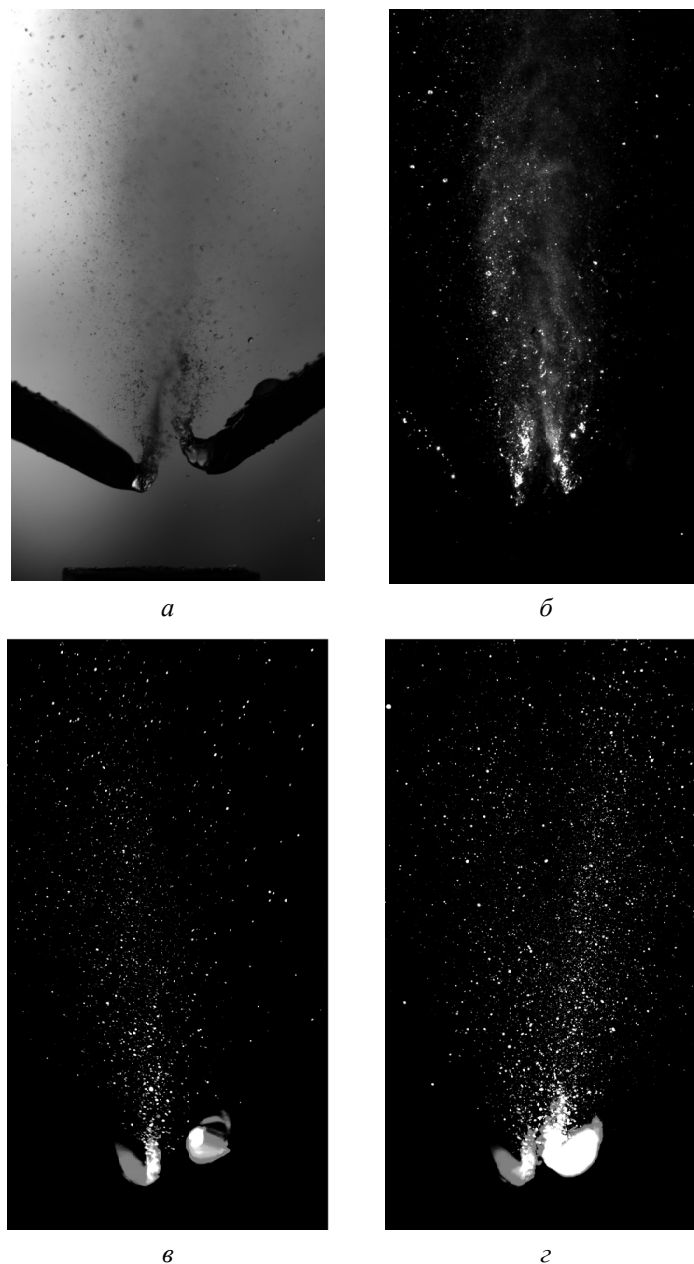


Рис. 2 – Характерные фотографии газок капельного потока, формируемого при распылении несмешивающихся жидкостей вода / дизельное топливо высокоскоростной струей:

a – тeneвая фотография; *б* – подсветка лазером без фильтров; *в* – с фильтрами «оранжевое стекло» (> 550 нм) и «сине-зеленое стекло» (< 590 нм) – регистрируется только дизельное топливо; *г* – с фильтром «красное стекло» (> 610 нм) – регистрируется только вода

Fig. 2 – Characteristic photographs of a gas-droplet flow formed during atomization of immiscible liquids water / diesel fuel by a high-speed jet:

a – is a shadow photograph; *b* – is laser illumination without filters; *c* – is with “orange glass” (> 550 nm) and “blue-green glass” (< 590 nm) filters – only diesel fuel is registered; *d* – is with “red glass” (> 610 nm) filter – only water is registered

в) с фильтрами «оранжевое стекло» (> 550 нм) и «сине-зеленое стекло» (< 590 нм) – регистрируется только дизельное топливо; г) с фильтром «красное стекло» (> 610 нм) – регистрируется только вода. Для съемки с пороговыми фильтрами представлены результаты объединения десяти полученных фотографий для каждой жидкости. Следует отметить, что использование пороговых светофильтров не позволяло полностью исключить свечение от второй жидкости. Это было учтено при дальнейшей обработке.

На рис. 3 представлен дисперсный состав, вычисленный по результатам цифровой обработки изображения: а) дизельное топливо; б) вода. Для этого к полученным фотографиям применены следующие процедуры: бинаризация изображения для увеличения контрастности; нахождение границ (Laplace edge detection); определение диаметра сферических образов. Можно заметить, что для обеих жидкостей характерно эффективное распыление: наибольшее количество детектируемых капель лежит в диапазоне $10 \dots 40$ мкм. Это говорит о применимости используемого метода распыла для задачи распыления несмешивающихся жидкостей без предварительного перемешивания (даже для соотношения $1 : 1$), так как добавление дополнительной жидкости не нарушает условий для обеспечения эффективного дробления топлива паровой струей, показанной в [21].

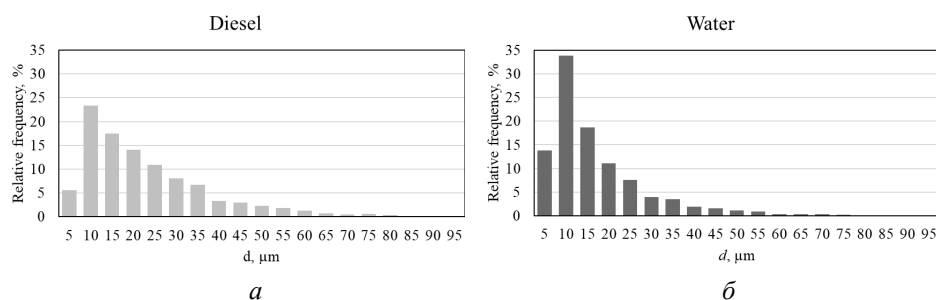


Рис. 3 – Дисперсный состав газокapеельного потока, формируемого при распылении несмешивающихся жидкостей дизельное топливо / вода высокоскоростной струей

Fig. 3 – Dispersed composition of a gas-droplet flow formed by spraying immiscible liquids diesel fuel / water with a high-speed jet

Далее было проведено исследование характеристик сжигания дизельного топлива с добавлением воды при распыле. Для исследования были выбраны следующие режимы: расход пара для распыла $0,8$ кг/ч, расход топлива 1 кг/ч, расход воды 0 кг/ч (далее – S8D10); расход пара $0,8$ кг/ч, расход топлива 1 кг/ч, расход воды $0,2$ кг/ч (далее – S8D10W2); расход пара $0,8$ кг/ч, расход топлива 1 кг/ч, расход воды $0,4$ кг/ч (далее – S8D10W4). На рис. 4 представлены зависимости температуры вдоль оси симметрии пламени для режимов горения дизельного топлива, распыляемого паровой струей, и дизельного топлива с совместной подачей воды.

По полученным результатам видно, что при добавлении в струю топлива потока воды с расходом $0,2$ кг/ч заметно снижение температуры пламени по всей длине факела. Отличие максимальных значений температуры составляет $300 \dots 400$ °C для различных режимов. При этом проявляется нестабильность горения, которая выражается в колебании температурных значений пламени и видна по характеру кривых и разбросу значений между экспериментами. Увеличение подачи воды с $0,2$ до $0,4$ кг/ч ведет

к дальнейшему снижению температур на 100...150 °С и росту пульсаций пламени.

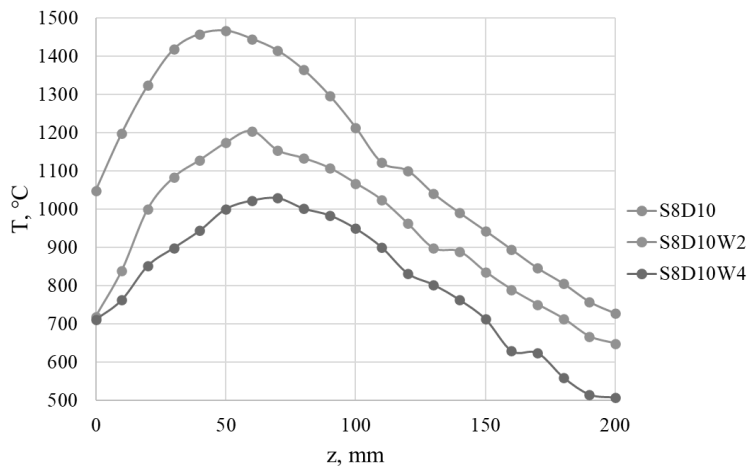


Рис. 4 – Температура вдоль оси симметрии пламени при сжигании водотопливного спрея

Fig. 4 – Temperature along the flame symmetry axis during combustion of water-fuel spray

Добавление воды при сжигании дизельного топлива ведет к изменению концентраций компонентов пламени (рис. 5). Из предположения, что эжекционный подсос воздуха через отверстия в корпусе горелочного устройства не меняется с добавлением воды, можно сделать вывод, что степень выгорания топлива внутри камеры газогенерации уменьшается, так как концентрация кислорода вдоль всей линии измерения газового состава увеличивается, а концентрация углекислого газа сокращается. Также заметно сокращение содержания монооксида углерода на выходе из сопла горелочного устройства от 3 % при сжигании только дизельного топлива до менее 2 % при сжигании дизельного топлива с добавлением воды (0,4 кг/ч).

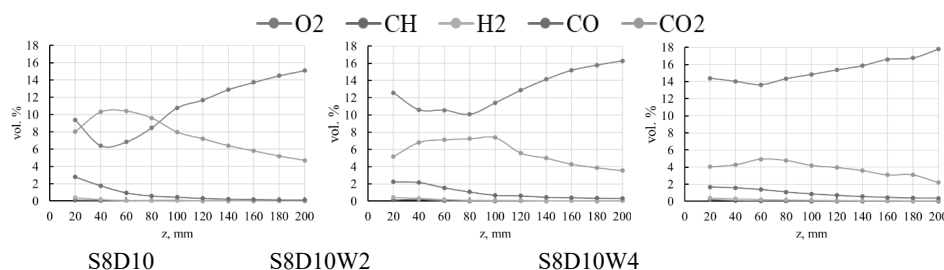


Рис. 5 – Объемное содержание веществ в пламени вдоль оси симметрии горелочного устройства

Fig. 5 – Volumetric content of substances in the flame along the axis of symmetry of the burner device

Далее был проведен анализ охлажденных продуктов сгорания на выходе из водоохлаждаемого участка сбора дымовых газов. Интегрально содержание вредных выбросов в дымовых газах в пересчете на удельные показатели в миллиграммах на киловатт-час [мг/кВт · ч] представлено на

рис. 6. Для расширения области анализа влияния добавления воды дополнительно к режимам 0,2 и 0,4 кг/ч были исследованы режимы с расходом 0,52 и 0,58 кг/ч (далее – S8D10 + W520 и S8D10 + W580 соответственно). Получено, что при добавлении 0,2 кг/ч воды происходит снижение на 30 % выбросов оксидов азота. При добавлении 0,4 кг/ч воды обеспечивается снижение на 50 % относительно режима с подачей только дизельного топлива. В аналогичной пропорции происходит рост выбросов CO. Дальнейшее увеличение расхода воды слабо влияет на выбросы оксидов азота, но ведет к значительному росту выбросов CO. Образование углеводородных соединений C_nH_m остается практически неизменным при расходе воды до 0,2 кг/ч, после чего демонстрирует многократный рост по мере увеличения расхода воды (рис. 6).

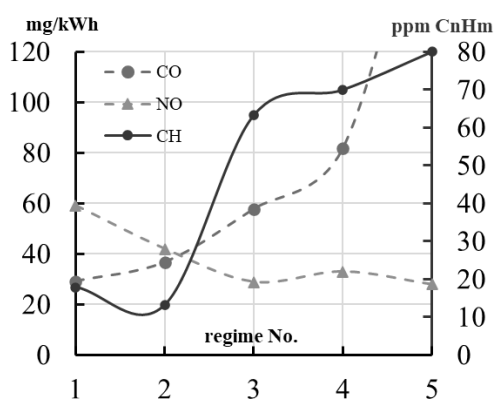


Рис. 6 – Результаты измерения интегрального содержания вредных выбросов в продуктах сгорания:

1 – S8D10; 2 – S8D10W2; 3 – S8D10W4;
4 – S8D10 + W520; 5 – S8D10 + W580

Fig. 6. Results of measuring the integral content of harmful emissions in combustion products:

1 – S8D10; 2 – S8D10W2; 3 – S8D10W4;
4 – S8D10 + W520; 5 – S8D10 + W580

Заключение

Проведенные исследования совместного распыла несмешивающихся жидкостей струей перегретого водяного пара на примере дизельного топлива и воды показали, что данный метод позволяет реализовать эффективное распыление как воды, так и топлива в едином потоке. Полученные результаты на пароэнергетической форсунке с одновременной подачей воды в область взаимодействия «пар – топливо» продемонстрировали, что распыление струей перегретого пара обеспечивает качественное диспергирование с преобладающим размером капель 10...40 мкм обеих жидкостей, что позволяет использовать данный подход для задач распыла двух жидкостей без их предварительного смешивания.

На примере совместного распыления дизельного топлива и воды пароэнергетической форсункой в низкоэмиссионном горелочном устройстве показано, что такой подход сопоставим с использованием традиционных водотопливных эмульсий для задач снижения производства вредных

веществ в процессе горения. В то же время изученный способ исключает необходимость использования эмульгаторов, тем самым снижаются эксплуатационные затраты как на стабилизацию эмульсии, так и на риски коррозии оборудования. При этом способ совместного распыла паровой струей приводит к аналогичному результату, получаемому при сжигании водотопливных эмульсий, – к снижению температуры пламени. В настоящей работе достигнуто уменьшение максимальной средней температуры более чем на 300 °С, что способствует уменьшению образования оксидов азота по тепловому механизму. Оптимальное соотношение воды и топлива (0,2...0,4 кг/ч воды на 1 кг/ч топлива) обеспечивает снижение выбросов NO_x на 30...50 %. Увеличение данного соотношения вызывает рост концентрации СО и углеводородов в продуктах сгорания, а также повышает нестабильность горения.

Для дальнейшего использования и практического внедрения метода требуется оптимизация режимов распыления и горения с целью минимизации негативных эффектов (рост СО, нестабильность пламени). Дополнительные исследования могут быть направлены на изучение влияния различных параметров (температура пара, давление, конструкция горелки) на характеристики распыления и сгорания.

Таким образом, предложенный метод представляет собой многообещающее решение для повышения экологичности сжигания жидкого топлива, однако требует дальнейшей доработки для обеспечения стабильности и эффективности процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Alternative liquid fuels: achievements and prospects / P.A. Strizhak, S.M. Aldoshin, D.O. Glushkov, K.I. Dement'ev, E.N. Ivashkina, M.V. Kulikova, A.L. Maximov, G.Yu. Nazarova, A.S. Noskov, V.N. Parmon, K.K. Paushkina, E.V. Popok, A.S. Sviridenko, L.S. Yanovsky // *Russian Chemical Reviews*. – 2025. – Vol. 94. – P. RCR5162. – DOI: 10.59761/RCR5162.
2. **Lowy D.A., Melendez J.R., Mátyás B.** Electroreduction of carbon dioxide to liquid fuels: A low-cost, sustainable technology // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. – 2024. – Vol. 194. – P. 114300. – DOI: 10.1016/j.rser.2024.114300.
3. Investigation of gasoline partially premixed combustion with external exhaust gas recirculation / V. Ravaglioli, F. Ponti, G. Silvagni, D. Moro, F. Stola, M. De Cesare // *SAE International Journal of Engines*. – 2021. – Vol. 15 (5). – P. 613–629. – DOI: 10.4271/03-15-05-0033.
4. Combustion, performance and emission discussion of soapberry seed oil methyl ester blends and exhaust gas recirculation in common rail direct fuel injection system / M.O.A. Sajjad, T. Sathish, R. Saravanan, M. Asif, E. Linul, Ü. Ağbulut // *Energy*. – 2023. – Vol. 278. – P. 127763. – DOI: 10.1016/j.energy.2023.127763.
5. **Abrar I., Bhaskarwar A.N.** Effect of alcohols on water solubilization in surfactant-free diesel microemulsions // *Energy Reports*. – 2022. – Vol. 8. – P. 504–512. – DOI: 10.1016/j.egy. 2022.10.157.
6. Micro-explosion combustion characteristics of boron/ammonium perchlorate/polyvinylidene fluoride composite microspheres / D. Liang, Y. Jiang, J. Wang, S. Wang, J. Wang, W. Xu, D. Shen // *Powder Technology*. – 2025. – Vol. 465. – P. 121354. – DOI: 10.1016/j.powtec. 2025.121354.
7. Features of combustion of water-fuel emulsions with different methods of introducing water into the combustion zone / O. Kolbasenko, S. Anastasenko, B. Dymo, O. Shostak // *Problems of Regional Energetics*. – 2025. – Vol. 2. – P. 178–189. – DOI: 10.52254/1857-0070.2025.2-66.15.

8. The influence of nitrous oxide on ignition and flame propagation of RP-3 kerosene / S. Li, X. Wei, D. Yao, N. Zhang, Y. Dong, Y. Xie, X. Zhao, S. Xi, K. Wang, Q.-D. Wang, J. Liang // *Combustion and Flame*. – 2025. – Vol. 273. – P. 113951. – DOI: 10.1016/j.combustflame.2024.113951.
9. Aluminium – water hydrogen generator for domestic and mobile application / A.Z. Zhuk, E.I. Shkolnikov, T.I. Borodina, G.E. Valiano, A.V. Dolzhenko, E.A. Kiseleva, S.A. Kochanova, E.D. Filippov, V.A. Semenova // *Applied Energy*. – 2023. – Vol. 334. – P. 120693. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.120693.
10. Tuning sulfur vacancies in CoS₂ via a molten salt approach for promoted mercury vapor adsorption / D. Liu, L. Yang, J. Wu, B. Li // *Chemical Engineering Journal*. – 2022. – Vol. 450. – P. 137956. – DOI: 10.1016/j.cej.2022.137956.
11. Enhancing combustion efficiency and reducing nitrogen oxide emissions from ammonia combustion: A comprehensive review / J. Tian, L. Wang, Y. Xiong, Y. Wang, W. Yin, G. Tian, Z. Wang, Y. Cheng, S. Ji // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2024. – Vol. 183. – P. 514–543. – DOI: 10.1016/j.psep.2024.01.020.
12. The effect of fuel injection equipment on the dispersed phase of water-in-diesel emulsions / M.A. Ismael, M.R. Heikal, A.R.A. Aziz, F. Syah, E.Z. Zainal A., C. Crua // *Applied Energy*. – 2018. – Vol. 222. – P. 762–771. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.03.070.
13. **Gopidesi R.K., Selvi Rajaram P.** A review on emulsified fuels and their application in diesel engine // *International Journal of Ambient Energy*. – 2022. – Vol. 43 (1). – P. 732–740. – DOI: 10.1080/01430750.2019.1667435.
14. **Woo S., Lee K.** Effect of injection strategy and water content on water emulsion fuel engine // *Fuel*. – 2023. – Vol. 343. – P. 127809. – DOI: 10.1016/j.fuel.2023.127809.
15. **Gowrishankar S., Krishnasamy A.** Injection system modification for biodiesel-water emulsion engine // *Fuel*. – 2023. – Vol. 337. – P. 127222. – DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127222.
16. **Ayhan V., Ece Y.M.** Electronically controlled direct water injection to reduce NOx emissions // *Applied Energy*. – 2020. – Vol. 260. – P. 114328. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114328.
17. Emulsifier-free biodiesel-water-ethanol emulsion fuel / M.A. Abdul Rashid, A.M. Ithnin, W.J. Yahya, W.N.I. Wan Mahdi, N.A. Mazlan, A.A. Zulmajdi, D.A. Sengeng, K. Eiji // *Fuel*. – 2025. – Vol. 392. – P. 134873. – DOI: 10.1016/j.fuel.2025.134873.
18. **Shlegel N., Klimenko A., Strizhak P.** Determination of integral characteristics of secondary atomization of fuel oil/water emulsion droplets // *Fuel*. – 2024. – Vol. 372. – P. 132218. – DOI: 10.1016/j.fuel.2024.132218.
19. **Vigneswaran R., Balasubramanian D., Sastha B.D.S.** Combustion characteristics of diesel engine with (TiO₂) and water-in-diesel emulsion fuel // *Fuel*. – 2021. – Vol. 285. – P. 119115. – DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119115.
20. Experimental study of inductive electrostatic dual-fluid nozzle for dust pollution control / H. Han, H. Wang, Q. Zhang, T. Yang, X. Li, C. Zhang, N. Terbish // *Powder Technology*. – 2024. – Vol. 434. – P. 119343. – DOI: 10.1016/j.powtec.2023.119343.
21. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet / I.S. Anufriev, E.Yu. Shadrin, E.P. Kopyev, S.V. Alekseenko, O.V. Sharypov // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – Vol. 163. – P. 114400. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114400.
22. Combustion of liquid hydrocarbon fuels sprayed into gas generation chamber with superheated steam as low emission technology for energy production / E.P. Kopyev, I.S. Sadkin, E.Yu. Shadrin, M.A. Mukhina, V.A. Kuznetsov, A.V. Minakov // *Fuel*. – 2025. – Vol. 381. – P. 133344. – DOI: 10.1016/j.fuel.2024.133344.
23. Experimental study of kerosene combustion characteristics in a jet of superheated steam with a controlled air excess / M.A. Mukhina, I.S. Sadkin, E.Yu. Shadrin, E.P. Kopye // *Engineered Science*. – 2024. – Vol. 31. – P. 1195. – DOI: 10.30919/es1195.

CO-ATOMIZATION OF IMMISCIBLE LIQUIDS BY A JET OF SUPERHEATED STEAM AND ITS EFFECT ON COMBUSTION CHARACTERISTICS

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

Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS, Novosibirsk, Russia

The article presents the results of an experimental study of the co-atomization of immiscible liquids (diesel fuel/water) with a superheated steam jet and their subsequent combustion in a low-emission burner with a gas generation chamber. It is shown that a steam-powered nozzle ensures efficient dispersion of both phases without preliminary emulsification: the predominant droplet size is 10–40 μm . With the addition of water in an amount of 0.2–0.4 kg/h to 1 kg/h of fuel, a decrease in the maximum flame temperature by 300–400 $^{\circ}\text{C}$ and a reduction in NO_x emissions by 30–50 % are achieved. With a further increase in the proportion of water, an increase in the concentrations of CO and C_nH_m , as well as increased flame pulsations, are observed. The obtained results confirm the efficiency of the separate atomization method without emulsifiers and determine the range of optimal combustion modes.

Keywords: atomization, superheated steam, immiscible liquids, water-fuel systems, NO_x , low-emission combustion.

DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-26-37

REFERENCES

1. Strizhak P.A., Aldoshin S.M., Glushkov D.O., Dement'ev K.I., Ivashkina E.N., Kulikova M.V., Maximov A.L., Nazarova G.Yu., Noskov A.S., Parmon V.N., Paushkina K.K., Popok E.V., Sviridenko A.S., Yanovsky L.S. Alternative liquid fuels: achievements and prospects. *Russian Chemical Reviews*, 2025, vol. 94, p. RCR5162. DOI: 10.59761/RCR5162.
2. Lowy D.A., Melendez J.R., Mátyás B. Electroreduction of carbon dioxide to liquid fuels: A low-cost, sustainable technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, vol. 194, p. 114300. DOI: 10.1016/j.rser.2024.114300.
3. Ravaglioli V., Ponti F., Silvagni G., Moro D., Stola F., De Cesare M. Investigation of gasoline partially premixed combustion with external exhaust gas recirculation. *SAE International Journal of Engines*, 2021, vol. 15 (5), pp. 613–629. DOI: 10.4271/03-15-05-0033.
4. Sajjad M.O.A., Sathish T., Saravanan R., Asif M., Linul E., Ağbulut Ü. Combustion, performance and emission discussion of soapberry seed oil methyl ester blends and exhaust gas recirculation in common rail direct fuel injection system. *Energy*, 2023, vol. 278, p. 127763. DOI: 10.1016/j.energy.2023.127763.
5. Abrar I., Bhaskarwar A.N. Effect of alcohols on water solubilization in surfactant-free diesel microemulsions. *Energy Reports*, 2022, vol. 8, pp. 504–512. DOI: 10.1016/j.egy.2022.10.157.
6. Liang D., Jiang Y., Wang J., Wang S., Wang J., Xu W., Shen D. Micro-explosion combustion characteristics of boron/ammonium perchlorate/polyvinylidene fluoride composite microspheres. *Powder Technology*, 2025, vol. 465, p. 121354. DOI: 10.1016/j.powtec.2025.121354.
7. Kolbasenko O., Anastasenko S., Dymo B., Shostak O. Features of combustion of water-fuel emulsions with different methods of introducing water into the combustion zone. *Problems of Regional Energetics*, 2025, vol. 2, pp. 178–189. DOI: 10.52254/1857-0070.2025.2-66.15.
8. Li S., Wei X., Yao D., Zhang N., Dong Y., Xie Y., Zhao X., Xi S., Wang K., Wang Q.-D., Liang J. The influence of nitrous oxide on ignition and flame propagation of RP-3 kerosene. *Combustion and Flame*, 2025, vol. 273, p. 113951. DOI: 10.1016/j.combustflame.2024.113951.
9. Zhuk A.Z., Shkolnikov E.I., Borodina T.I., Valiano G.E., Dolzhenko A.V., Kiseleva E.A., Kochanova S.A., Filippov E.D., Semenova V.A. Aluminium – water hydrogen generator for domestic and mobile application. *Applied Energy*, 2023, vol. 334, p. 120693. DOI: 10.1016/j.apenergy.2023.120693.

10. Liu D., Yang L., Wu J., Li B. Tuning sulfur vacancies in CoS₂ via a molten salt approach for promoted mercury vapor adsorption. *Chemical Engineering Journal*, 2022, vol. 450, p. 137956. DOI: 10.1016/j.cej.2022.137956.
11. Tian J., Wang L., Xiong Y., Wang Y., Yin W., Tian G., Wang Z., Cheng Y., Ji S. Enhancing combustion efficiency and reducing nitrogen oxide emissions from ammonia combustion: A comprehensive review. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, vol. 183, pp. 514–543. DOI: 10.1016/j.psep.2024.01.020.
12. Ismael M.A., Heikal M.R., Aziz A.R.A., Syah F., Zainal A. E.Z., Crua C. The effect of fuel injection equipment on the dispersed phase of water-in-diesel emulsions. *Applied Energy*, 2018, vol. 222, pp. 762–771. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.03.070.
13. Gopidesi R.K., Selvi Rajaram P. A review on emulsified fuels and their application in diesel engine. *International Journal of Ambient Energy*, 2022, vol. 43 (1), pp. 732–740. DOI: 10.1080/01430750.2019.1667435.
14. Woo S., Lee K. Effect of injection strategy and water content on water emulsion fuel engine. *Fuel*, 2023, vol. 343, p. 127809. DOI: 10.1016/j.fuel.2023.127809.
15. Gowrishankar S., Krishnasamy A. Injection system modification for biodiesel-water emulsion engine. *Fuel*, 2023, vol. 337, p. 127222. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127222.
16. Ayhan V., Ece Y.M. Electronically controlled direct water injection to reduce NOx emissions. *Applied Energy*, 2020, vol. 260, p. 114328. DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114328.
17. Abdul Rashid M.A., Ithnin A.M., Yahya W.J., Wan Mahdi W.N.I., Mazlan N.A., Zulmajdi A.A., Sugeng D.A., Eiji K. Emulsifier-free biodiesel-water-ethanol emulsion fuel. *Fuel*, 2025, vol. 392, p. 134873. DOI: 10.1016/j.fuel.2025.134873.
18. Shlegel N., Klimenko A., Strizhak P. Determination of integral characteristics of secondary atomization of fuel oil/water emulsion droplets. *Fuel*, 2024, vol. 372, p. 132218. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.132218.
19. Vigneswaran R., Balasubramanian D., Sastha B.D.S. Combustion characteristics of diesel engine with (TiO₂) and water-in-diesel emulsion fuel. *Fuel*, 2021, vol. 285, p. 119115. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119115.
20. Han H., Wang H., Zhang Q., Yang T., Li X., Zhang C., Terbish N. Experimental study of inductive electrostatic dual-fluid nozzle for dust pollution control. *Powder Technology*, 2024, vol. 434, p. 119343. DOI: 10.1016/j.powtec.2023.119343.
21. Anufriev I.S., Shadrin E.Yu., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Sharypov O.V. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 163, p. 114400. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114400.
22. Kopyev E.P., Sadkin I.S., Shadrin E.Yu., Mukhina M.A., Kuznetsov V.A., Minaikov A.V. Combustion of liquid hydrocarbon fuels sprayed into gas generation chamber with superheated steam as low emission technology for energy production. *Fuel*, 2025, vol. 381, p. 133344. DOI: 10.1016/j.fuel.2024.133344.
23. Mukhina M.A., Sadkin I.S., Shadrin E.Yu., Kopyev E.P. Experimental study of kerosene combustion characteristics in a jet of superheated steam with a controlled air excess. *Engineered Science*, 2024, vol. 31, p. 1195. DOI: 10.30919/es1195.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Бутаков Евгений Борисович – родился в 1990 году, канд. техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории экологических проблем теплоэнергетики Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Область научных интересов: горение, газификация, воспламенение. Опубликовано 89 научных работ. (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 1. E-mail: e_butakov@mail.ru).

Butakov Evgeny – Candidate of Sciences (Eng.), senior researcher at the Laboratory of Environmental Problems of Thermal Power Engineering, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS. His research interests are currently focused on combustion, gasification, and ignition. He is the author of 89 scientific papers. (Address: 1, Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: e_butakov@mail.ru).



Копьев Евгений Павлович – родился в 1991 году, канд. техн. наук, заведующий лабораторией экологических проблем теплоэнергетики Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Область научных интересов: энергетика, сжигание топлива. Опубликовано 120 научных работ (РИНЦ). (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 1. E-mail: kopyev.evgeniy@mail.ru).

Kopyev Evgeny – Candidate of Sciences (Eng.), Head of the 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 the author of about 120 scientific papers (RSCI). (Address: 1, Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: kopyev.evgeniy@mail.ru).



Садкин Иван Сергеевич – родился в 1998 году, аспирант Новосибирского государственного технического университета, инженер-исследователь лаборатории экологических проблем теплоэнергетики Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Область научных интересов: энергетика, сжигание топлива. Опубликовано 107 научных работ (РИНЦ). (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 1. E-mail: sadkinvanya@mail.ru).

Sadkin Ivan – PhD student in NSTU, engineer researcher at the 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 the author of about 107 scientific papers (RSCI). (Address: 1, Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: sadkinvanya@mail.ru).



Шадрин Евгений Юрьевич – родился в 1992 году, канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник лаборатории экологических проблем теплоэнергетики Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН. Область научных интересов: энергетика, сжигание топлива. Опубликовано 108 научных работ (РИНЦ). (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 1. E-mail: evgen_zavita@mail.ru).

Shadrin Evgeny – Candidate of Sciences (Phys & Math.), Senior Researcher at the 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 the author of about 108 scientific papers (RSCI). (Address: 1, Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia. E-mail: evgen_zavita@mail.ru).

Статья поступила 28 января 2026 г.
Received January 28, 2026

To Reference:

Butakov E.B., Kopyev E.P., Sadkin I.S., Shadrin E.Yu. Sovmestnyi raspyl nesmeshivayushchikhsya zhidkostei struei peregretoego vodyanogo para i ego vliyanie na kharakteristiki szhiganiya [Co-atomization of immiscible liquids by a jet of superheated steam and its effect on combustion characteristics]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii* = *Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2026, no. 2 (71), pp. 26–37. DOI: 10.17212/1727-2769-2026-2-26-37.