

Научно-исследовательский журнал «*Chemical Bulletin*»

<https://cb-journal.ru>

2025, Том 8, № 4 / 2025, Vol. 8, Iss. 4 <https://cb-journal.ru/archives/category/publications>

Научная статья / Original article

УДК 662.75

DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-4-8

Образование аэрозолей дизельного топлива в присутствии оксида пропилена и его производных

¹ Цыганков Д.В. *,
² Мирошников А.М.,
³ Полозова А.В.,

¹ Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева,
² Научный консультант общества с ограниченной ответственностью «Химпром», г. Кемерово,
³ Кемеровский коммунально-строительный техникум имени В.И. Заузелкова,
* Ответственный автор E-mail: cygankov.d@inbox.ru

Аннотация: изучение образования аэрозолей дизельного топлива в присутствии оксида пропилена и его производных на лабораторной установке позволяет максимально близко приблизиться к процессу реального смесеобразования в дизеле и установить влияние этих соединений на полноту сгорания и дымность отработавших газов дизеля.

Цель. Выявить отличия в характеристиках образования аэрозолей для дизельного топлива без присадок и дизельного топлива, содержащего оксид пропилена и его производные в качестве присадок.

Методы. Заключаются в использовании парогенератора для образования аэрозолей и скоростной видеокамеры, позволяющей заснять все этапы образования аэрозолей. Для видеорегистрации исследуемого процесса использовалась высокоскоростная CMOS видеокамера “Phantom MIRO M310” (тип изображения – монохромное; максимальное разрешение 1280×800 пикс; максимальная скорость съемки – $6.5 \cdot 10^5$ к/сек; минимальное время экспозиции – 1 мкс; максимальная разрядность изображения – 12 бит). При видеорегистрации использовался объектив “SIGMA 50 mm 1:2.8D MACRO EX” (фокусное расстояние – 50 мм, относительное отверстие – 2.8). Для подсветки регистрационной области использовался LED прожектор “Multiled PT-V9 GS Vitec” (количество светодиодов – 24; световой поток – 7700 Лм; мощность – 84 Вт, угол рассеивания – 30°). Для рассеивания света от прожектора использовался экран из матового поликарбоната (толщиной 2 мм). LED прожектор и CMOS видеокамера размещались друг напротив друга таким образом, чтобы оптическая ось камеры совпадала с направлением светового потока прожектора.

Результаты и выводы. Введение в состав дизельного топлива оксида пропилена и его производных в количестве 0,1% до двух раз снижает время начала интенсивного испарения топлива. В реальном двигателе такой эффект позволит значительно сократить размеры капель жидкого дизельного топлива в цилиндре дизеля, что приведет к увеличению полноты сгорания топлива и снижению сажеобразования. В результате повышается мощность, снижается расход топлива и дымность отработавших газов.

Ключевые слова: оксид пропилена, пропиленгликоль, дипропиленгликоль, испаряемость, образование аэрозолей

Для цитирования: Цыганков Д.В., Мирошников А.М., Полозова А.В. Образование аэрозолей дизельного топлива в присутствии оксида пропилена и его производных // Chemical Bulletin. 2025. Том 8. № 4. 8. DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-4-8

Поступила в редакцию: 5 сентября 2025 г.; Одобрена после рецензирования: 9 ноября 2025 г.; Принята к публикации: 10 декабря 2025 г.

Formation of diesel fuel aerosols in the presence of propylene oxide and its derivatives

¹ Tsygankov D.V. *,

² Miroshnikov A.M.,

³ Polozova A.V.,

¹ Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbacheva,

² Scientific Consultant, Khimprom Limited Liability Company, Kemerovo,

³ Kemerovo Municipal Construction College named after V.I. Zauzelkov,

* Corresponding author E-mail: cygankov.d@inbox.ru

Abstract: studying the formation of diesel fuel aerosols in the presence of propylene oxide and its derivatives in a laboratory setup allows us to closely approximate the process of real-life mixture formation in diesel engines and determine the influence of these compounds on combustion efficiency and exhaust smoke.

Objective. To identify differences in the aerosol formation characteristics of diesel fuel without additives and diesel fuel containing propylene oxide and its derivatives as additives.

Methods. The method involves using a steam generator to generate aerosols and a high-speed video camera to capture all stages of aerosol formation. A high-speed CMOS video camera, "Phantom MIRO M310" (image type – 1080p), was used to record the process under study. monochrome; maximum resolution 1280×800 pixels; maximum shooting speed – 6.5 105 fps; minimum exposure time – 1 μs; maximum image bit depth – 12 bits). A SIGMA 50 mm 1:2.8D MACRO EX lens (focal length – 50 mm, relative aperture – 2.8) was used for video recording. A Multiled PT-V9 GS Vitec LED illuminator (number of LEDs – 24; luminous flux – 7700 lm; power – 84 W, dispersion angle – 30°) was used to illuminate the recording area. A matte polycarbonate screen (2 mm thick) was used to diffuse the light from the illuminator. The LED illuminator and CMOS video camera were placed opposite each other so that the optical axis of the camera coincided with the direction of the luminous flux of the illuminator.

Results and conclusions. Introduction into the diesel engine Adding 0.1% propylene oxide and its derivatives to fuel reduces the onset of intense fuel evaporation by up to two times. In a real engine, this effect will significantly reduce the size of liquid diesel fuel droplets in the cylinder, leading to more complete combustion and reduced soot formation. This results in increased power, reduced fuel consumption, and reduced exhaust smoke.

Keywords: Propylene oxide, propylene glycol, dipropylene glycol, evaporation, aerosol formation

For citation: Tsygankov D.V., Miroshnikov A.M., Polozova A.V. Formation of diesel fuel aerosols in the presence of propylene oxide and its derivatives. Chemical Bulletin. 2025. 8 (4). 8. DOI: 10.58224/2619-0575-2025-8-4-8

The article was submitted: September 5, 2025; Approved after reviewing: November 9, 2025; Accepted for publication: December 10, 2025.

Введение

При перегонке дизельного топлива в присутствии оксида пропилена [1, 2, с. 98-101] (ОП) было замечено, что ОП оказывает влияние на испарение дизельного топлива не только на начальном этапе, но и в конце разгонки. Такой эффект возможен,

если только часть ОП в процессе перегонки переходит в пропиленгликоль (ПГ). Для более тонкого исследования был проведен термический анализ с использованием дериватографа [3]. Результаты изменения термического эффекта представлены на рис. 1.

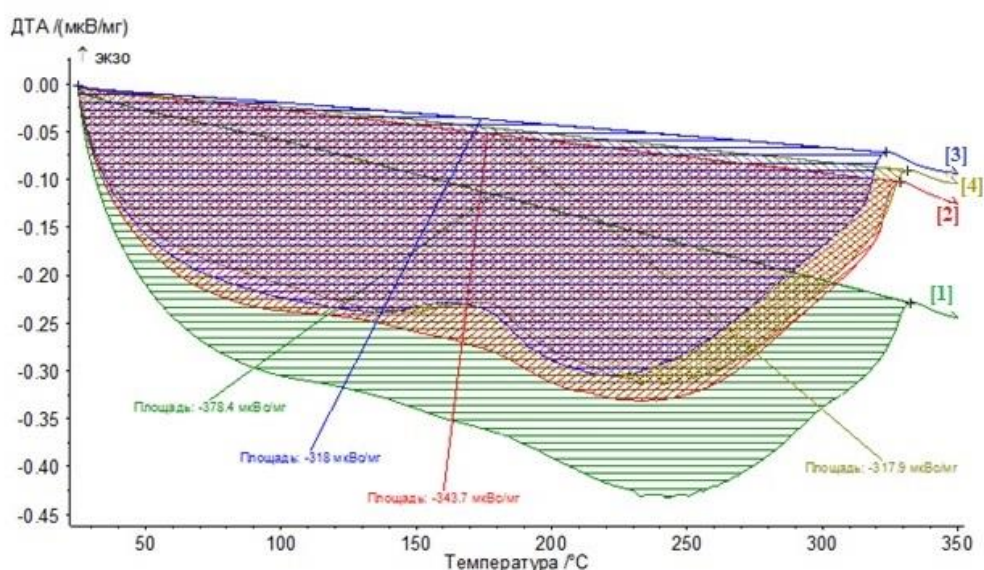


Рис. 1. Показатели дифференциального термического анализа (ДТА).
Fig. 1. Differential thermal analysis (DTA) indicators.

Показатель ДТА позволяет оценить энергетические эффекты, связанные с испарением композиций [4, 5].

По результатам ДТА были определены затраты энергии на испарение в условных единицах. Они представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты дифференциального термического анализа.

Table 1

Results of differential thermal analysis.

	Площадь под кривой, мкВс/мг	Относительное уменьшение затрат энергии на испарение, %
Д/Т	-378,4	----
Д/Т+0,1%ОП	-343,7	9,17
Д/Т+0,1%ПГ	-317,9	15,99
Д/Т+(0,05%ОП+0,05ПГ)	-318,0	15,96

В присутствии как ОП, так и ПГ всего в количестве 0,1% значительно снижается энергия на испарение, почти на 16% в случае с ПГ [6].

Чтобы определить насколько быстрее будут образовываться аэрозоли, приближено к реальному двигателю [7, 8 и 9], была изготовлена лабораторная установка, представляющая из себя парогенератор с компрессором, который непрерывно подавал воздух под постоянным давлением в зону непосредственного испарения парогенератора [10, 11].

Полученные экспериментальные данные по горению пропиленоксида, рекомендуются, в качестве руководства для дальнейшего уточнения подмеханизмов горения ОП и образования полициклических ароматических углеводородов (ПАУ) [12].

Недавнее исследование доказало оптимизирующий эффект ОП на испарение, горение и выбросы загрязняющих веществ высокоэнергетического топлива JP-10 [13].

Ранее авторами было установлено, что оксид пропилена улучшает процесс сгорания, что способствует снижению расхода топлива, увеличению мощности и снижению дымности дизелей. Изучено поведения дизельного топлива в присутствии оксида пропилена или пропиленгликоля в процессе смесеобразования смеси (на стадии образования аэрозолей и кипения), установлено, что оксид пропилена и пропиленгликоль способствует дроблению частиц и образованию поверхностных пленок [2, с. 98-101, 14].

Материалы и методы исследований

Целью экспериментов было установление характеристик диспергирования и парообразования дизельного топлива с добавками, а также оценка влияния добавок на интенсивность диспергирования и испарения дизельного топлива.

В качестве составов рассматривались следующие горючие жидкости:

- (#1) дизельное топливо без примесей;
- (#2) дизельное топливо с примесью оксида пропилена;
- (#3) дизельное топливо с примесью пропиленгликоля;
- (#4) дизельное топливо с примесью дипропиленгликоля.

Внешний вид установки представлен на рис. 1.

Генерация пара (совместно с мелкодисперсным аэрозолем) осуществлялась в несколько этапов:

- 1) исследуемым составом (в объеме около 0.3 мл) пропитывалась вата;
- 2) пропитанная исследуемым составом вата помещалась на нихромовую спираль (диаметром около 0.5 мм);
- 3) на расстоянии около 5 мм относительно спирали размещался штуцер, через который подавался поток воздуха (генерируемый воздушным компрессором);
- 4) нихромовая спираль подключалась к источнику питания;
- 5) образовавшийся в результате нагрева ватки с исследуемым составом пар уносился боковым воздушным потоком (рис. 2).

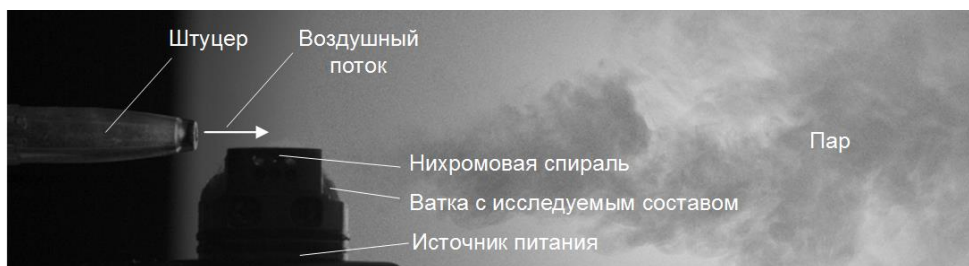


Рис. 2. Внешний вид парогенераторной установки.
Fig. 2. The appearance of the steam generator set.

Схема экспериментального комплекса приведена на рис. 2. Для подсветки регистрационной области использовался LED прожектор “Multiled PT-V9 GS Vitec” (количество светодиодов – 24; световой поток – 7700 Лм; мощность – 84 Вт, угол рассеивания – 30°). Для рассеивания света от прожектора использовался экран из матового поликарбоната (толщиной 2 мм). Для видеорегистрации исследуемого процесса использовалась высокоскоростная CMOS видеокамера “Phantom MIRO M310” (тип изображения – монохромное; макси-

мальное разрешение 1280×800 пикс; максимальная скорость съемки – $6.5 \cdot 10^5$ к/сек; минимальное время экспозиции – 1 мкс; максимальная разрядность изображения – 12 бит). При видеорегистрации использовался объектив “SIGMA 50 mm 1:2.8D MACRO EX” (фокусное расстояние – 50 мм, относительное отверстие – 2.8). LED прожектор и CMOS видеокамера размещались друг напротив друга таким образом, чтобы оптическая ось камеры совпадала с направлением светового потока прожектора (рис. 3).

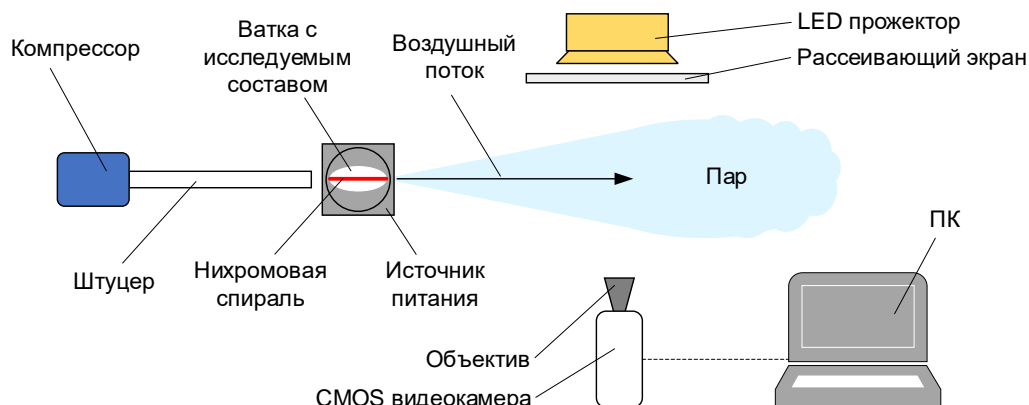


Рис. 3. Схема экспериментального комплекса.
Fig. 3. The scheme of the experimental complex.

После выполнения эксперимента видеозаписи подвергались последующей обработке с целью определения характеристик диспергирования и парообразования дизельного топлива с добавками и без. При обработке использовалось программное обеспечение “DaVis”. Обработка выполнялась в несколько последовательных этапов (рис. 3):

(I) совокупность исходных изображений генерируемой парогенератором струи пара и мелкодисперсных капель импортировался в “DaVis”;

(II) при неизменных параметрах видеосъемки регистрировалась серия фоновых изображений (в отсутствии струи), которые также импортировались в “DaVis”. Импортированные изображения усреднялись с использованием процедуры “Statistics”;

(III) выполнялась коррекция фона на изображениях с использованием процедуры “White Image Correction”. В ходе процедуры выполнялось выравнивание интенсивности изображений. Для каждого пикселя фонового изображения определялся корректирующий коэффициент, как отношение средней интенсивности всего изображения к интенсивности этого пикселя. Далее каждый

пиксель на исходном изображении струи умножался на соответствующий корректирующий коэффициент. В результате на исходных изображениях устранялись колебания интенсивности, связанные с неоднородностью подсветки;

(IV) на изображении маскировались области за пределами сгенерированной струи пара с использованием процедуры “Geometric Mask”;

(V) так как пар на изображении имел интенсивность (яркость) ниже средней интенсивности фона на изображении, то маскировались пиксели с максимальным значением интенсивности, соответствующей средней интенсивности фона, с использованием процедуры “Algorithmic Mask”;

(VI) в ряде случаев осуществлялось осреднение полученных данных. В ходе обработки для каждого пикселя вычислялось среднее значение интенсивности (путем определения среднеарифметического значения интенсивности всех пикселей с аналогичными координатами для серии изображений). В результате обработки находилось осредненное изображение генерируемой парогенератором струи.

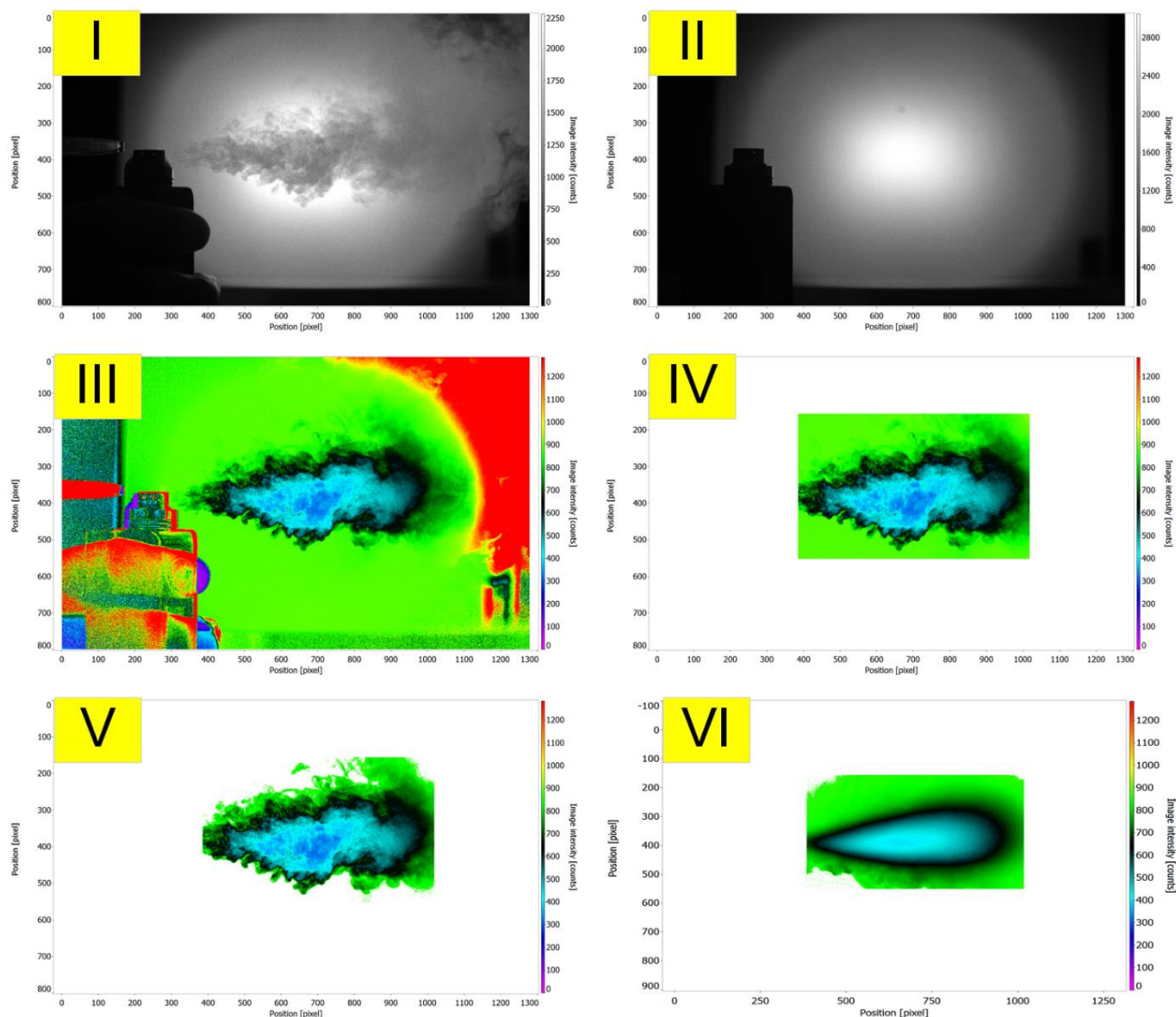


Рис. 4. Иллюстрация процесса обработки данных: (I) – исходное изображение генерируемой парогенератором струи; (II) – фоновое изображение; (III) – коррекция фона с использованием процедуры “White Image Correction”; (IV) – маскирование пикселей с максимальным и минимальным значением интенсивности с использованием процедуры “Geometric Mask”; (V) – маскирование пикселей с максимальным значением интенсивности с использованием процедуры “Algorithmic Mask”; (VI) – построение среднего поля интенсивности генерируемой струи.

Fig. 4. Illustration of the data processing process: (I) – the initial image of the jet generated by the steam generator; (II) – background image; (III) – background correction using the “White Image Correction” procedure; (IV) – masking pixels with maximum and minimum intensity values using the “Geometric Mask” procedure; (V) – masking pixels with the maximum intensity value using the “Algorithmic Mask” procedure; (VI) – constructing the average intensity field of the generated jet.

На завершающем этапе для скорректированных и полученных мгновенных и средних изображений, иллюстрирующих интенсивность генерируемой струи, строились профили интенсивности струи, а также изменение средней интенсивности (I) генерируемой струи во времени. Впоследствии полученные (по результатам обработки видеозаписей) данные анализировались с целью определения характеристик диспергирования и парообра-

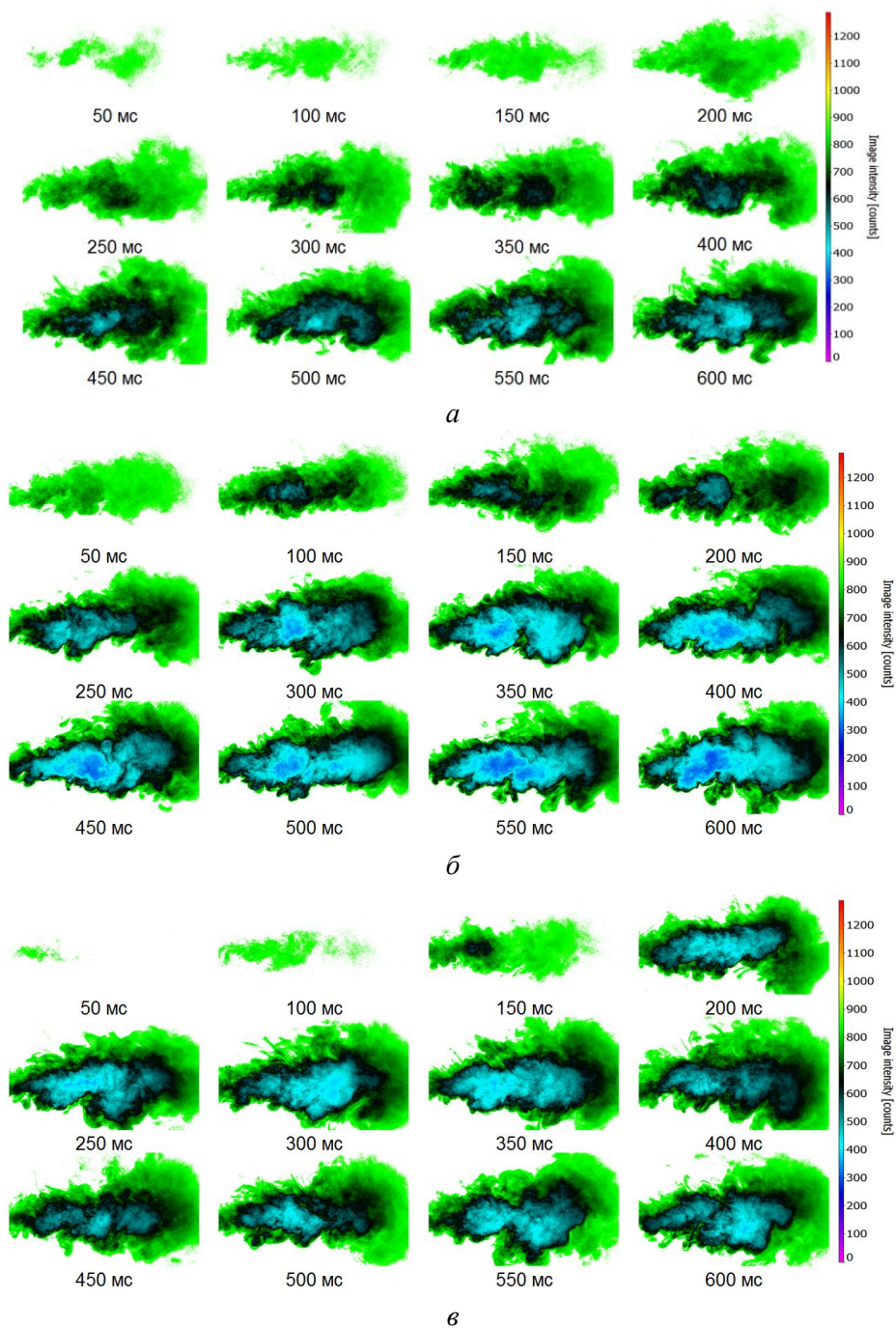
зования рассмотренных топливных составов. В качестве искомых характеристик рассматривались следующие:

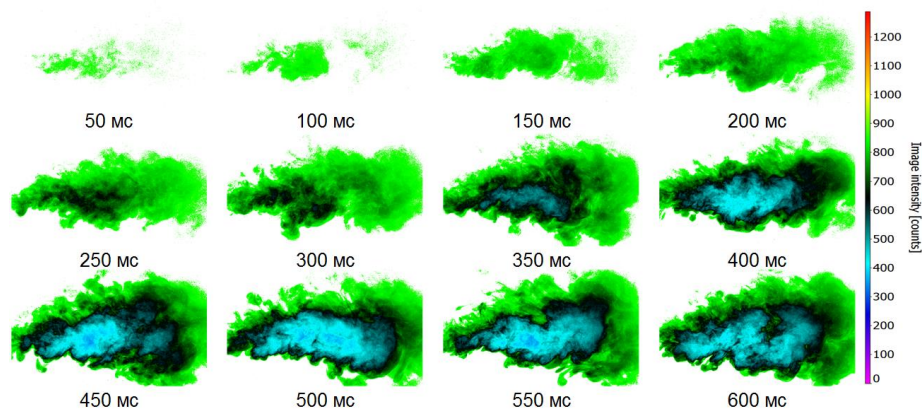
- время прогрева (задержки) до начала стабильного испарения (t_h);
- продолжительность стабильного испарения (t_e);
- относительная безразмерная концентрация парок капельной смеси в генерируемой струе (C);

- скорость изменения относительной безразмерной концентрации парок капельной смеси в струе (V_C).

На рис. 4 представлены поля интенсивности сгенерированной парогенератором струи для че-

тырех рассмотренных топливных составов. Данные, представленные на рис. 4, приведены на временном интервале 50-600 мс с момента включения нагревательной спирали (начала испарения топливной смеси).





2

Рис. 5. Поля интенсивности сгенерированной парогенератором струи для четырех рассмотренных топливных составов (на временном интервале 50-600 мс с момента включения нагревательной спирали): *a* – дизельное топливо без примесей; *b* – дизельное топливо с примесью оксида пропилена; *в* – дизельное топливо с примесью пропиленгликоля; *г* – дизельное топливо с примесью дипропиленгликоля.

Fig. 5. Intensity fields of the jet generated by the steam generator for the four fuel compositions considered (in the time interval of 50-600 ms from the moment the heating coil is switched on): *a* – diesel fuel without impurities; *b* – diesel fuel with an admixture of propylene oxide; *c* – diesel fuel with an admixture of propylene glycol; *d* – diesel fuel with an admixture of dipropylene glycol.

Важно отметить, что интенсивность струи на рис. 5 отражает относительную концентрацию топлива (C) в ней: снижение интенсивности соответствует росту концентрации. По этой причине анализ полученных концентрационных полей представляет собой важный этап в определении характеристик прогрева и испарения топлива. Видно (рис. 5), что динамика изменения структуры струи для разных рассмотренных составов отличается. Так, например, видно, что для дизельного топлива без примесей (рис. 5*a*) стабилизация струи (достижение момента стабильного испарения) происходит через 550-600 мс с момента включения нагревательной спирали, для дизельного топлива с примесью оксида пропилена (рис. 5*б*)

– через 300-350 мс, для дизельного топлива с примесью пропиленгликоля (рис. 5*в*) – через 250-300 мс, для дизельного топлива с примесью дипропиленгликоля (рис. 5*г*) – через 400-450 мс.

Результаты и обсуждения

Анализ проведенных исследований показывает, что, введение в состав дизельного топлива трех рассмотренных примесей до двух раз снижает время начала интенсивного испарения топлива (t_h). С целью оценки данного эффекта построены зависимости (для всех рассмотренных топливных композиций), отражающие динамику изменения интенсивности струи во времени, представленные на рис. 6.

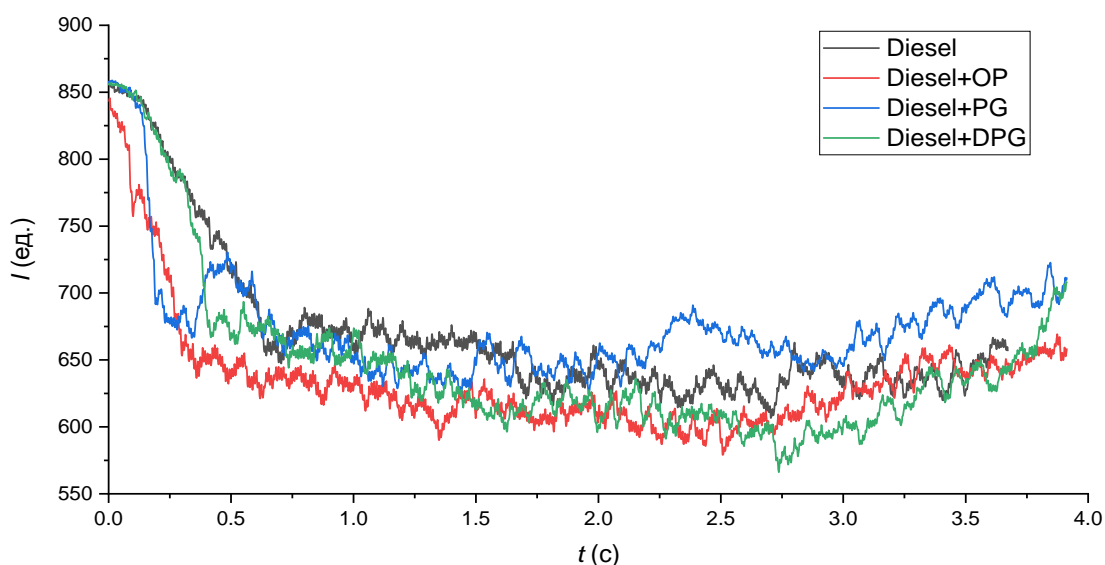


Рис. 6. Зависимости (для всех рассмотренных топливных композиций), отражающие динамику изменения интенсивности струи во времени.

Fig. 6. Dependences (for all considered fuel compositions) reflecting the dynamics of jet intensity changes over time.

Из рис. 6 следует, что для рассмотренных топливных композиций можно выделить два главных отличия: первое – динамика снижения интенсивности на начальном этапе; второе – минимальное зарегистрированное значение интенсивности. Первое, очевидно, характеризует скорость прогрева топлива, второе – максимальную концентрацию

паровой фазы в струе. При этом для качественного анализа данных следует выделить основные этапы рассматриваемого процесса. На рис. 7 проиллюстрированы временные этапы процесса на примере дизельного топлива с примесью оксида пропилена.

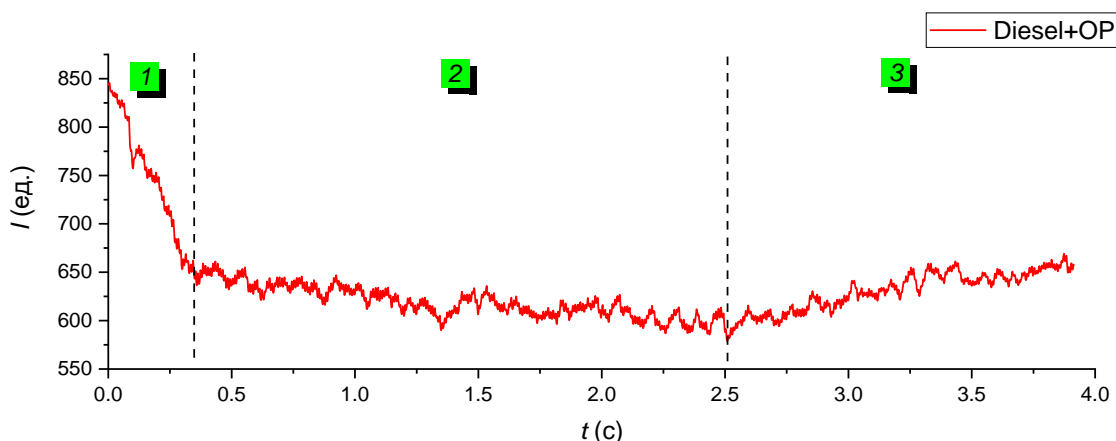


Рис. 7. Временные этапы процесса на примере дизельного топлива с примесью оксида пропилена: 1 – прогрев; 2 – стабильное испарение; 3 – “угасание” процесса.

Fig. 7. Time stages of the process on the example of diesel fuel with an admixture of propylene oxide: 1 – heating; 2 – stable evaporation; 3 – “extinction” of the process.

Продолжительность первого (1) временного этапа (рис. 7) соответствует времени прогрева (t_h) и характеризуется резким снижением средней интенсивности струи, этап продолжается до дости-

жения кривой первой точки перегиба. Продолжительность второго (2) временного этапа соответствует стабильного испарения (t_e) и характеризуется плавно изменяющейся интенсивностью, этап

продолжается до достижения кривой второй точки перегиба. На третьем этапе (3) интенсивность струи начинает резко возрастать, что, очевидно, может быть связано со снижением количества топлива в испарителе (данный этап интереса не представляет). Зарегистрированные особенности

характерны для всех рассмотренных топливных композиций (рис. 6). На рис. 8 представлены найденные по результатам исследований продолжительности первого и второго выделенных этапов.

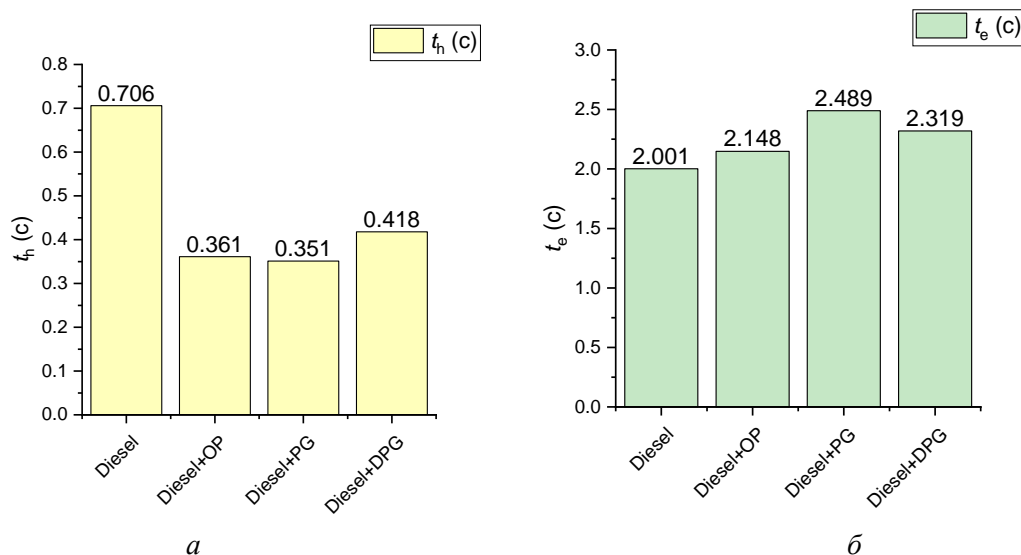


Рис. 8. Продолжительности выделенных этапов для всех рассмотренных топливных композиций: *a* – значения времен прогрева (t_h); *б* – значения времен стабильного испарения (t_e).

Fig. 8. The durations of the selected stages for all considered fuel compositions: *a* – values of warm-up times (t_h); *b* – values of stable evaporation times (t_e).

Рис. 8а показывает, что добавление к дизельному топливу рассмотренных добавок существенно снижает времена его прогрева (t_h) и, следовательно, ускоряет начало испарения топлива. Данный результат хорошо дополняет представленные на рис. 5 видеogramмы исследованных топливных струй. Установленные продолжительности (t_e) стабильного испарения (рис. 8б) для всех рассмотренных топливных композиций, в целом, хорошо коррелируют между собой, отличие не превышает 20%. В целом такой результат объясняется идентичными для всех экспериментов температурами

нагревательной спирали и исходным объемом топлива. То есть уже после прогрева интенсивность парообразования отличается несущественно. На рис. 9 представлены полученные по результатам перерасчета значений интенсивности зависимости средней безразмерной концентрации топлива в струе (C) от времени (для всех рассмотренных топливных композиций). При перерасчете данных принималось, что максимальная зарегистрированная во всех экспериментах интенсивность струи ($I \approx 860$) соответствует $C=0$, а минимальная интенсивность струи ($I \approx 560$) соответствует $C=1$.

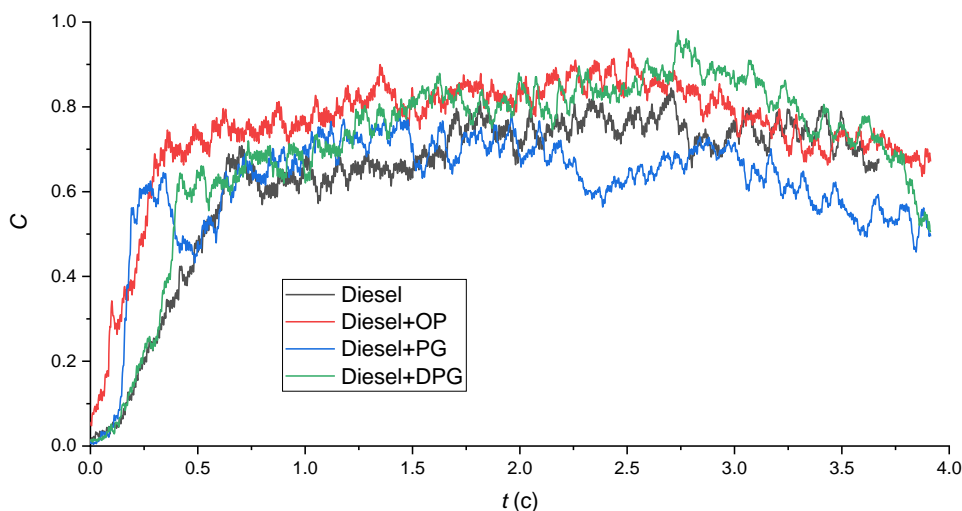


Рис. 9. Зависимости средней безразмерной концентрации топлива в струе (C) от времени (для всех рассмотренных топливных композиций).

Fig. 9. Dependences of the average dimensionless fuel concentration in the jet (C) on time (for all considered fuel compositions).

Видно (рис. 9), что предельные расчетные значения концентрации отличаются для рассмотренных топливных композиций. Так, найдено, что максимальные значения безразмерной концентраций составили: для дизельного топлива без примесей – $C \approx 0.845$; для дизельного топлива с примесью оксида пропилена – $C \approx 0.937$; для дизельного топлива с примесью пропиленгликоля – $C \approx 0.785$; для дизельного топлива с примесью дипропиленгликоля – $C \approx 0.981$. Беря в расчет значения времен прогрева t_h , представленные на рис. 8а, можно рассчитать скорости роста безразмерной концентрации паров топлива в струе. Полученные значения скорости роста безразмерной концентрации паров в струе для рассмотренных топливных композиций составили: для дизельного топлива без примесей – $V_C \approx 1.19 \text{ с}^{-1}$; для дизельного топлива с примесью оксида пропилена – $V_C \approx 2.59 \text{ с}^{-1}$; для дизельного топлива с примесью пропиленгликоля – $V_C \approx 2.24 \text{ с}^{-1}$; для дизельного топлива с примесью дипропиленгликоля – $V_C \approx 2.35 \text{ с}^{-1}$.

Выводы

Проведенный эксперимент позволил количественно установить, что в присутствии ОП или его производных время на образование аэрозолей в

дизельном топливе почти в два раза меньше, чем на чистом дизельном топливе. Для дальнейших исследований необходимо учитывать очень малые количества веществ (максимально 0,1%), что позволяет говорить о рассмотрении данных присадок с позиции наночастиц [15, 16 и 17].

В реальном дизеле это позволит значительно уменьшить размеры жидкого дизельного топлива в цилиндре, что приведет к повышению полноты сгорания топлива и снижению содержания сажи и других продуктов неполного сгорания. В свою очередь это:

1. Приведет к снижению расхода топлива на 10%.
2. Увеличит мощность дизеля
3. Приведет к снижению дымности на 30% и более [18].

Таким образом, по результатам выполненных экспериментов можно заключить, что добавление в состав дизельного топлива специализированных добавок способно существенно интенсифицировать характеристики его прогрева испарения, что может быть, безусловно, полезным для целого ряда практических топливных приложений.

Список источников

1. Мирошников А.М., Цыганков Д.В., Текутьев И.Б. Многофункциональная присадка к дизельному топливу, патент РФ №2461605 МПК C10L1/18; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева». 2011114173/04; заявл. 11.04.2011; опубл.20.09.2012, бюлл. №26.
2. Цыганков Д.В. Повышение экологической безопасности автомобильного транспорта за счет использования оксида пропилена в качестве многофункциональной присадки к жидкому моторному топливу: монография. Кемерово: КузГТУ, 2024. 233 с. ISBN 978-5-00137-470-1
3. Cen C., Wu H., Lee C., Fan L., Liu F. Experimental Investigation on the Sputtering and Micro-Explosion of Emulsion Fuel Droplets during Impact on a Heated Surface // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2019. Vol. 132. P. 130 – 137.
4. Wang Z., Yuan B., Huang Y., Cao J., Wang Y., Cheng X. Progress in Experimental Investigations on Evaporation Characteristics of a Fuel Droplet // *Fuel Process. Technol.* 2022э Vol. 231. P. 107243.
5. Gan Y., Qiao L. Radiation-enhanced evaporation of ethanol fuel containing suspended metal nanoparticles // *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2012. Vol. 55 (21-22) P. 5777 – 5782.
6. Мирошников А.М., Цыганков Д.В., Полозова А.В. Испарение дизельного топлива в присутствие оксида пропилена и пропиленгликоля // *Нефтепереработка и нефтехимия.* 2023. № 6. С. 3 – 7.
7. Цыганков Д.В., Мирошников А.М., Полозова А.В. Изучение влияния оксида пропилена и пропиленгликоля на образование поверхностных пленок и аэрозолей с дизельным топливом *Нефтепереработка и нефтехимия.* Научно-технические достижения и передовой опыт 2023 № 11/12. С. 56 – 58.
8. Lee C.C., Tran M.-V., Tan B.T., et al. 2021. A comprehensive review on the effects of additives on fundamental combustion characteristics and pollutant formation of biodiesel and ethanol // *Fuel* Vol. 288 P. 119749.
9. Basu S., Miglani A. Combustion and heat transfer characteristics of nanofluid fuel droplets: A short review // *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2016. Vol. 96. P. 482 – 503.
10. Restrepo-Cano J., Ordonez-Loza J., Guida P., Roberts W.L., Chejne F., Sarathy S.M., Im H.G. Evaporation, Break-up, and Pyrolysis of Multi-Component Arabian Light Crude Oil Droplets at Various Temperatures // *Int. J. Heat Mass Transf.* 2022. Vol. 183, P. 122175.
11. Tie L., Keiya N., Hiroyuki H. Droplet size distribution and evaporation characteristics of fuel spray by a swirl type atomizer // *Fuel* 2011. Vol. 90 (7) P. 2367 – 2376.
12. Qi Jing, Yuntao Li, Laibin Zhang, Dan Wang, Congling Shi. Optimization effect of propylene oxide (PO) on evaporation, combustion, and pollutant emissions of high-energy-density JP-10 fuel // *Fuel.* 2024. Vol. 361. P. 130585.
13. Dmitriev A.M., Osipova K.N., Knyazkov D.A., Shmakov A.G. Propylene Oxide Addition Effect on the Chemical Speciation of a Fuel-Rich Premixed n-Heptane/Toluene Flame // *ACS Omega.* 2022. № 7 (50). P. 46900 – 46914. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05999>
14. Jang G.M., Kim N. II Breakup Characteristics of a Single-Droplet of Water-in-Oil Emulsion Impinging on a Hot Surface // *Fuel.* 2021. Vol. 291. P. 120191.
15. Emekwuru N.G. Nanofuel Droplet Evaporation Processes // *Journal of the Indian Institute of Science.* 2018. Vol. 99 (1) P. 43 – 58.
16. Gan Y., Qiao L. Evaporation characteristics of fuel droplets with the addition of nanoparticles under natural and forced convections // *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2011. Vol. 54 (23-24) P. 4913 – 4922.
17. Tanvir S., Qiao L. Effect of Addition of Energetic Nanoparticles on Droplet-Burning Rate of Liquid Fuels // *Journal of Propulsion and Power* 2015. Vol. 31 (1) P. 408 – 415.
18. Цыганков Д.В., Мирошников А.М., Текутьев И.Б. Изучение окиси пропилена в качестве добавки к моторному топливу // *Вестник КузГТУ.* 2013. № 3. С. 114 – 116.

References

1. Miroshnikov A.M., Tsygankov D.V., Tekutyev I.B. Multifunctional additive to diesel fuel, Russian Federation Patent No. 2461605 IPC C10L1/18; applicant and patent holder Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education "Kuzbass State Technical University named after T.F. Gorbachev". 2011114173/04; declared 11.04.2011; published 20.09.2012, bulletin No. 26.
2. Tsygankov D.V. Improving the environmental safety of motor transport through the use of propylene oxide as a multifunctional additive to liquid motor fuel: monograph. Kemerovo: KuzSTU, 2024. 233 p. ISBN 978-5-00137-470-1

3. Cen C., Wu H., Lee C., Fan L., Liu F. Experimental Investigation on the Sputtering and Micro-Explosion of Emulsion Fuel Droplets during Impact on a Heated Surface. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2019. Vol. 132. P. 130 – 137.
4. Wang Z., Yuan B., Huang Y., Cao J., Wang Y., Cheng X. Progress in Experimental Investigations on Evaporation Characteristics of a Fuel Droplet. *Fuel Process. Technol.* 2022e Vol. 231. P. 107243.
5. Gan Y., Qiao L. Radiation-enhanced evaporation of ethanol fuel containing suspended metal nanoparticles. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2012. Vol. 55 (21-22) P. 5777 – 5782.
6. Miroshnikov A.M., Tsygankov D.V., Polozova A.V. Evaporation of diesel fuel in the presence of propylene oxide and propylene glycol. *Oil refining and petrochemistry.* 2023. No. 6. P. 3 – 7.
7. Tsygankov D.V., Miroshnikov A.M., Polozova A.V. Study of the influence of propylene oxide and propylene glycol on the formation of surface films and aerosols with diesel fuel *Oil refining and petrochemistry. Scientific and technical achievements and best practices* 2023 No. 11/12. P. 56 – 58.
8. Lee C.C., Tran M.-V., Tan B.T., et al. 2021. A comprehensive review on the effects of additives on fundamental combustion characteristics and pollutant formation of biodiesel and ethanol. *Fuel* Vol. 288 P. 119749.
9. Basu S., Miglani A. Combustion and heat transfer characteristics of nanofluid fuel droplets: A short review. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2016. Vol. 96. P. 482 – 503.
10. Restrepo-Cano J., Ordóñez-Loza J., Guida P., Roberts W.L., Chejne F., Sarathy S.M., Im H.G. Evaporation, Break-up, and Pyrolysis of Multi-Component Arabian Light Crude Oil Droplets at Various Temperatures. *Int. J. Heat Mass Transf.* 2022. Vol. 183, P. 122175.
11. Tie L., Keiya N., Hiroyuki H. Droplet size distribution and evaporation characteristics of fuel spray by a swirl type atomizer. *Fuel* 2011. Vol. 90 (7) P. 2367 – 2376.
12. Qi Jing, Yuntao Li, Laibin Zhang, Dan Wang, Congling Shi. Optimization effect of propylene oxide (PO) on evaporation, combustion, and pollutant emissions of high-energy-density JP-10 fuel. *Fuel.* 2024. Vol. 361. P. 130585.
13. Dmitriev A.M., Osipova K.N., Knyazkov D.A., Shmakov A.G. Propylene Oxide Addition Effect on the Chemical Speciation of a Fuel-Rich Premixed n-Heptane/Toluene Flame. *ACS Omega.* 2022. No. 7 (50). P. 46900 – 46914. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05999>
14. Jang G.M., Kim N. II Breakup Characteristics of a Single-Droplet of Water-in-Oil Emulsion Impinging on a Hot Surface. *Fuel.* 2021. Vol. 291. P. 120191.
15. Emekwuru N.G. Nanofuel Droplet Evaporation Processes. *Journal of the Indian Institute of Science.* 2018. Vol. 99 (1) P. 43 – 58.
16. Gan Y., Qiao L. Evaporation characteristics of fuel droplets with the addition of nanoparticles under natural and forced convections. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2011. Vol. 54 (23-24) P. 4913 – 4922.
17. Tanvir S., Qiao L. Effect of Addition of Energetic Nanoparticles on Droplet-Burning Rate of Liquid Fuels. *Journal of Propulsion and Power* 2015. Vol. 31 (1) P. 408 – 415.
18. Tsygankov D.V., Miroshnikov A.M., Tekutyev I.B. Study of propylene oxide as an additive to motor fuel. *Bulletin of KuzSTU.* 2013. No. 3. P. 114 – 116.

Информация об авторах

Цыганков Д.В., кандидат химических наук, доцент, Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, cygankov.d@inbox.ru

Мирошников А.М., доктор технических наук, профессор, научный консультант общества с ограниченной ответственностью «Химпром», г. Кемерово, alexandr_mirosh@mail.ru

Полозова А.В., преподаватель, Кемеровский коммунально-строительный техникум имени В.И. Заузелкова, e-mail: avbashtanova96@mail.ru

© Цыганков Д.В., Мирошников А.М., Полозова А.В., 2025

Information about the authors

Tsygankov D.V., Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, cygankov.d@inbox.ru

Miroshnikov A.M., Doctor of Engineering Sciences, Professor, Scientific Consultant, Khimprom Limited Liability Company, Kemerovo, alexandr_mirosh@mail.ru

Polozova A.V., Lecturer, V.I. Zauzelkov Kemerovo Municipal Construction College, e-mail: avbashtanova96@mail.ru

© Tsygankov D.V., Miroshnikov A.M., Polozova A.V., 2025