

УДК 621.039.542.4
DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4536
Шифр специальности ВАК: 05.14.04

Характеристики горения капель водомазутной эмульсии со специализированными присадками

Н.Е. Шлегель✉, А.Ю. Клименко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

✉nik.shlegel.ask@gmail.com

Аннотация. Актуальность. Применение мазутного топлива на энергетических установках характеризуется повышенными значениями недожога и антропогенных выбросов. Одним из способов снизить антропогенные выбросы является использование водомазутных эмульсий. Также для сокращения антропогенных выбросов и улучшения характеристик горения топлива используются дополнительные специализированные присадки. **Цель.** Исследование направлено на определение оптимальной присадки к мазутному топливу для снижения антропогенных выбросов и времен задержки зажигания. **Методы.** В состав водомазутного топлива добавляли присадки: ИОН-М, Роснефть P503B3, Роснефть P502B1 (относительная массовая концентрация 0,5 %). Определены физико-химические свойства мазута М-100, а также элементарный состав CHNSO. Установлены реологические характеристики составов водомазутных топлив. С помощью высокоскоростной съемки определены времена задержки зажигания капель. С помощью газоанализатора определены антропогенные выбросы. **Результаты и выводы.** Результаты проведенных исследований показали, что присадка на основе особого сочетания положительно и отрицательно заряженных ионов (ИОН М) снижает времена задержки зажигания на 20–60 % при варьировании температуры газовой среды в диапазоне от 700 до 900 °С. Добавление присадки на основе жирных растительных кислот (P502B3) снижало времена задержки зажигания на 7–10 % при изменении температуры в диапазоне от 700 до 900 °С относительно водомазутного топлива. Установлено, что использование присадки P502B1 в водомазутном топливе позволило снизить времена задержки зажигания на 15–50 %. Определено, что в присутствии катализаторов горения вода связывается с тяжелыми углеводородами и тем самым выход летучих веществ происходит быстрее, т. е. подведенная теплота не тратится на прогрев воды в капли, а равномерно воздействует на весь объем топлива. Результаты исследований антропогенных выбросов показали, что использование присадок при сжигании водомазутного топлива снижает концентрации CO, CO₂, NO, SO₂ на 8, 6, 10 и 13 %, соответственно, по сравнению с мазутом.

Ключевые слова: водомазутное топливо, присадки, характеристики горения, антропогенные газовые выбросы, газоанализатор

Благодарность: Исследование выполнено при поддержке проекта РНФ № 22-79-00197 (<https://rscf.ru/project/22-79-00197/>).

Для цитирования: Шлегель Н.Е., Клименко А.Ю. Характеристики горения капель водомазутной эмульсии со специализированными присадками // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 4. – С. 118–130. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4536

UDC 621.039.542.4
DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4536

Combustion characteristics of water-oil emulsion droplets with special additives

N.E. Schlegel✉, A.Yu. Klimenko

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

✉nik.shlegel.ask@gmail.com

Abstract. Relevance. Fuel oil application in power plants is characterized by increased values of underburning and anthropogenic emissions. One way to reduce anthropogenic emissions is the use of oil-water emulsions. Also, additional specialized additives are used to reduce anthropogenic emissions and improve fuel combustion characteristics. **Aim.** To determine the optimal fuel oil additive to reduce anthropogenic emissions and ignition delay times. **Methods.** The following additives: ION-M, Rosneft R503V3, Rosneft R502V1 (relative mass concentration 0.5%) were added to the water-oil fuel. The physico-chemical properties of fuel oil M-100, as well as the elemental composition of CHNSO, were determined. The rheological characteristics of water-oil fuel compositions were established. Using high-speed photography, the droplet ignition delay times were determined. Using the gas analyzer, it was possible to prevent anthropogenic emissions. **Results and conclusions.** The results of the study showed that the additive based on a special combination of positively and negatively charged ions (ION M) reduces ignition delay times by 20–60%, when the gas temperature varies in the range from 700 to 900°C. The addition of the additive based on fatty vegetable acids (P502B3) reduced the ignition delay times by 7–10%, when the temperature changed in the range from 700 to 900°C relative to water-oil fuel. It was found that when using the P502B1 additive in water-oil fuel, it was possible to reduce the ignition delay times by 15–50%. It was determined that in the presence of combustion catalysts, water binds with heavy hydrocarbons and thus the release of volatile substances occurs faster, i. e. the supplied heat is not wasted on heating water into droplets, but evenly affects the entire volume of fuel. The results of the study of anthropogenic emissions showed that the use of additives when burning water-oil fuel reduces the concentrations of CO, CO₂, NO, SO₂ by 8, 6, 10 and 13%, respectively, compared to fuel oil.

Keywords: fuel oil/water emulsion, additives, combustion characteristics, anthropogenic gas emissions; gas analyzer

Acknowledgements: The research was supported by the RSF project (project no. 23-27-00039).

For citation: Schlegel N.E., Klimenko A.Yu. Combustion characteristics of water-oil emulsion droplets with special additives. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 4, pp. 118–130. DOI: 10.18799/24131830/2024/4/4536

Введение

Топочный мазут М40 и М100 является основным жидким топливом в энергетических установках, поскольку обладает высокой теплотворной способностью и низкой стоимостью [1]. Как правило, при сжигании мазутного топлива образуются различные загрязняющие вещества, такие как остаточные золы, сажа и серная кислота [2–4]. Следует отметить, что мазутное топливо характеризуется высоким содержанием серы (до 4,5 %). При этом в мазуте содержатся различные концентрации микроэлементов тяжелых металлов, таких как ванадий, никель, свинец, медь. Такая концентрация приводит к высокотемпературной коррозии [2–4]. В настоящее время существует высокая потребность в мазутном топливе [5, 6]: для морских перевозок, выработки тепловой и электрической энергии. Для эффективного сжигания мазутного топлива энергетическая установка обязана иметь соответствующее оборудование, входящее в состав мазутного хозяйства. Вследствие чего предусматривается возможность приема, хранения, подготовки мазута к сжиганию и подаче к форсункам котлов [7]. Для улучшения эффективности сжигания мазута и снижения антропогенных выбросов используются дополнительные специализированные присадки [8, 9]. Они способствуют снижению затрат на производство тепловой энергии. Использование присадок в топливе имеет ряд преимуществ, а именно повышение КПД котла и предотвращение образования эвтектических смесей при сжигании топлива. Также введение присадок позволяет снизить температуру застывания (до 15–20 °С) и повы-

сить текучесть мазута [10]. Производство эффективных присадок включает смешивание, перемешивание ингредиентов в течение 5–10 минут и фильтрацию. Как правило, в присадку добавляют катализаторы горения, износостойкие, дымоудаляющие и энергосберегающие компоненты, а также регуляторы октанового числа [11, 12].

На данный момент существует несколько типов специализированных присадок, которые позволяют повысить КПД энергетической установки [13]. Например, катализаторы горения улучшают процесс горения, тем самым способствуют более равномерному распределению тяжело воспламеняющихся частей в капле мазута, что приводит к снижению недожога топлива [14]. Для уменьшения температуры застывания мазута используют депрессорные присадки. Как правило, они состоят из растворов сополимеров. Такие присадки применяются для уменьшения затрат на подогрев мазута, а также вследствие снижения вязкости топлива позволяют уменьшить расходы на перекачку его по трубопроводам [15].

Одним из основных направлений с целью повышения КПД котельной установки является сжигание мазута в виде водомазутной эмульсии [16]. Как правило, одной из главных проблем сжигания мазута является его обводнение. Известно, что после получения с нефтеперерабатывающего завода мазут содержит до 1,5 % воды [17]. При транспортировке содержание воды в мазуте повышается до 3–5 %. Но особенно сильное обводнение мазута происходит при его сливе и разогреве, так как наиболее распространенным способом его разогре-

ва является разогрев острым паром [7]. При этом содержание воды в мазуте может достигать 30 %. Стоит отметить, что распределение воды в мазуте имеет линзовый характер из-за малой разницы плотностей рассматриваемых фаз. При сжигании таких смесей образуются огромные количества газовых выбросов в окружающую среду, что приводит к понижению эффективности сжигания топлива, а также появляется опасность пульсаций и срыва факела [18]. Определено [19], что вязкость и высшая теплота сгорания водомазутных эмульсий зависят от содержания воды. Оптимальное содержание воды в водомазутных эмульсиях определяется на основе численных значений вязкости. Как правило, содержание воды в водомазутной эмульсии составляет около 10–15 % [19]. В [20, 21] установлено, что оптимальная концентрация воды в водомазутном топливе составляет около 10 %. При этой концентрации усиливается эффективность распыливания топлива, тем самым повышаются характеристики горения, а также снижается содержание антропогенных выбросов (оксиды азота, углерода и др). Еще одним важным параметром при сжигании эмульсии является содержание водорода в газовой фазе, т. е. отношение Н/С. При этом основным определяющим параметром является состав смеси, который характеризуется коэффициентом избытка воздуха и количеством воды в топливе. Тем самым гомогенизация воздушно-мазутной смеси на основе воды позволяет снизить концентрации сажи в дымовых газах [22].

Существует несколько способов получения водомазутной эмульсии. Одним из способов является интенсивная гидромеханическая обработка в кавитационном поле. При этом способе происходят глубокие структурные изменения в молекулярном составе углеводородов, вследствие чего повышается степень дисперсности асфальтенов, карбенов, карбоидов до размеров 2–3 мкм. В работе [23] показано исследование процесса приготовления топливных эмульсий в конических измельчителях. Проведенное исследование показывает возможность использования конических измельчителей в качестве эмульгаторов. При этом оптимальное содержание воды составляет 5–10 %. Но эти методы требуют дополнительных затрат на оборудование. Показано [10], что при добавлении присадки СПИХ-9777 расход топлива снижается на 3–5 %.

Присадки для водомазутного топлива используются в котельных агрегатах для улучшения работы горелки, снижения потребления топлива, повышения эффективности горения и сокращения выбросов вредных веществ в окружающую среду. Выбор оптимальных присадок для улучшения характеристик горения считается сложной задачей, так как на сегодняшний день есть множество при-

садок, которые могут влиять на реологические характеристики топлива и на его характеристики горения. Цель настоящего исследования – определение оптимальной присадки для сжигания водомазутного топлива в высокотемпературных условиях.

Методика проведения экспериментов, стенд и материалы

На рис. 1 представлена схема экспериментального стенда для проведения исследований по определению характеристик горения и концентраций антропогенных выбросов. Для проведения экспериментальных исследований приготавливалась водомазутная эмульсия (6) при помощи магнитного перемешивающего устройства (5) в течение 10–15 минут. В качестве лабораторной камеры сгорания использовалась муфельная печь R50/250/13 Nabertherm GmbH (максимальная рабочая температура 1100 °С, внутренний диаметр 30 мм). Эксперименты проводились при температуре газовой среды $T_g=700–900$ °С. Высокоскоростная видеокамера Phantom Miro C110 использовалась для визуализации и записи процессов горения (2). Эксперименты проведены при разрешении 1280×1024 пикселей, со скоростью съемки 915 кадров в секунду и межкадровой задержкой 1/10000. Высокоскоростная камера использовалась совместно с объективом Sigma 50mm f/1.4 EX DG OS HSM Macro Nikon F. Эксперименты по изучению характеристик горения проводились с одиночными каплями. Стоит отметить, что экспериментальная установка обеспечивала устойчивые условия горения без влияния потока окисляющей среды. С помощью электропривода (8) запускался координатный механизм (9), который помещал каплю (10) в муфельную печь (3). Координатный механизм (9) соединялся с компьютером (7), который отслеживал положение капли топлива. Для регистрации антропогенных выбросов в муфельную печь помещался щуп газоанализатора (4). Концентрации газов, выделяемых во время горения, измерялись с помощью газового анализатора Тест 1 (электрохимические – O₂ (0–25 %, ±0,2 %), SO₂ (0–1000 ppm, ±5 %), NO (0–2000 ppm, ±5 %), NO₂ (0–500 ppm, ±7 %), H₂S (0–500 ppm, ±5 %); оптические – CO₂ (0–30 %, ±2 %), CH₄ (0–50 %, ±5 %), CO (0–50 %, ±5 %), H₂ (0–30 %, ±5 %)). Газоанализ проводился при использовании небольшого количества топлива (0,2 мл). Исследуемый состав набирался с помощью шприца и помещался на держатель. После чего отправлялся в муфельную печь. Отбор проб дымовых газов производился с помощью насоса, встроенного в газоанализатор, и зонда, расположенного в камере сгорания. Для осушки дымовых газов и отделения крупных частиц сажи и летучей золы использовались фильтр и влагоотделитель. Расчет средних значений концентраций газов проведен по методике [24].

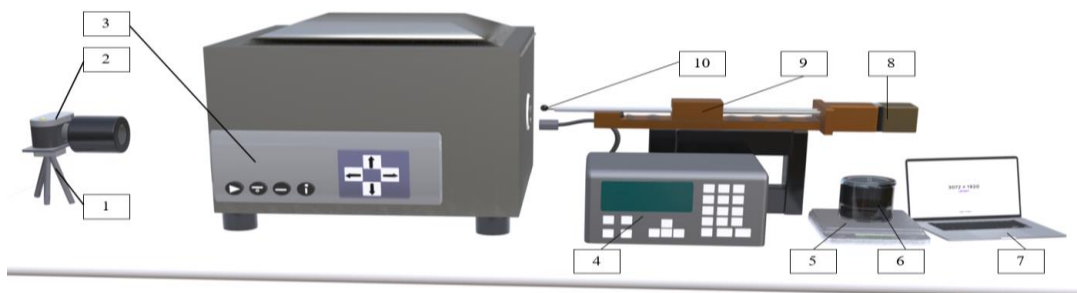


Рис. 1. Схема стенда: 1 – штатив для камеры; 2 – высокоскоростная видеокамера; 3 – муфельная печь; 4 – газоанализатор; 5 – перемешивающее устройство; 6 – исследуемый состав; 7 – компьютер; 8 – электропривод; 9 – координатный механизм; 10 – капля топлива

Fig. 1. Stand diagram: 1 – camera tripod; 2 – high-speed video camera; 3 – muffle furnace; 4 – gas analyzer; 5 – mixing device; 6 – composition under study; 7 – computer; 8 – electric drive; 9 – coordinate mechanism; 10 – drop of fuel

При помощи высокоскоростной съемки регистрировалось время задержки зажигания капли τ_d . Временем задержки зажигания считался интервал от начала нагрева образца топлива до появления пламени. Время задержки зажигания капли определялось как $\tau_d = \tau_b - \tau_n$. Где τ_b – время начала теплового воздействия, τ_n – момент времени, видимого начала горения. Время горения – это интервал от момента воспламенения газовой фазы до окончания горения. Капля водомазутной эмульсии с диаметром $2 \pm 0,3$ мм сжигалась в предварительно нагретой камере сгорания. Средний размер капель контролировался с помощью программного обеспечения Phantom Camera Control. Функция измерения позволяла определять линейный размер объектов в кадре. С помощью этой функции измерялся диаметр капли суспензии в трех проекциях, после чего определялся средний диаметр капли.

Выполнена серия из 15 экспериментов. Далее по правилу трёх сигм отсеивались грубые ошибки. Также определялась средняя квадратичная погрешность $S_x = \sum_{i=1}^n \frac{(\tau_{da} - \tau_{di})^2}{n-1}$, где τ_{da} – среднее время задержки зажигания, n – количество измерений. После чего определялся доверительный интервал (абсолютная погрешность серии измерений) $\Delta\tau_d = S_x \cdot t(\alpha, n)$, где $t(\alpha, n)$ – коэффициент Стьюдента.

В результате экспериментальных исследований установлены зависимости концентраций газообразных веществ от времени при температуре муфельной печи около 800 °С. Для этого выполнена серия из пяти экспериментов для каждого состава. После чего рассчитывались средние содержания газов (1) в течение времени горения топлива:

$$X_i = (x_i + x_{i+1}) \cdot \frac{\tau_{i+1} - \tau_i}{2}. \quad (1)$$

После этого с помощью метода трапеции (2) определялось содержание газа как:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{\tau_n - \tau_k}, \quad (2)$$

где τ_n и τ_k – время начала и конца горения. Грубые ошибки в эксперименте отсеивались по правилу 3 сигм.

Для экспериментальных исследований использован мазут марки М100. Физико-химические характеристики мазута приведены в табл. 1. Состав мазута определялся с помощью элементного анализатора vario MICRO cube в соответствии с методами, описанными в статье [25]. Образец топлива сжигали в кислороде при температуре 1100 °С. Затем полученные газы хроматографически разделяли и анализировали с помощью детектора теплопроводности. Впоследствии были определены массовые доли С, Н, N и S и пересчитаны до сухого беззольного состояния. Свойства мазута определялись в соответствии с методами, указанными в [26]. Содержание золы и воды в маслах оценивалось с использованием стандартов ISO 3405-88. Температура вспышки и температура воспламенения мазута определялась с использованием стандартов ГОСТ 10585-99. В табл. 1, 2 представлены результаты исследования.

Таблица 1. Характеристики мазута

Table 1. Fuel oil characteristics

Характеристики исследуемого мазута М100 Characteristics of the studied fuel oil M100	Численные значения Numerical values
Массовая доля механических примесей, %, не более Mass fraction of mechanical impurities, %, no more	1
Зольность, %, не более/Ash content, %, no more	0,09
Массовая доля воды/Water mass fraction, %	1,51
Массовая доля серы/Sulfur mass fraction, %	2,6
Температура вспышки/Flash point, °C	122
Температура застывания/Pour point, °C	25

Таблица 2. Компонентный состав мазута

Table 2. Fuel oil component composition

Марка/Grade	W	A	S	C	N	O+H
М-100	1,51	0,09	2,6	85,2	9,9	0,7

Для измерения вязкости использовались: ротационный вискозиметр Brookfield DV3T (диапазон измерения от 1 до $6 \cdot 10^6$ мПа·с, точность ± 1 %, воспроизводимость $\pm 0,2$ %), шпиндель SC4-18 (диапазон измерения вязкости 50–100000 мПа·с) и термостат Термех КРИО-ВТ-12-01 (рабочая жидкость – Тосол, диапазон рабочих температур от -30 до $+200$ °С, точность поддержания температуры $\pm 0,1$ °С) для поддержания температуры образца 20 и 80 °С, свойства которого измеряются за счет организации внешнего контура термостатирования для потребителя. Для измерения поверхностного натяжения использовался тензиометр Kruss K20 (диапазон измерения 1–999 мН·м, разрешение 0,01 мН·м, диапазон температур 1–130 °С). С помощью метода отрыва кольца вычисляется поверхностное натяжение по формуле: $\sigma = \frac{F_{max} - F_v}{L \cdot \cos(\theta)}$, где F_{max} – максимальное усилие, приложенное для отрыва кольца; F_v – сила гидростатического столба жидкости под кольцом; L – длина смачивания; θ – угол смачивания. Для определения поправок использовался метод Хаша–Масона. Также с помощью тензиометра определялась плотность топлив-

ной смеси. Измерение плотности основано на силе Архимеда. В табл. 3 представлены результаты реологических характеристик водомазутных топлив.

Катализаторы горения ИОН-М, Роснефть P503B3, Роснефть P502B1 – жидкие присадки для топочных и флотских мазутов. Они предназначены для повышения производительности в котлах и промышленных печах. Присадка ИОН-М имеет многокомпонентный состав, который оказывает влияние на структуру топлива и непосредственно на процесс горения. ИОН-М представляет собой особое сочетание положительных и отрицательных ионов. При этом электростатические поля оказывают структурирующее (упорядочивающее) воздействие на молекулы вещества среды (топлива), в которой он находится. Роснефть P503B3 и P502B1 – присадки, которые состоят из комплекса алифатических углеводородов, олеиновой и жирных кислот растительных масел.

В табл. 4 приведены реологические характеристики водомазутного топлива в зависимости от концентрации присадки ИОН М.

Таблица 3. Реологические характеристики исследуемых составов

Table 3. Rheological characteristics of the studied compositions

Наименование топливной смеси Fuel mixture	Температура состава Temperature of composition T_f , °С	Динамическая вязкость μ , мПа·с Dynamic viscosity μ , mPa·s	Плотность ρ , кг/м ³ Density ρ , kg/m ³	Поверхностное натяжение σ , Н/м Surface tension σ , N/m
Мазут/Fuel oil	20/80	1795/130	1015/937	0,041/0,035
Мазут/Вода – 90/10 % Fuel oil/Water – 90/10%	20/80	1543/116	1021/933	0,044/0,033
Мазут/Вода/P503B3 – 89,5/10/0,5 % Fuel oil/Water/P503B3– 89,5/10/0,5%	20/80	1505/111	1020/934	0,042/0,030
Мазут/Вода/P502B1 – 89,5/10/0,5 % Fuel oil/Water/P502B1 – 89,5/10/0,5%	20/80	1515/112	1022/934	0,044/0,031
Мазут/Вода/ИОН М – 89,5/10/0,5 % Fuel oil/Water/ION M – 89,5/10/0,5%	20/80	1493/109	1016/933	0,041/0,029

Таблица 4. Реологические характеристики водомазутного топлива в зависимости от концентрации присадки ИОН М

Table 4. Rheological characteristics of water-oil fuel depending on the capacity of the ION M additive

Концентрация присадки ИОН М, % Additive ION M concentration, %	Температура состава Temperature composition T_f , °С	Динамическая вязкость μ , мПа·с Dynamic viscosity μ , mPa·s	Плотность ρ , кг/м ³ Density ρ , kg/m ³	Поверхностное натяжение σ , Н/м Surface tension σ , N/m
0	20/80	1543/116	1021/933	0,044/0,033
0,25	20/80	1532/114	1020/933	0,044/0,032
0,5	20/80	1493/109	1016/933	0,041/0,029
1	20/80	1506/112	1018/933	0,042/0,030

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2, *а* показаны видеокадры горения капли водомазутного топлива при температуре газовой среды около 700 °С. Процесс горения можно разделить на несколько этапов. Сначала при нагреве капли выделялись летучие вещества и парафины, которые затем зажигались. В результате зажигания летучих веществ температура в зоне горения капли увеличивалась, вызывая ее диспергирование. Этот эффект обусловлен присутствием около 10 % воды в капле, которая испарялась и вызывала локальное повышение давления, что и приводило к микровзрывной фрагментации. В результате повышенного давления капля наполнялась пузырьками пара, тем самым образуя вторичные фрагменты. На следующем этапе эти вторичные фрагменты распространялись по всей камере сгорания и затем зажигались.

На рис. 2, *б* приведены кадры горения капли водомазутного топлива с добавлением присадки на основе жирных кислот растительных масел (P503B3, состав № 3). Установлено, что процесс зажигания протекал аналогично опытам с водомазутным топливом при добавлении около 10 % воды. Однако второй этап с зажиганием капель происходил иначе. При диспергировании капли водомазутного топлива с добавлением присадки на основе жирных кислот

растительных масел образованные вторичные фрагменты имели меньшие размеры относительно водомазутного топлива на 50 %. Такой эффект обусловлен тем, что при добавлении присадок к топливу вода, имеющаяся в его составе, связывается с углеводородами (снижается межфазное натяжение). Топливо становится более однородным.

На рис. 2, *в* представлены кадры горения капли водомазутного топлива при добавлении присадки на основе жирных кислот растительных масел (P503B1, состав № 4). Анализ кадров показал, что в течение второго этапа зажигания капли процесс диспергирования происходит практически мгновенно. Образуется большее количество вторичных фрагментов, в отличие от водомазутного топлива (рис. 2, *а*), на 20 %. На рис. 2, *г* представлены кадры горения капли водомазутного топлива при добавлении присадки на основе особого сочетания положительно и отрицательно заряженных ионов (ИОН М, состав № 5). Анализ кадров показал, что процесс зажигания протекал аналогично топливной композиции № 4. Однако количество вторичных фрагментов возрастало на 15 %. При этом длительность процесса горения капли увеличивалась на 10 % относительно композиции № 4.

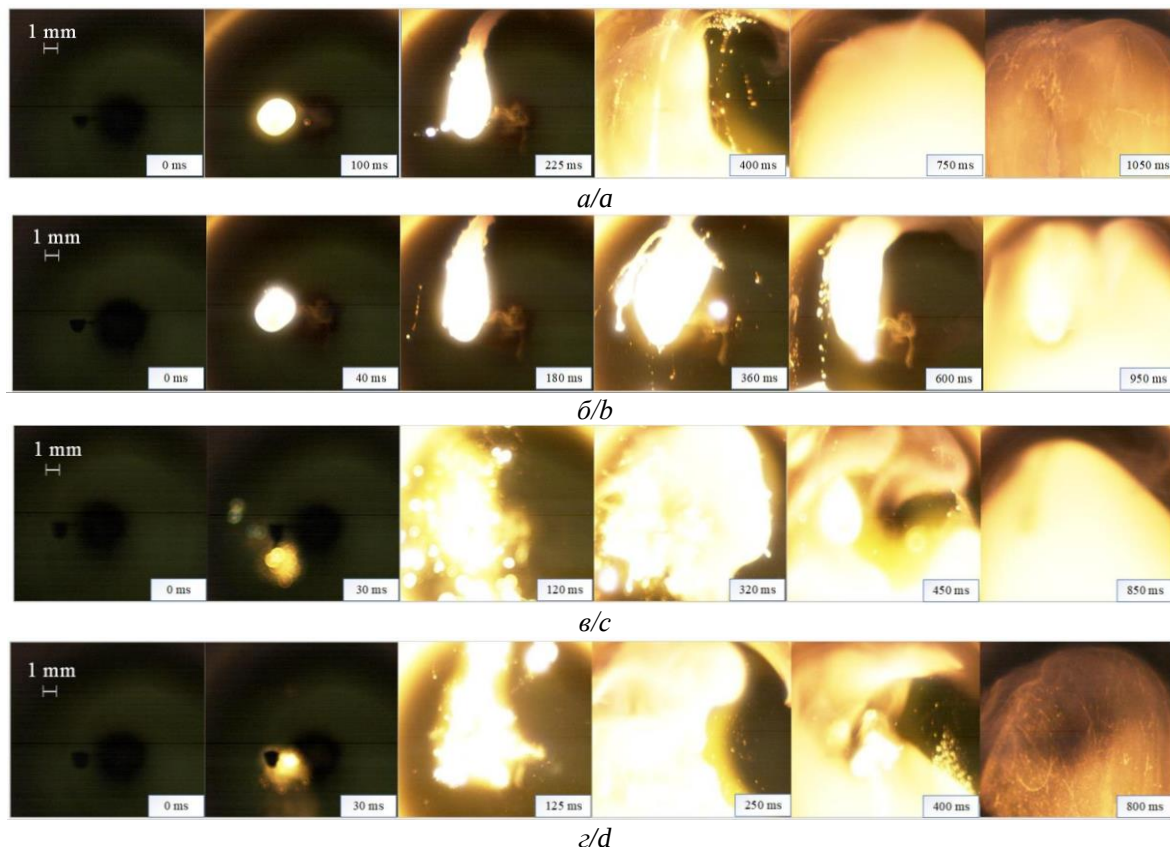


Рис. 2. Видеокадры горения капли при $T_g=700$ °С для составов: а) № 2; б) № 3; в) № 4; г) № 5
Fig. 2. Video frames of a drop burning at $T_g=700$ °C for compositions: а) no. 2; б) no. 3; в) no. 4; г) no. 5

Такой эффект связан с тем, что присадка на основе особого сочетания положительно и отрицательно заряженных ионов связывает углеводороды и снижает размер капли воды в эмульсии вследствие меньшего поверхностного натяжения. Такая присадка позволяет создавать ионные связи в эмульсии, что приводит к увеличению полноты сгорания топлива. Углеводороды при смешении с присадкой приобретают заданную ориентацию в объеме.

На рис. 3 показаны зависимости времени задержки зажигания капель водомазутных эмульсий от температуры газовой среды. Показано, что все исследуемые присадки способствуют снижению времен задержки зажигания капель. Такой эффект обусловлен тем, что присадки являются катализаторами горения. Поэтому такие присадки уменьшают пороговую энергию активации окисления топлива, что приводит к более полному выгоранию. Вследствие чего укрепляется связь в капле между водой и тяжелыми углеводородами, т. е. топливная смесь становится более однородной [27]. Благодаря такому воздействию катализаторы способствуют зажиганию топлива при более низких температурах окружающей среды. Анализ экспериментальных исследований показал, что минимальными временами задержки зажигания характеризуется состав № 5. Такой состав снижал времена задержки зажигания на 20–60 % во всем исследуемом температурном диапазоне газовой среды. Другие два состава (№ 3 и 4) позволили снизить времена задержки зажигания на 7–10 и 15–50 % соответственно.

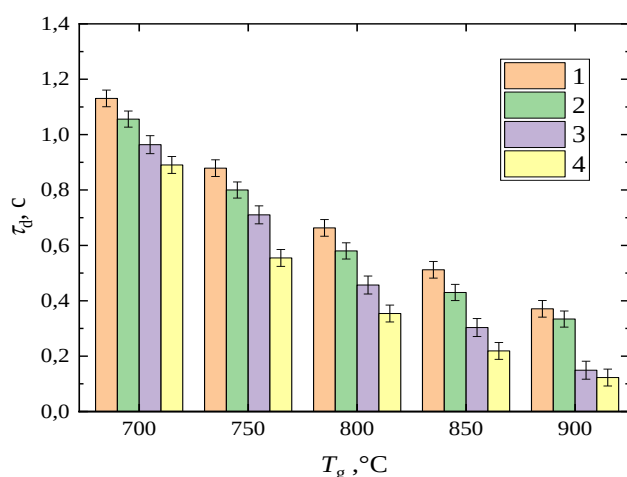


Рис. 3. Зависимости времен задержки зажигания капель исследуемых топлив от температуры газовой среды: 1 – № 2; 2 – № 3; 3 – № 4; 4 – № 5

Fig. 3. Dependence of the ignition delay time of droplets of the fuels under study on the temperature of the gas-air environment: 1 – no. 2; 2 – no. 3; 3 – no. 4; 4 – no. 5

Оптимальная работа котла может быть достигнута только в том случае, если при определении программы обработки присадками были приняты во внимание стадии предварительного сгорания и сжигания топлива. При этом присадки к мазутному топливу применяются в разных концентрациях – от 0,01 до 0,5 % [28]. Определение оптимальной концентрации присадки является ключевым аспектом повышения эффективности котла. Следующим этапом экспериментальных исследований являлось установление оптимальной концентрации присадки для снижения времени задержки зажигания. Экспериментальные исследования проведены с составом № 5, так как он позволил максимально снизить времена задержки зажигания капли. На рис. 4 представлено влияние концентрации присадки на времена задержки зажигания капли. В ходе экспериментальных исследований установлено, что минимальными временами задержки зажигания обладает водомазутное топливо с концентрацией присадки 0,5 %. При увеличении концентрации присадки до 1 % времена задержки зажигания капли возрастали на 50–60 % во всем исследуемом температурном диапазоне. Такой эффект связан тем, что при добавлении присадки изменяются реологические свойства топлива. В связи с этим вязкость, межфазное и поверхностное натяжения топливной композиции увеличиваются, что приводит к неустойчивости процесса горения [29].

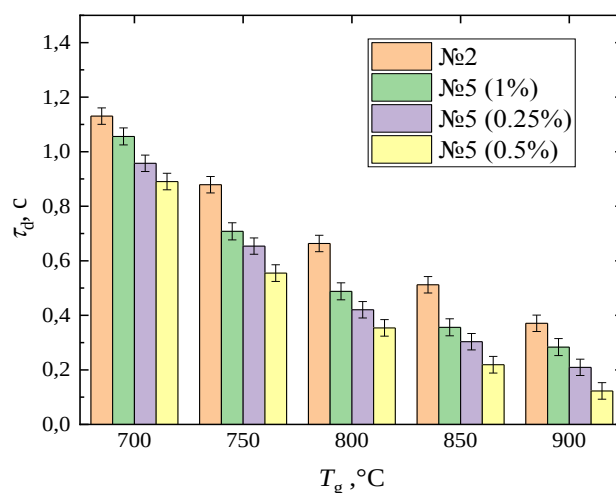


Рис. 4. Влияние концентрации присадки на времена задержки зажигания капли для состава № 5

Fig. 4. Influence of additive concentration on droplet ignition delay times for composition no. 5

На рис. 5, а представлены концентрации CO₂ при сжигании водомазутных эмульсий. Установлено, что снижение концентрации монооксида углерода осуществлялось при высоких температурах (900 °C) газовой среды.

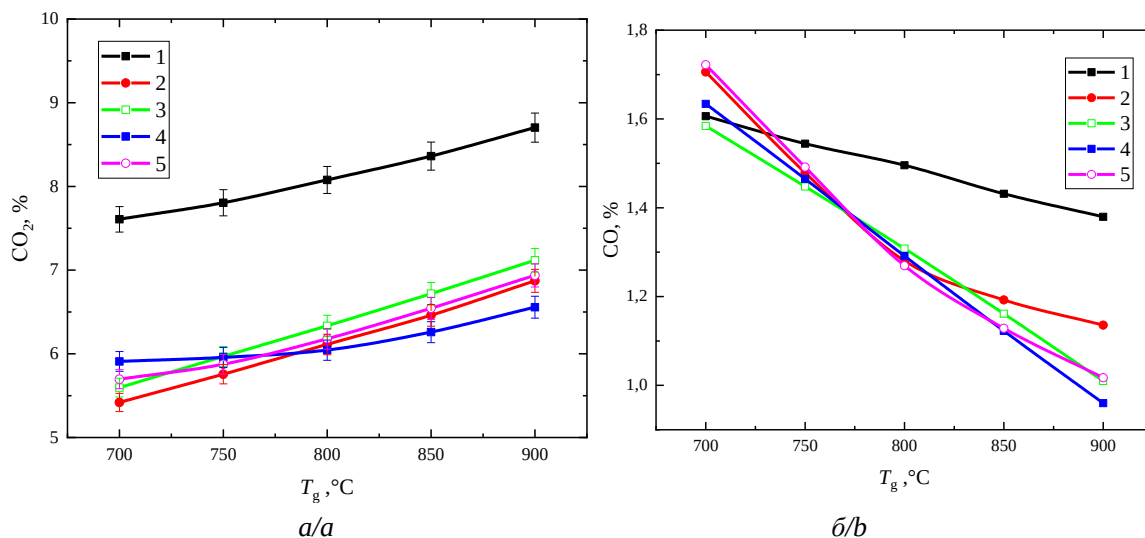


Рис. 5. Концентрации CO_2 (а) и CO (б) при варьировании температуры газовой среды: 1 – № 1; 2 – № 2; 3 – № 3; 4 – № 4; 5 – № 5

Fig. 5. CO_2 (a) and CO (b) concentrations when varying the temperature of the gas-air environment: 1 – no. 1; 2 – no. 2; 3 – no. 3; 4 – no. 4; 5 – no. 5

При таких температурах сгорание водомазутных эмульсий происходит более полно, что приводит к снижению химического недожога. Тем самым высокие температуры способствуют превращению CO в CO_2 . Анализ проведенных исследований показал, что добавление воды в мазут приводило к уменьшению концентрации оксидов углерода. Такой эффект связан тем, что при нагреве водомазутного топлива вода в каплях испаряется первой, поскольку ее объем меньше объема мазута. Это наблюдается при температурах, намного превышающих температуру кипения воды ($\sim 270^\circ C$). При испарении воды образуются пузырьки. При их взрыве капли топлива разбиваются, образуя вторичные фрагменты. Стоит отметить, что сжигание такого топлива способствует снижению температуры в камере сгорания, а также снижению скорости окислительных реакций. Размер капель водомазутного топлива, впрыскиваемого в камеру сгорания, также влияет на полноту сгорания. Добавление воды способствует дроблению капель топлива, что увеличивает площадь взаимодействия с воздухом [30].

Результаты экспериментальных исследований показали, что использование водомазутного топлива с присадками позволяет снизить выбросы CO_2 на 21,5, 24,98 и 22,86 % для составов № 3, 4, 5 по сравнению с мазутом во всем исследуемом диапазоне температур T_g . На рис. 5, б представлена зависимость содержания оксида углерода при сжигании исследуемых составов. Определено, что с ростом концентрации воды в капле уменьшается содержание CO . Установлено, что при добавлении присадок снижаются выбросы CO на 14,36, 14,16 и 17,61 % для составов № 3, 4, 5 по сравнению с мазутом во всем исследуемом диапазоне

температур газовой среды T_g . Показано, что при горении составов № 3, 4, 5 возрастает количество CO_2 на 3,6, 0,7 и 2,1 %, соответственно, относительно состава № 2 при $T_g=700-900^\circ C$. Такой эффект связан тем, что присадки являются катализаторами горения. Такие присадки усиливают реакции окисления в процессе горения и уменьшают количество крупных несгоревших капель. Также результаты показали, что при добавлении присадок снижаются выбросы CO на 4,2, 5,1 и 2,7 % для составов № 3, 4, 5 при $T_g=800^\circ C$ относительно № 2. Присадка действует как ускоритель окисления несгоревшего углерода (катализатор), тем самым увеличивается выгорание углерода в частицах.

На рис. 6, а представлены зависимости содержания NO от температуры газовой среды при горении водомазутных эмульсий при добавлении присадок. Установлено, что при добавлении присадок в водомазутное топливо выбросы NO уменьшаются на 6,7, 9,4 и 5,3 % для составов № 3, 4, 5 относительно № 1 ($T_g=700-900^\circ C$). На рис. 6, б приведена зависимость содержания SO_2 от температуры газовой среды для водомазутных эмульсий с добавлением специализированных добавок. Установлено, что при добавлении воды в мазут происходило снижение SO_2 . Это объясняется тем, что при горении водомазутного топлива выделяется водяной пар. Он реагирует с оксидами серы, образуя соли, которые выпадают в виде зольного осадка. Результаты проведенных исследований позволили установить, что при использовании составов № 3, 4, 5 уменьшаются выбросы SO_2 на 10,89, 12,13 и 13,43 %, соответственно, по сравнению с необогащенным мазутом.

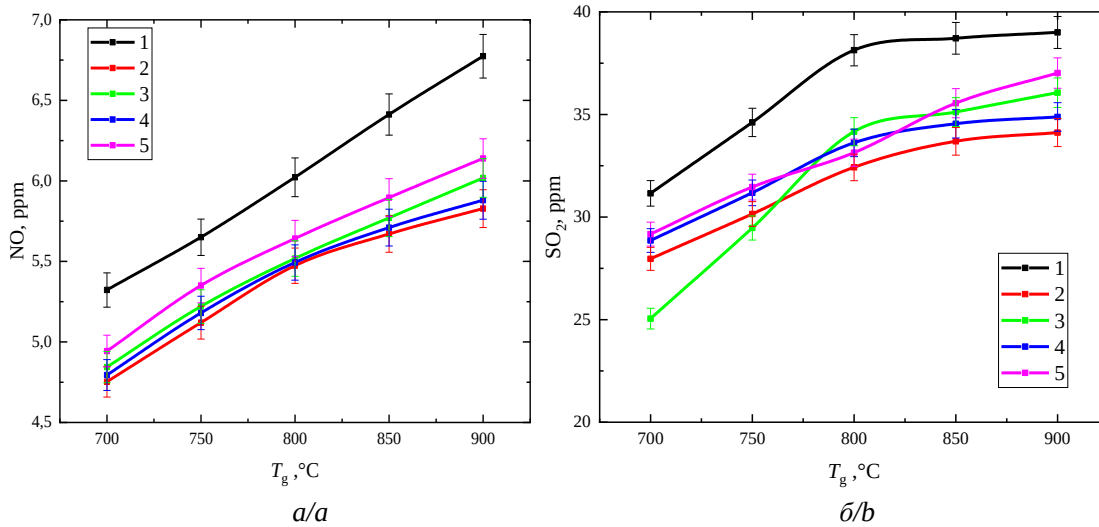


Рис. 6. Концентрации NO (а) и SO_2 (б) при варьировании температуры газовоздушной среды: 1 – № 1; 2 – № 2; 3 – № 3; 4 – № 4; 5 – № 5
Fig. 6. NO (a) and SO_2 (b) concentrations when varying the temperature of the gas-air environment: 1 – no. 1; 2 – no. 2; 3 – no. 3; 4 – no. 4; 5 – no. 5

Установлено, что использование композиций № 3, 4, 5 приводит к увеличению выбросов SO_2 на 0,6, 3,1 и 3,8 % при сопоставлении с составом № 2 во всем исследуемом температурном диапазоне. Также при добавлении присадок в водомазутное топливо выбросы NO увеличиваются на 1,9, 0,8 и 4,9 % для составов № 3, 4, 5 относительно № 2. Такой эффект связан с тем, что при добавлении присадок в топливо вода связывается с тяжелыми углеводородами. Таким образом выход летучих веществ происходит быстрее.

На рис. 7, а представлены зависимости содержания CO_2 от температуры газовоздушной среды при горении водомазутных эмульсий при варьировании концентрации присадки ИОН М. Показано,

что при варьировании присадки ИОН М в размере 0,25, 0,5, 1 % возрастает количество CO_2 на 0,9, 2,1 и 0,1 %, соответственно, относительно состава № 2 при $T_g=700\text{--}900$ °C. На рис. 7, б представлена зависимость содержания оксида углерода при варьировании концентрации присадки ИОН М. Показано, что при горении водомазутной эмульсии при варьировании присадки ИОН М в размере 0,25, 0,5, 1 % снижаются выбросы CO на 0,5, 2,7 и 1,1 %, соответственно, относительно состава № 2 при $T_g=700\text{--}900$ °C. Таким образом увеличение концентрации присадки до 1 % к водомазутному топливу оказывает незначительное влияние на антропогенные выбросы.

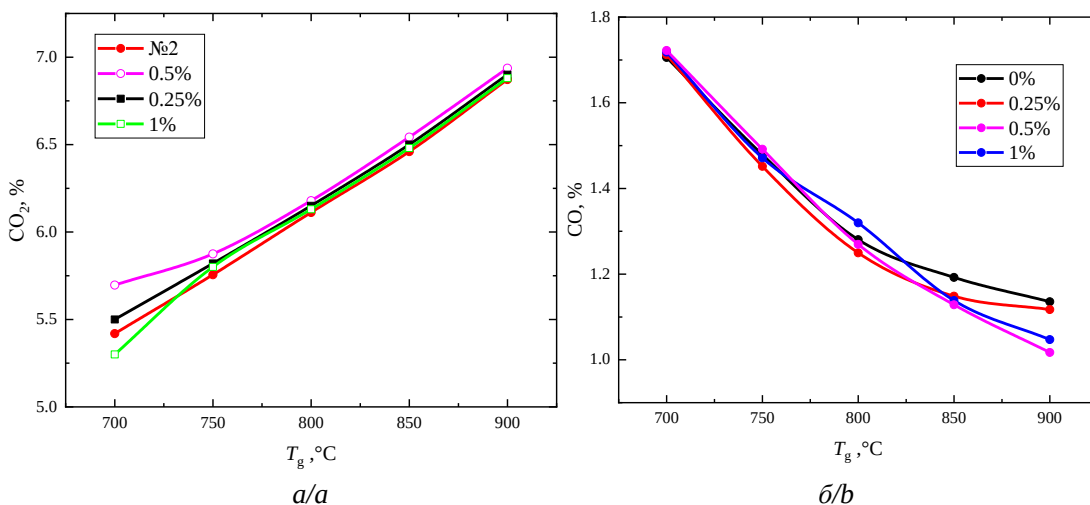


Рис. 7. Концентрации CO_2 (а) и CO (б) при варьировании концентрации присадки ИОН М
Fig. 7. CO_2 (a) and CO (b) concentrations when varying ION M additive concentration

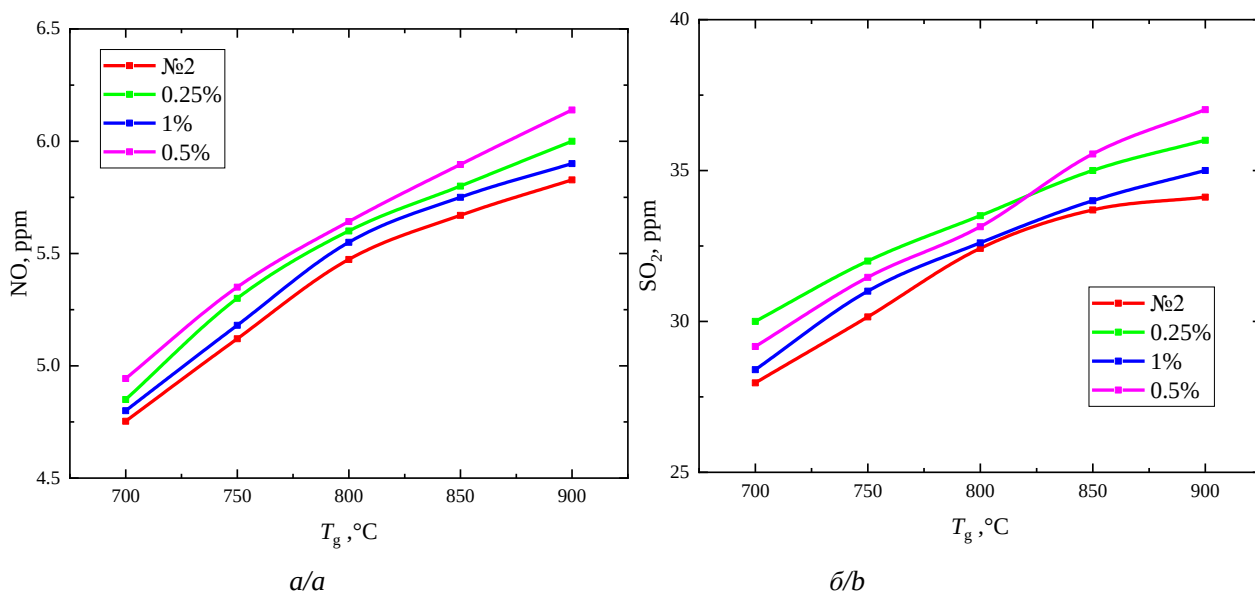


Рис. 8. Концентрации NO (а) и SO₂ (б) при варьировании концентрации присадки ИОН М
Fig. 8. NO (a) and SO₂ (b) concentrations when varying ION M additive concentration

На рис. 8, а представлены зависимости содержания NO от температуры газовоздушной среды при горении водомазутных эмульсий при варьировании присадки ИОН М. Установлено, что использование присадки ИОН М в размере 0,25, 0,5, 1 % приводит к увеличению выбросов NO на 2,6, 3,8 и 1,3 % при сопоставлении с составом № 2 во всем исследуемом температурном диапазоне ($T_g=700-900$ °C). На рис. 8, б приведена зависимость содержания SO₂ от температуры газовоздушной среды для водомазутных эмульсий при варьировании концентрации присадки ИОН М. Установлено, что при добавлении присадки ИОН М в размере 0,25, 0,5, 1 % в водомазутное топливо выбросы NO увеличиваются на 5,2, 4,9 и 1,6 % относительно № 2. Такой эффект связан с тем, что при добавлении присадок в топливо вода связывается с тяжелыми углеводородами, и тем самым выход летучих веществ происходит быстрее. Таким образом при увеличении концентрации присадки до 1 % к водомазутному топливу оказывает незначительное влияние на антропогенные выбросы.

Закключение

Результаты проведенных исследований показали, что присадка на основе особого сочетания положительно и отрицательно заряженных ионов (ИОН М) снижает времена задержки зажигания на 40–50 % во всем исследуемом температурном диапазоне. Добавление присадки на основе жирных растительных кислот (P502B3) снижала времена задержки зажигания на 10 % во всем исследуемом температурном диапазоне относительно водомазутного топлива. Добавление присадки P502B1 в водомазутное топливо позволило снизить времена задержки зажигания на 30–40 %. Определено, что в присутствии катализаторов горения вода связывается с тяжелыми углеводородами и тем самым выход летучих веществ происходит быстрее, т. е. подведенная теплота не тратится на прогрев воды в капле, а равномерно воздействует на весь объем топлива.

Проведенные исследования показали, что использование присадок при сжигании водомазутного топлива снижает концентрации CO, CO₂, NO, SO₂ на 8, 6, 10 и 13 %, соответственно, по сравнению с мазутом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Darbandi M., Fatin A., Bordbar H. Numerical study on NO_x reduction in a large-scale heavy fuel oil-fired boiler using suitable burner adjustments // *Energy*. – 2020. – Vol. 199. – P. 117371. DOI: doi.org/10.1016/j.energy.2020.117371.
2. Calculation of average molecular parameters, functional groups, and a surrogate molecule for heavy fuel oils using 1H and 13C nuclear magnetic resonance spectroscopy / A.G. Abdul Jameel, A.M. Elbaz, A.-H. Emwas, W.L. Roberts, S.M. Sarathy // *Energy & Fuels*. American Chemical Society. – 2016. – Vol. 30. – № 5. – P. 3894–3905. DOI: doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00303.
3. Goldstein H.L., Siegmund C.W. Influence of heavy fuel oil composition and boiler combustion conditions on particulate emissions // *Environ. Sci. Technol.* American Chemical Society. – 1976. – Vol. 10. – № 12. – P. 1109–1114. DOI: doi.org/10.1021/es60122a006.
4. Comparison of particle emissions from small heavy fuel oil and wood-fired boilers / O. Sippula, J. Hokkinen, H. Puustinen, P. Yli-Pirilä, J. Jokiniemi // *Atmos. Environ.* – 2009. – Vol. 43. – № 32. – P. 4855–4864. DOI: doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.07.022.

5. Incorporating scarcity into footprints reveals diverse supply chain hotspots for global fossil fuel management / Q. Zhong, Z. Zhang, H. Wang, X. Zhang // *Appl Energy*. – 2023. – Vol. 349. – P. 121692. DOI: doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121692.
6. Минзяк М.В. Противоречия в реализации новых положений конвенций МАРПОЛ и КБО в международной морской практике // *Океанский менеджмент. Общество с ограниченной ответственностью «Агентство морского права»*. – 2022. – № 4 (18). – С. 17–20.
7. Свиригин Г.А., Катин В.Д. Обоснование сжигания мазута в виде водомазутных эмульсий в паровых и водогрейных котлах и анализ схем их приготовления // *Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке*. – 2014. – Т. 1. – С. 262–267.
8. Huang H. et al. Effects of pine oil additive and pilot injection strategies on energy distribution, combustion and emissions in a diesel engine at low-load condition // *Appl. Energy*. – 2019. – Vol. 250. – P. 185–197. DOI: doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.05.028.
9. Определение и улучшение стабильности судовых высоковязких топлив / Т.Н. Митусова, Н.К. Кондрашева, М.М. Лобашова, М.А. Ершов, В.А. Рудко, М.А. Титаренко // *Химия и технология топлив и масел*. – 2017. – № 6. – С. 22–24.
10. Сжигание в энергетических котлах и промышленных печах водомазутной эмульсии с присадкой СНПХ-9777 / А.Ф. Шагеев, М.Ф. Шагеев, Т.Н. Юсупова, Г.В. Романов, Е.С. Охотникова // *Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики*. – 2009. – № 3–4. – С. 21–26.
11. Copper catalysis for particulate removal from diesel exhaust gas. Copper fuel additives in combination with copper coatings / J.P.A. Neeft, N. Kruse, A. Frennet, J.-M. Bastin // *Studies in surface science and catalysis*. – 1998. – Vol. 116. – P. 655–666. DOI: doi.org/10.1016/S0167-2991(98)80921-X
12. Щестаков Я.К., Садов А.А. Катализатор горения топлива: определение, применение и эффективность // *Молодежь и наука Учредители Уральского государственного аграрного университета*. – 2021. – № 10. – С. 45–46.
13. Монашков В.В., Ключ В.В., Потапова Ю.С. Оценка параметров взрывоопасности технологии получения присадки к топливному мазуту // *Проблемы управления рисками в техносфере*. – 2020. – № 4. – С. 105–108.
14. Киселёв И.И., Грибков А.М. Улучшение качества мазута с помощью присадок // *Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве*. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. – С. 307–310.
15. Изучение влияния депрессорных присадок на нефть и продукты ее переработки / А.Я. Дугиева, Б.А. Гайтукаева, И.А. Аушева, Р.Д. Арчакова, З.Х. Султыгова // *Технологии нефти и газа. Общество с ограниченной ответственностью ТУМА ГРУПП*. – 2014. – № 4. – С. 12–14.
16. Патров Ф.В., Вахромеев О.С. Использование водотопливной эмульсии при эксплуатации судовых ДВС // *Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия Морская техника и технология*. – 2009. – № 1. – С. 223–225.
17. Забродин А.Г., Алибеков С.Я., Забродина Н.А. Исследование характеристик топочного мазута марки М100 // *Экология и промышленность России. Общество с ограниченной ответственностью Калвис*. – 2014. – № 2. – С. 54–55.
18. Physicochemical properties of water-residual-fuel-oil emulsions / Z.A. Antonova, Yu.V. Maksimuk, V.S. Kruk, V.N. Kursevich, V.V. Fes'ko // *Chem. Technol. Fuels Oils*. – 2016. – Vol. 51. – № 6. – P. 719–727.
19. Ведрученко В.Р., Крайнов В.В., Флек Е.С. Оптимизация подготовки тяжелого жидкого топлива к сжиганию в топках котельных и других топливосжигающих установок // *Омский научный вестник*. – 2015. – № 2 (140). – С. 144–147.
20. Shlegel N.E., Strizhak P.A. Regime maps of collisions of fuel oil/water emulsion droplets with solid heated surface // *Fuel*. – 2023. – Vol. 342. – P. 127734.
21. Klimenko A., Shlegel N.E., Strizhak P.A. Breakup of colliding droplets and particles produced by heavy fuel oil pyrolysis // *Energy*. – 2023. – Vol. 283. – P. 128480.
22. Молдобаев М.Б., Самбаева Д.А., Маймеков З.К. Снижение концентрации сажи в газовой фазе на основе использования водотопливных эмульсий в котлоагрегатах типа КЕв-4-14 // *Инженер научное и периодическое издание Инженерной академии Кыргызской Республики. Инженерная академия Кыргызской Республики*. – 2015. – № 9. – С. 354–358.
23. Дементенко О.А., Кузнецов М.Г., Панков А.О. Исследование процесса приготовления жидких топливных эмульсий в конических измельчителях // *Вестник Казанского государственного аграрного университета*. – 2012. – № 4 (7). – С. 71–74.
24. Composition of a gas and ash mixture formed during the pyrolysis and combustion of coal-water slurries containing petrochemicals / V.V. Dorokhov, G.V. Kuznetsov, G.S. Nyashina, P.A. Strizhak // *Environ. Pollut.* – 2021. – Vol. 285. – P. 117390. DOI: doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117390.
25. Vershinina K.Y., Shlegel N.E., Strizhak P.A. Promising components of waste-derived slurry fuels // *J. Energy Inst.* – 2020. – Vol. 93. – № 5. – P. 2044–2054.
26. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: analysis of key aspects / D.O. Glushkov, S.V. Syrodoy, A.V. Zhakharevich, P.A. Strizhak // *Fuel Process. Technol.* – 2016. – Vol. 148. – P. 224–235.
27. Shlegel N.E., Tkachenko P.P., Strizhak P.A. Influence of viscosity, surface and interfacial tensions on the liquid droplet collisions // *Chem. Eng. Sci.* – 2020. – Vol. 220. – P. 115639.
28. Prelec Z., Mrakovčić T., Dragičević V. Performance study of fuel oil additives in real power plant operating conditions // *Fuel Process. Technol.* – 2013. – Vol. 110. – P. 176–183.
29. Зройчиков Н.А., Лысков М.Г., Прохоров В.Б., Галас И.В. Сжигание водомазутной эмульсии в паровых котлах ТЭЦ-23 ОАО Мосэнерго в сочетании с режимными и технологическими мероприятиями // *Современные природоохранные технологии в электроэнергетике*. – М.: ИД МЭИ, 2007. – С. 192–196.
30. Anthropogenic emissions in the combustion of liquid biofuel droplets / D.V. Antonov, V.V. Dorokhov, G.S. Nyashina, D.S. Romanov // *Coke Chem.* – 2022. – Vol. 65. – № 4. – P. 137–143.

Информация об авторах

Никита Евгеньевич Шлегель, кандидат технических наук, доцент лаборатории тепломассопереноса Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. nes6@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-7402-5321>

Андрей Юрьевич Клименко, магистрант лаборатории тепломассопереноса Инженерной школы энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. ayk40@tpu.ru

Поступила в редакцию: 16.01.2024

Поступила после рецензирования: 11.03.2024

Принята к публикации: 22.03.2024

REFERENCES

1. Darbandi M., Fatin A., Bordbar H. Numerical study on NO_x reduction in a large-scale heavy fuel oil-fired boiler using suitable burner adjustments. *Energy*, 2020, vol. 199, pp. 117371.
2. Abdul Jameel A.G. Calculation of average molecular parameters, functional groups, and a surrogate molecule for heavy fuel oils using ¹H and ¹³C nuclear magnetic resonance spectroscopy. *Energy & Fuels. American Chemical Society*, 2016, vol. 30, no. 5, pp. 3894–3905.
3. Goldstein H.L., Siegmund C.W. Influence of heavy fuel oil composition and boiler combustion conditions on particulate emissions. *Environ. Sci. Technol. American Chemical Society*, 1976, vol. 10, no. 12, pp. 1109–1114.
4. Sippula O. Comparison of particle emissions from small heavy fuel oil and wood-fired boilers. *Atmos. Environ.*, 2009, vol. 43, no. 32, pp. 4855–4864.
5. Zhong Q. Incorporating scarcity into footprints reveals diverse supply chain hotspots for global fossil fuel management. *Appl. Energy.*, 2023, vol. 349, pp. 121692.
6. Minzyak M.V. Contradictions in the implementation of new provisions of the MARPOL and BWC conventions in international maritime practice. *Ocean Management. Limited Liability Company "Agency of Maritime Law"*, 2022, no. 4 (18), pp. 17–20. (In Russ.)
7. Svirin G.A., Katin V.D. Justification for burning fuel oil in the form of water-fuel oil emulsions in steam and hot water boilers and analysis of their preparation schemes. *Scientific, technical and economic cooperation of Asia-Pacific countries in the XXI century*, 2014, vol. 1, pp. 262–267. (In Russ.)
8. Huang H. Effects of pine oil additive and pilot injection strategies on energy distribution, combustion and emissions in a diesel engine at low-load condition. *Appl. Energy*, 2019, vol. 250, pp. 185–197.
9. Mitusova T.N., Kondrasheva N.K., Lobashova M.M., Ershov M.A., Rudko V.A., Titarenko M.A. Determination and improvement of the stability of high-viscosity marine fuels. *Chemistry and technology of fuels and oils*, 2017, no. 6, pp. 22–24. (In Russ.)
10. Shageev A.F., Shageev M.F., Yusupova T.N., Romanov G.V., Okhotnikova E.S. Combustion of water-fuel oil emulsion with the additive SNPKH-9777 in power boilers and industrial furnaces. *News of higher educational institutions. Problems of energy*, 2009, no. 3–4, pp. 21–26. (In Russ.)
11. Neeft J.P.A. Copper catalysis for particulate removal from diesel exhaust gas. Copper fuel additives in combination with copper coatings. *Catalysis and Automotive Pollution Control IV*. Eds. N. Kruse, A. Frennet, J.-M. Bastin. Delf, Elsevier, 1998. Vol. 116, pp. 655–666.
12. Shshetakov Y.K., Sadov A.A. Fuel combustion catalyst: definition, application and efficiency. *Youth and science founders of the ural state agrarian university*, 2021, no. 10, pp. 45–46. (In Russ.)
13. Monashkov V.V., Klyuy V.V., Potapova Yu.S. Assessment of explosion hazard parameters of the technology for producing fuel oil additives. *Problems of risk management in the technosphere*, 2020, no. 4, pp. 105–108. (In Russ.)
14. Kiselev I.I., Gribkov A.M. Improving the quality of fuel oil using additives. *Instrument making and automated electric drive in the fuel and energy complex and housing and communal services*. Kazan, Kazan State Energy University, 2022. pp. 307–310. (In Russ.)
15. Dugieva A.Ya., Gaitukaeva B.A., Ausheva I.A., Archakova R.D., Sulytsova Z.Kh. Study of the influence of depressant additives on oil and its products. *Oil and gas technologies*, 2014, no. 4, pp. 12–14. (In Russ.)
16. Patrov F.V., Vakhromeev O.S. The use of water-fuel emulsion in the operation of marine internal combustion engines. *Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series Marine equipment and technology*, 2009, no. 1, pp. 223–225. (In Russ.)
17. Zabrodin A.G., Alibekov S.Ya., Zabrodina N.A. Study of the characteristics of fuel oil grade M100. *Ecology and industry of Russia*, 2014, no. 2, pp. 54–55. (In Russ.)
18. Antonova Z.A., Maksimuk V., Kryuk V.S., Kursevich V.N., Fes'ko V.V. Physicochemical properties of water-residual-fuel-oil emulsions. *Chem. Technol. Fuels Oils*, 2016, vol. 51, no. 6, pp. 719–727.
19. Vedruchenko V.R., Krainov V.V., Fleck E.S. Optimization of the preparation of heavy liquid fuel for combustion in the furnaces of boiler houses and other fuel-burning installations. *Omsk Scientific Bulletin*, 2015, no. 2 (140), pp. 144–147. (In Russ.)
20. Shlegel N.E., Strizhak P.A. Regime maps of collisions of fuel oil/water emulsion droplets with solid heated surface. *Fuel*, 2023, vol. 342, pp. 127734.
21. Klimenko A., Shlegel N.E., Strizhak P.A. Breakup of colliding droplets and particles produced by heavy fuel oil pyrolysis. *Energy*, 2023, vol. 283, pp. 128480.

22. Moldobaev M.B., Sambaeva D.A., Maymekov Z.K. Reducing the concentration of soot in the gas phase based on the use of water-fuel emulsions in boiler units of the Kev-4-14 type. *Engineer, scientific and periodical publication of the Engineering Academy of the Kyrgyz Republic*, 2015, no. 9, pp. 354–358. (In Russ.)
23. Dementienko O.A., Kuznetsov M.G., Pankov A.O. Study of the process of preparing liquid fuel emulsions in conical grinders. *Bulletin of the Kazan State Agrarian University*, 2012, vol. 7, no. 4, pp. 71–74. (In Russ.)
24. Dorokhov V.V., Kuznetsov G.V., Nyashina G.S., Strizhak P.A. Composition of a gas and ash mixture formed during the pyrolysis and combustion of coal-water slurries containing petrochemicals. *Environ. Pollut.*, 2021, vol. 285, pp. 117390.
25. Vershinina K.Y., Shlegel N.E., Strizhak P.A. Promising components of waste-derived slurry fuels. *J. Energy Inst.*, 2020, vol. 93, no 5, pp. 2044–2054.
26. Glushkov D.O., Syrodoy S.V., Zhakharevich A.V., Strizhak P.A. Ignition of promising coal-water slurry containing petrochemicals: analysis of key aspects. *Fuel Process. Technol.*, 2016, vol. 148, pp. 224–235.
27. Shlegel N.E., Tkachenko P.P., Strizhak P.A. Influence of viscosity, surface and interfacial tensions on the liquid droplet collisions. *Chem. Eng. Sci.*, 2020, vol. 220, pp. 115639.
28. Prelec Z., Mrakovčić T., Dragičević V. Performance study of fuel oil additives in real power plant operating conditions. *Fuel Process. Technol.*, 2013, vol. 110, pp. 176–183.
29. Zroychikov N.A., Lyskov M.G., Prokhorov V.B., Galas, I.V. Combustion of water-oil emulsion in steam boilers of TPP-23 of Mosenergo OJSC in combination with regime and technological measures. *Modern environmental technologies in the electric power industry*. Moskva, Publishing House of MEI., 2007. pp. 192–196. (In Russ.)
30. Antonov D.V., Dorohov V.V., Nyashina G.S., Romanov D.S. Anthropogenic emissions in the combustion of liquid biofuel droplets. *Coke Chem.*, 2022, vol. 65, no. 4, pp. 137–143.

Information about the authors

Nikita E. Shlegel, Cand. Sc., National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. nik.shlegel.ask@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-7402-5321>

Andrey Yu. Klimenko, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. ayk40@tpu.ru

Received: 16.01.2024

Revised: 11.03.2024

Accepted: 22.03.2024