

Вторичное измельчение капель водомазутных эмульсий

Никита Евгеньевич Шлегель [✉], Андрей Клименко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск,
Россия
Контакт для переписки: nik.shlegel.ask@gmail.com [✉]

Аннотация. Процесс, когда при подаче мазутного топлива в точную камеру происходит его распыление за счет форсуночных и спринклерных устройств, называют первичным измельчением капель. Нередко первичное измельчение недостаточно эффективно, поскольку размеры капель топлива в камере сгорания зачастую достигают нескольких миллиметров, что увеличивает недожог и приводит к неравномерному выгоранию. Поэтому целесообразно применять вторичное измельчение капель водомазутного топлива, которое позволяет снизить средний размер капель в факеле распыла топлива в несколько раз. На первом этапе вторичного измельчения капель реализуются соударения их между собой в струе, после чего образованные капли подвергаются соударениям со стенками теплового оборудования. На следующем этапе происходит соударение капель с твердыми частицами. Твердые частицы образуются на периферии факела распыла за счет пиролиза капель при недостатке окислителя. На заключительном этапе вторичного измельчения образованные вторичные фрагменты подвергаются интенсивному нагреву в камере сгорания, что позволяет реализовать микровзрывное измельчение. Настоящее исследование направлено на изучение характеристик вторичного измельчения капель водомазутного топлива с добавлением специализированных присадок. Результаты проведенных исследований показали, что применение присадки на основе особого сочетания положительно и отрицательно заряженных ионов позволяет снизить размеры капель топлива на 25%. Также установлено, что благодаря такой присадке в несколько раз увеличиваются значения отношения площадей свободных поверхностей капель при комбинации всех режимов вторичного измельчения.

Ключевые слова: водомазутное топливо, присадки, распыление, вторичное измельчение капель, режимы соударения, пиролиз капель, микровзрывной распад

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 22-79-00197, <https://rscf.ru/project/22-79-00197/>).

Цитирование: Шлегель Н. Е., Клименко А. 2024. Вторичное измельчение капель водомазутных эмульсий // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 10. № 1 (37). С. 19–40. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-1-19-40>

Поступила 26.01.2024; одобрена 18.02.2024; принята 22.03.2024

Secondary crushing of droplets of water-oil emulsions

Nikita E. Shlegel✉, Andrey Klimenko

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
Corresponding author: nik.shlegel.ask@gmail.com✉

Abstract. When fuel oil is supplied to an accurate chamber, its spraying process takes place due to injectors and sprinkler devices. This process is called primary droplet crushing. It is often not enough to burn fuel efficiently. Since the size of fuel droplets in the combustion chamber often reaches several millimeters, which increases underburning and leads to uneven burnout. In such cases, it is advisable to use secondary crushing of water-oil fuel droplets. Secondary crushing of droplets reduces the average size of droplets in the fuel spray torch by several times. At the first stage of secondary crushing of droplets, their collisions with each other in the jet are realized, after which the formed droplets are subjected to collisions with the walls of thermal equipment. At the next stage, pyrolysis of such droplets occurs at the periphery of the jet, which leads to the formation of solid particles and subsequent collisions of droplets of water-oil fuels with them. At the final stage, the formed secondary fragments are subjected to intense heating in the combustion chamber, which allows for micro-explosive grinding. The present study is aimed at studying the characteristics of secondary crushing of water-oil fuel droplets with the addition of specialized additives. The results of the conducted studies have shown that the use of an additive based on a special combination of positively and negatively charged ions reduces the size of fuel droplets by 25%. It has been found that when using such an additive, the ratio of the free surface areas of droplets increases several times with a combination of all secondary grinding modes.

Keywords: water-oil fuel, additives, spraying, secondary crushing of droplets, collision modes, pyrolysis of droplets, micro-explosive decay

Acknowledgements: the research was supported by the Russian Science Foundation (grant No. 22-79-00197, <https://rscf.ru/en/project/22-79-00197/>).

Citation: Shlegel, N. E., & Klimenko, A. (2024). Secondary crushing of droplets of water-oil emulsions. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(1), 19–40. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-1-19-40>

Received Jan. 26, 2024; Reviewed Feb. 18, 2024; Accepted Mar. 22, 2024

Введение

Благодаря своей относительной дешевизне и высокой теплотворной способности (около 9,5–9,7 тыс. ккал) наравне с дизельным топливом и бензином, мазутное топливо часто используется в паровых и водогрейных котлах, судовых и автомобильных двигателях, а также в процессах производства цемента и стали [Тао и др., 2013]. Однако при его сжигании выделяется большое количество антропогенных выбросов, таких как CO_2 , NO_x , SO_x и др. [Zgouichikov и др., 2020]. Эти выбросы не только загрязняют окружающую среду, но и могут конденсироваться в виде серной кислоты на поверхностях нагрева в трактах и отводах дымовых газов из котла [Kalpokaite-Dichkuvene, Stravinskas, 2006].

С каждым годом от сжигания мазута количество выбросов CO_2 увеличивается на 2–3%. В настоящее время Международной морской организацией (International Maritime Organization, IMO) разработана стратегия в отношении выбросов парниковых газов [Bodansky, 2018]. Она направлена на снижение углеродоемкости судоходного сектора до 40% к 2030 г. и до 70% к 2050 г. по сравнению с 2008 г. [Gattuso и др., 2015]. Мировое научное сообщество в настоящее время занимается исследованиями, направленными на снижение антропогенных выбросов и улучшение характеристик горения мазута путем добавления к нему присадок.

Процесс, когда при подаче мазута в точную камеру реализуется его распыление с помощью форсуночных устройств [Achebe и др., 2020], называют первичным измельчением капель [Chaussonnet и др., 2020]. Для сжигания мазута с минимальным недожогом первичного измельчения обычно недостаточно, поэтому, как правило, применяют вторичное измельчение капель топлива [Kicherer и др., 1994], для чего используются различные методы [Shadrin и др., 2021], такие как дробление капель жидкости за счет столкновения между собой [Solomatin и др., 2019], с твердой стенкой [Lv и др., 2023] или твердыми частицами [Islamova и др., 2022], микровзрывное измельчение [Chen и др., 2023]. Снижение размера капли мазутного топлива приводит к уменьшению антропогенных выбросов и повышению полноты сгорания, а также к сокращению времени задержки зажигания [Antonov и др., 2020]. Как следствие, снижение размера капель в факеле распыла мазутного топлива позволяет формировать более равномерную топливно-воздушную смесь.

Присадки изменяют структуру и реологические свойства топлива: связывают воду с тяжелыми углеводородами, тем самым уменьшая вязкость, межфазное и поверхностное натяжение топлива [Shlegel и др., 2020], снижают энергию активации реакций окисления, происходящих в топке. Чаще всего в качестве присадок используют катализаторы горения, улучшающие процесс горения за счет уменьшения длины факела и повышения температуры в его ядре, что приводит к увеличению скорости теплопередачи за счет повышения доли тепла, передаваемого излучением [Zhu и др., 2012; Zhang и др., 2023].

Для получения более мелких капель при распылении эмульсии используют эмульгаторы. Самыми распространенными эмульгаторами являются поверхностно-активные вещества (ПАВ), в том числе кальциевые, магниевые, алюминиевые соли высших жирных кислот, различные смолы, натуральный каучук, декстрин, синтетические полимеры [Promtov, Pigarev, 2016]. В настоящее время в качестве эмульгаторов широко используются ПАВ на основе олеиновой кислоты и ее солей, продукты синтеза оксида этилена и сульфирования жирных спиртов [Jin и др., 2022].

На данный момент существует большое количество присадок, способных изменять химические свойства мазутного топлива, что затрудняет выбор наиболее целесообразных из них. Цель настоящего исследования — определение оптимального состава водомазутного топлива для улучшения характеристик вторичного измельчения его капель.

Материалы и методы

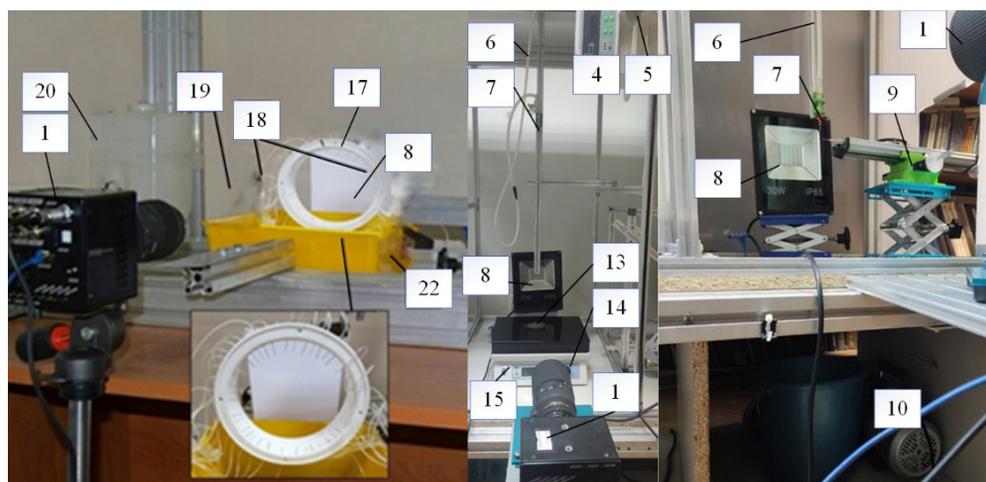
Распыление жидкого топлива позволяет увеличить площадь поверхности теплообмена и ускорить физико-химические процессы [Likhanov, Lopatin, 2020]. Особенно актуальным является интенсификация последних в теплотехнических установках. Для этого развиваются технологии вторичного измельчения на основе взаимодействия капель топливных эмульсий между собой, с нагретой стенкой теплового оборудования, с твердыми частицами, созданными путем пиролиза капель в факеле распыла, и микровзрывной фрагментации. При комбинировании всех четырех схем вторичного измельчения можно увеличить площадь поверхности жидкости в 2–100 раз. Существенный рост этой площади наблюдается на четвертой стадии — при микровзрывном измельчении [Krotova и др., 2022]. За счет микровзрывов образуются очаги турбулентных пульсаций и возрастает число вторичных капель, что дает возможность увеличить объем пламенной зоны и более плавно прогреть топку. Из-за роста площади поверхности излучения повышается средняя температура в топочной камере, в результате чего увеличивается светимость факела [Катин и др., 2020].

Для экспериментальных исследований по изучению процессов вторичного измельчения капель водомазутных эмульсий использовался стенд, внешний вид и схема которого приведены на рис. 1. Перед проведением опытов исходный состав (2) разогревался до 80–90 °С. При помощи тепловизора Testo 885 (диапазон измеряемых температур от 30 до 1 200 °С, погрешность ± 2 °С) регистрировалась температура

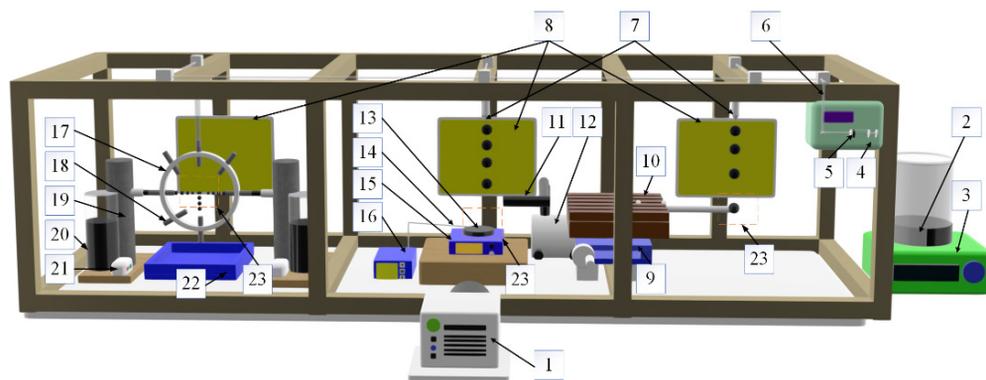
капли (T_a). Приготовление эмульсии происходило при помощи магнитного перемешивающего устройства (3) в течение 15–20 минут. Подготовленное топливо набиралось в шприц (5), который устанавливался в шприцевой насос (4) Sino MDT SN-50F6. Для варьирования размеров водомазутных капель использовались сменные сопла (7) G21, G25, G27, G30. В качестве подложки использовалась стальная полированная пластина (13). Соударение с такой поверхностью соответствует измельчению капель при контакте со стенками теплового оборудования. При помощи электронагревателя (15) пластина нагревалась до необходимых температур (T_s от 20 до 500 °С). Температура пластины регистрировалась при помощи термопары типа К (14). Перед проведением эксперимента с подложки удалялись остатки жидкости от опытов с предыдущими каплями с помощью воздушного компрессора (12). Для удержания твердых частиц мазута применялся вакуумный насос (10) «Мегеон 98045» (предельный вакуум 0,3 Па). С помощью прецизионного стола (9), позволяющего изменять координаты твердой частицы, осуществлялось расположение частицы в зоне соударения (23). В камере пиролиза формировались твердые частицы [Klimenko и др., 2023], которые образовывались в факеле распыла мазутного топлива на его периферии. В результате пиролиза из приповерхностных слоев капли выходили легкие летучие вещества и парафины, и капля переходила в агрегатное состояние частицы. Для исследования взаимодействия капель между собой применялась система топливоподачи. Система включала емкость для сбора капель (22), насосы погружного типа (20) с регулируемой производительностью (от 0,2 до 1,6 мм³/мин), сменные сопла (18) для варьирования размеров капель в диапазоне от 0,3 до 1,5 мм, кольцевой держатель (17). Для варьирования угла атаки (α_i) в диапазоне от 0 до 90° менялось расположение в кольцевого держателя (17). Стоит отметить, что скорости движения капель жидкости изменялись посредством регулирования производительности насоса (U_{d1} , U_{d2}) с помощью регулятора (21).

Для регистрации взаимодействия (23) капель водомазутного топлива использовалась высокоскоростная видеокамера (1) Phantom Miro C110 (частота регистрации от 3 000 до 100 000 кадров в секунду). Съемка выполнялась при разрешении 1 280 × 1 024 пикселей и 5 000 кадров в секунду с межкадровой задержкой 1 / 10 000. Видеокамера использовалась совместно с объективом Sigma 105 mm f/2.8 EX DG OS HSM Macro Nikon F. Область регистрации соударения капель для каждого эксперимента настраивалась так, чтобы можно было детально проанализировать процесс столкновения капель. Для подсветки области регистрации устанавливался прожектор (8). Для создания однородного светового потока перед прожектором размещался матовый рассеиватель Arlight.

При помощи высокоскоростной съемки регистрировались следующие параметры (рис. 2): скорость движения (U_d) и радиус капли (R_d), радиус частицы (R_p), расстояние между центрами масс частицы и капли (b) и угол атаки (α_i). По полученным параметрам рассчитывались безразмерные числа, такие как число Вебера ($We = (2 \cdot R_d \cdot U_{d2})/\sigma$) и линейный параметр взаимодействия ($B = b/(R_{d1} + R_{d2})$), учитывающий центричность удара и расстояние между центрами масс капель (b). Также измерялись радиусы вторичных фрагментов (r_{dn}) и их количество (N).



а



б

Рис. 1. Внешний вид (а) и схема станда (б): 1 — высокоскоростная видеокамера; 2 — исходный состав; 3 — магнитное перемешивающее устройство; 4 — шприцевой насос; 5 — шприц с топливом; 6 — канал подачи топлива; 7 — сменные сопла; 8 — прожектор; 9 — координатный механизм; 10 — вакуумный насос; 11 — канал подачи воздуха; 12 — компрессор; 13 — подложка; 14 — термопара; 15 — нагреватель подложки; 16 — измеритель температуры; 17 — кольцо для установки сопел; 18 — сопла; 19 — насосы подачи воды; 20 — резервуары с топливом; 21 — регулятор; 22 — емкость для сбора жидкости; 23 — область регистрации

Fig. 1. Appearance (a) and scheme of the stand (b): 1 — high-speed video camera; 2 — initial composition; 3 — magnetic grinding device; 4 — syringe pump; 5 — syringe with fuel; 6 — fuel supply channel; 7 — replaceable nozzles; 8 — spotlight; 9 — coordinate mechanical; 10 — vacuum pump; 11 — air supply channel; 12 — compressor; 13 — substrate; 14 — thermocouple; 15 — substrate heater; 16 — temperature meter; 17 — ring for installing nozzles; 18 — nozzles; 19 — water supply pumps; 20 — tanks with fuel; 21 — regulator; 22 — container for collecting liquid; 23 — registration of the region

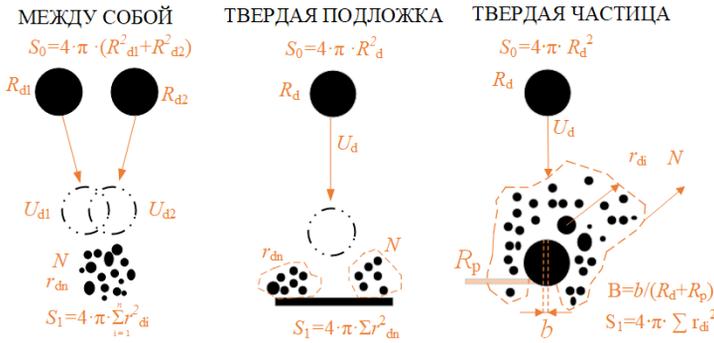


Рис. 2. Регистрация основных параметров вторичного измельчения капель при соударениях

Fig. 2. Registration of the main parameters of a secondary microelement during collisions

Далее рассчитывались отношения площадей свободных поверхностей. Площади свободных поверхностей исходных и вторичных капель рассчитывались с помощью выражения [Klimenko и др., 2023; Shlegel, Strizhak, 2023]:

$$S = 4 \cdot \pi \cdot R^2. \quad (1)$$

После расчетов параметров определялась средняя квадратичная погрешность:

$$^n S = (\sum_{i=1}^n (R_{av} - R_i)^2)^{0,5} / (n - 1), \quad (2)$$

где R_{av} — средний радиус капли, n — количество измерений.

Затем согласно правилу трех сигм отсеивались грубые ошибки. Также находилась среднеквадратичная погрешность серии измерений:

$$^n S_x = ^n S / n^{0,5}, \quad (3)$$

после чего определялся доверительный интервал (абсолютная погрешность серии измерений) по формуле:

$$\Delta R_d = ^n S_x \cdot t(\alpha, n), \quad (4)$$

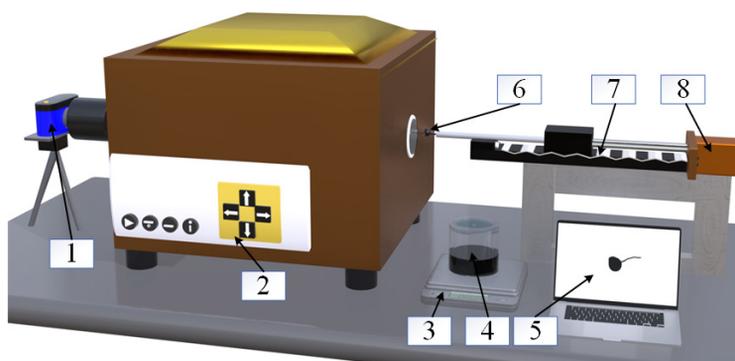
где $t(\alpha, n)$ — коэффициент Стьюдента.

Систематическая погрешность измерения размеров капель, углов атаки и скоростей движения капель составила 1,8, 2,1 и 3,2% соответственно.

На рис. 3 представлена схема стенда, использованного для исследования интегральных характеристик микровзрывной фрагментации капель. Приготовление смеси происходило при помощи магнитного перемешивающего устройства (3) в течение 15–20 минут. Эксперименты проводились при разрешении 512×512 пикселей и 2 000 кадров секунду с межкадровой задержкой $1 / 10\,000$. С помощью электропривода (8) запускался координатный механизм (7), который помещал каплю в трубчатую муфельную печь (6). Координатный механизм (7) соединялся с компьютером (5), который отслеживал положение капли топлива. С помощью программы регулировалось нахождение капли в трубчатой муфельной печи.



а



б

Рис. 3. Внешний вид (а) и схема станда (б) для изучения микровзрывной фрагментации капель: 1 — видеокамера; 2 — трубчатая печь; 3 — магнитное перемешивающее устройство; 4 — исследуемый состав; 5 — компьютер; 6 — капля; 7 — координатный механизм; 8 — электропривод

Fig. 3. Appearance (a) and scheme of the stand (b) for studying micro-explosive fragmentation of droplets: 1 — video camera; 2 — tubular furnace; 3 — magnetic stirring device; 4 — composition under study; 5 — computer; 6 — drop; 7 — coordinate mechanism; 8 — electric drive

Для каждого состава проводилась серия из 10–15 экспериментов, чтобы минимизировать случайную погрешность регистрируемых параметров. Систематическая погрешность при определении r_d составила 0,025 мм. Для проведения экспериментальных исследований использовались четыре состава, три из которых — с катализаторами горения «P502B1», «P503B3» («Роснефть») и «ИОН-М». Реологические характеристики составов представлены в таблице 1. Для измерения вязкости применялся ротационный вискозиметр Brookfield DV3T (диапазон измерения от 1 до $6 \cdot 10^6$ мПа · с, точность $\pm 1\%$), шпиндель SC4-18 (диапазон измерения вязкости от 50 до 100 000 мПа · с) и термостат «Термэкс КРИО-ВТ-12-1» (диапазон рабочих температур от -30 до $+200$ °С). Для измерения поверхностного натяжения применялся тензиометр Krüss К6 (диапазон измерения от 1 до 90 мН · м, диапазон температуры от 1 до 130 °С). С помощью тензиометра определялась плотность топливной смеси.

Таблица 1. Реологические характеристики исследованных составов при разной температуре (T_p)

Table 1. Rheological characteristics of the studied compositions at different temperatures (T_p)

№	Состав топливной смеси	Динамическая вязкость (μ), МПа · с		Плотность (ρ), кг/м ³		Поверхностное натяжение (σ), Н/м	
		20 °С	80 °С	20 °С	80 °С	20 °С	80 °С
1	Мазут	1 795	130	1 015	937	0,041	0,035
2	Мазут 90% + вода 10%	1 543	116	1 021	933	0,044	0,033
3	Мазут 89,5% + вода 10% + «Р503В3» 0,5%	1 505	111	1 020	934	0,042	0,030
4	Мазут 89,5% + вода 10% + «Р502В1» 0,5%	1 515	112	1 022	934	0,044	0,031
5	Мазут 89,5% + вода 10% + «ИОН-М» 0,5%	1 493	109	1 016	933	0,041	0,029

Результаты и обсуждение

Режимы соударения капель водомазутных эмульсий между собой

На рис. 4 приведены видеокadres экспериментальных исследований по изучению характеристик соударения капель водомазутных эмульсий между собой. Анализ экспериментальных данных позволил выделить типичные режимы взаимодействия капель: отскок, агломерацию, дробление. При режиме отскока между каплями водомазутных эмульсий появлялась тонкая воздушная пленка (т. е. буферная зона повышенного давления), не позволяющая каплям коагулировать, вследствие чего действия межмолекулярных сил было недостаточно для слияния и перемешивания капель, а сил инерции — для преодоления зоны повышенного давления. Реализовывался режим отскока при небольших скоростях движения (до 2 м/с) и размерах капель (до 0,5 мм). При добавлении присадок в водомазутное топливо критический порог скорости движения для реализации режима отскока снижался до 1,5 м/с. Капли мазутного топлива при аналогичных скоростях начинали агломерировать из-за меньшего преобладания поверхностных сил над инерционными. Режим агломерации представлял из себя слияние водомазутных капель после столкновения между собой, вследствие чего увеличивалась результирующая скорость взаимодействия под влиянием гравитационных сил, т. к. возрастала масса образованной капли. Как правило, режим агломерации наблюдался при размерах капель от 0,5 до 1 мм и при скоростях движения капель до 3 м/с. При таких режимах соударения вторичные фрагменты не образовывались. При увеличении скоростей движения капель водомазутных эмульсий до 5 м/с наблюдался режим дробления. После соударения капель между собой образовывался тонкий шлейф,

который включал капли размерами менее 0,1 мм. При этом режиме также образовывались несколько крупных фрагментов с радиусами около 0,5 мм и множество мелких с радиусами от 0,05 до 0,1 мм. За счет равномерного распределения воды внутри топлива процесс дробления при добавлении присадок происходил более интенсивно, образовывалось большее количество вторичных фрагментов.

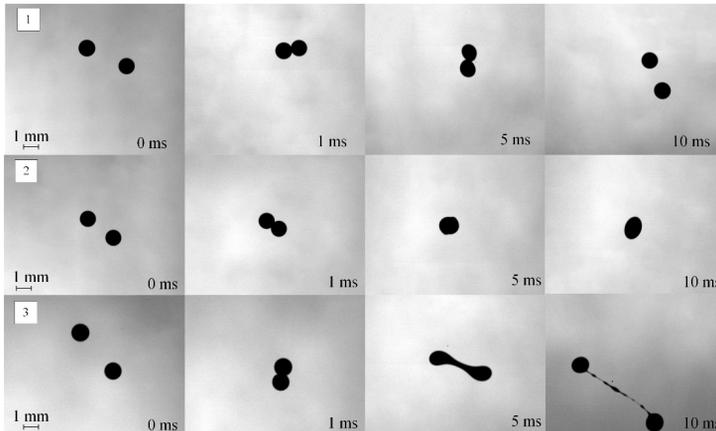


Рис. 4. Типичные видеокadres столкновения капель водомазутных эмульсий между собой: 1 — отскок; 2 — агломерация; 3 — дробление

Fig. 4. Typical video frames of water-oil fuel droplets colliding with each other: 1 — bounce; 2 — agglomeration; 3 — separation

На рис. 5а представлены карты режимов взаимодействия капель водомазутных эмульсий между собой. Установлено, что для водомазутного топлива режим дробления происходит при значениях We более 150, а граница перехода режима дробления смещается в сторону меньших значений We на 10–20%. При добавлении составов № 3–5 граница перехода режима агломерации смещается в сторону меньших значений We в среднем на 10%. Такие эффекты являются ключевыми для реализации устойчивых процессов горения топлива. Р. А. Валиуллиным с соавторами [Valiullin и др., 2020] обнаружено, что снижение размеров капель топливных композиций с 1,5 до 0,5 мм способствует сокращению времени задержки зажигания на 10–20% и полноты выгорания на 20%. На рис. 5б представлена зависимость отношения площадей свободных поверхностей от значения We . Видно, что при добавлении специализированных присадок в водомазутное топливо увеличиваются отношения площадей свободных поверхностей на 5–10%.

Как правило, концентрированные эмульсии являются неустойчивыми системами. Термодинамическая стабильность эмульсий может быть достигнута только при снижении поверхностного натяжения на границе раздела фаз и при выполнении ряда других требований. Один из способов устойчивости и стабильности топлива является введение присадок. Для эффективной работы теплотехнического оборудования режим дробления является ключевым и способствует увеличению полноты выгорания топлива, снижению времени задержки зажигания и антропогенных выбросов.

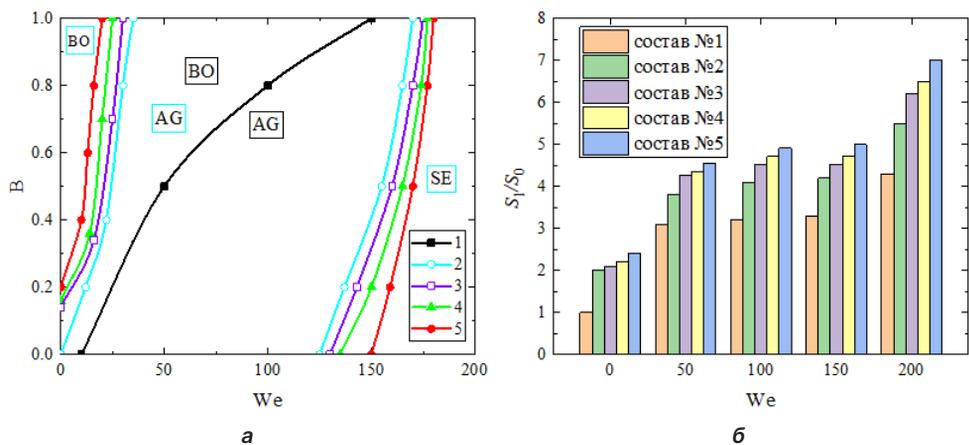


Рис. 5. Карты режимов взаимодействия капель водомазутных эмульсий между собой (а): 1 — состав № 1; 2 — состав № 2; 3 — состав № 3; 4 — состав № 4; 5 — состав № 5. Отношение площадей свободных поверхностей от значения We (б)

Fig. 5. Maps of modes of interaction of droplets of water-oil fuel with each other (а): 1 — composition No. 1; 2 — composition No. 2; 3 — composition No. 3; 4 — composition No. 4; 5 — composition No. 5. The ratio of free surface areas to the Weber number (б)

Режимы соударения капель водомазутных эмульсий с твердой подложкой

На рис. 6 приведены типичные видеокадры соударения капель водомазутных эмульсий с твердой подложкой, изготовленной из стали, идентичной применяемой в котельных агрегатах. Анализ результатов позволил установить, что при соударении капель реализовывались два режима взаимодействия: растекание и дробление. При температуре подложки около 100 °С для всех составов водомазутного топлива реализовывался только режим растекания. Капля падала на поверхность, растекалась, вторичные фрагменты не формировались. При повышении температуры подложки до 200 °С для всех составов водомазутной эмульсии реализовывался режим дробления. Капля после столкновения с поверхностью растекалась по ней. Через некоторое время капля нагревалась и испарялась. После чего формировались потоки паров и твердых частиц сажи, которые срывались с поверхности родительской капли, образовывались вторичные фрагменты. При добавлении присадок на основе жирных кислот растительных масел (составы № 3, 4) и особого сочетания положительно и отрицательно заряженных ионов (состав № 5) выявлено, что после вскипания капли образовывалось на 10, 12, 20% соответственно большее, по сравнению с базовым топливом (состав № 2), количество вторичных фрагментов.

На рис. 7а представлены карты режимов соударения водомазутных капель с твердой поверхностью. Результаты экспериментальных исследований показали, что для капель водомазутного топлива (10%) переход между режимами растекания и дробления реализуется при значении We около 330. При добавлении состава № 5 граница перехода между режимами растекания и дробления смещается в сторону меньших значений We на 10%. Составы № 3 и 4 продемонстрировали близкий результат: граница перехода

смещалась в сторону пониженных на 3–5% значений We . При анализе полученных значений отношения площадей свободных поверхностей каплей водомазутного топлива с добавлением присадок при соударении с твердой поверхностью (рис. 76) определено, что состав № 5 является оптимальным. При соударении капля состава № 5 образовывалось наибольшее количество вторичных фрагментов (с размерами около 0,05 мм), а именно на 10–25% больше относительно других исследуемых составов. Выявлено, что для измельчения капля состава № 5 требуются меньшие скорости движения (на 10–15% относительно водомазутного топлива). Таким образом, увеличивается полнота выгорания топлива за счет роста суммарной площади парообразования и выгорания, а также повышается устойчивость горения. При режиме дробления снижается механический и химический недожог топлива. В результате уменьшаются антропогенные выбросы (CO_x , NO_x) из-за улучшения эффективности сгорания топлива.

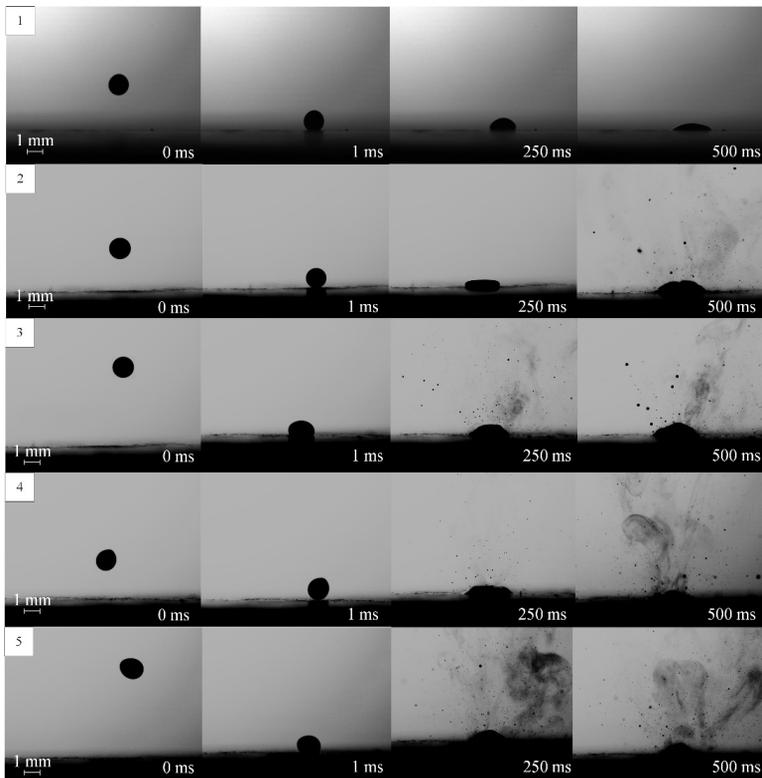


Рис. 6. Типичные видеокadres столкновения каплей водомазутных эмульсий с твердой разогретой поверхностью при варьировании ее температуры: 1 — режим растекания при температуре подложки 100 °С для состава № 2; 2–5 — режим дробления для составов № 2–5 при температуре подложки 200 °С

Fig. 6. Typical video frames of the actuation of a drop of water-oil fuel with a solid heated surface while maintaining its temperature: 1 — spreading mode at a substrate temperature of 100 °C for composition No. 2; 2–5 — separation mode for compositions No. 2–5 at a substrate temperature of 200 °C

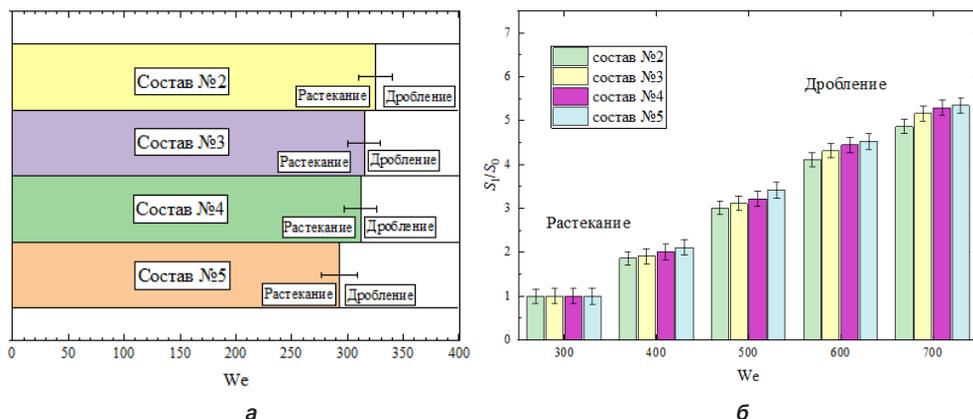


Рис. 7. Карта режимов взаимодействия капель водомазутных эмульсий ($T_f = 80\text{ }^\circ\text{C}$) с твердой подложкой ($T_s = 100\text{ }^\circ\text{C}$) (а). Отношение площадей свободных поверхностей от значения We (б)

Fig. 7. Map of interaction modes of a drop of water-oil fuel ($T_f = 80\text{ }^\circ\text{C}$) with a solid substrate ($T_s = 100\text{ }^\circ\text{C}$) (а). The ratio of free surface areas to the Weber number (б)

Режимы соударения водомазутных капель с твердой частицей, созданной путем пиролиза топлива

В топочных устройствах мазут сжигается в распыленном состоянии [Park и др., 2020]. Эффективность горения топлива зависит от условий распыления форсуночным устройством: размера капель, среднего диаметра и угла раскрытия факела, дальности струи. Немаловажным в том числе является коэффициент избытка воздуха. При малых значениях коэффициента избытка воздуха увеличивается содержание вредных выбросов, таких как NO_x и CO_x , а также количество твердых частиц, причиной возникновения которых является пиролиз капель водомазутного топлива при нехватке окислителя в отдельных объемах факела и, соответственно, снижении температуры [Блинов, 2007]. При повышении коэффициента избытка воздуха концентрация твердой фазы снижается, а при дальнейшем росте вновь возрастает. Это связано с понижением температуры факела и топочных газов при их разбавлении относительно холодным воздухом. Добавление присадок в топливо может уменьшить количество твердых частиц.

На рис. 8 приведены типичные видеокadres экспериментальных исследований соударения капель водомазутных эмульсий с твердой частицей. Установлено, что при небольших скоростях движения капель водомазутных эмульсий (до 2 м/с) реализовывался режим растекания. Капля полностью оседала на частицу, при этом не формировались вторичные фрагменты. При увеличении скоростей капель с 2,5 до 5 м/с реализовывался устойчивый режим дробления с характерным образованием вторичных фрагментов.

На рис. 9 представлена карта режимов взаимодействия капли и частицы водомазутной эмульсии. Чтобы достичь устойчивого режима дробления при добавлении присадок в топливо, водомазутным каплям радиусом около 1,5 мм необходимы меньшие на 10–20% скорости движения. Результаты исследования показали, что при добавлении

состава № 5 возрастает результирующая скорость движения капли и, следовательно, увеличивается количество вторичных фрагментов, в связи с чем отношение площадей свободных поверхностей до и после фрагментации повышается на 10–15% по сравнению с составом № 2. Увеличение площади поверхности измельченных капель при сжигании жидкого топлива в котлоагрегатах позволит снизить время задержки зажигания, минимизировать антропогенные выбросы и денежные затраты во время прогрева и перехода котельного агрегата на стационарный режим.

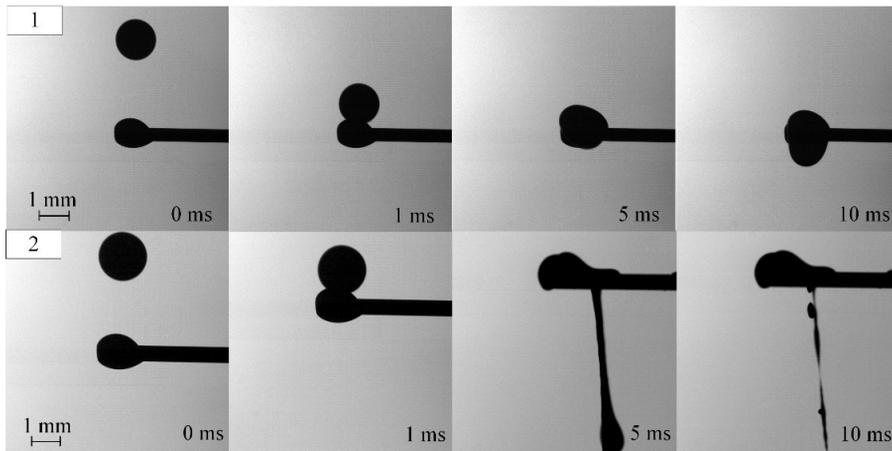


Рис. 8. Типичные видеокadres столкновения капель водомазутных эмульсий с твердой частицей: 1 — режим растекания; 2 — режим дробления

Fig. 8. Typical video frames of the collision of droplets of water-oil fuel with a solid particle: 1 — spreading mode; 2 — separation mode

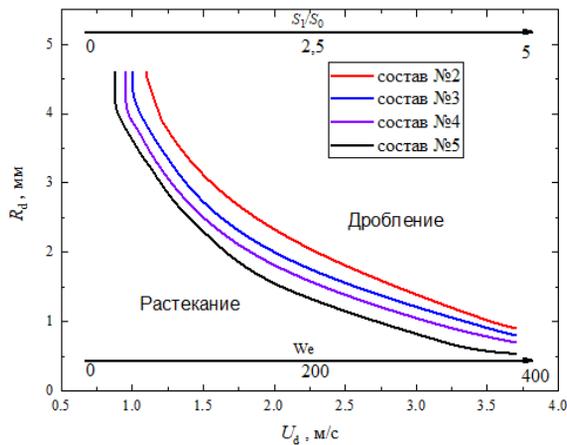


Рис. 9. Карта режимов взаимодействия капли и частицы водомазутной эмульсии в зависимости от скорости движения капли (U_d) при размере частицы $R_p = 1$ мм

Fig. 9. Map of interaction modes between a drop and a particle of water-oil fuel depending on the speed of movement of the drop (U_d) with particle size $R_p = 1$ mm

Характеристики микровзрывного измельчения водомазутных капель

Благодаря большой разнице температур кипения воды и мазута, распыление в топке капель мазутного топлива с водными включениями (размером менее 0,005 мм) позволяет реализовать микровзрывное измельчение, которое происходит из-за перегрева воды, находящейся внутри капли топлива. Повышение давления в каплях водомазутной эмульсии приводит к их разрушению, что способствует более полному выгоранию СО и углеводородных газов [Avularati и др., 2019].

На рис. 10 представлены типичные видеокадры микровзрывного измельчения водомазутных капель с добавлением присадок. По сравнению с составом № 2, процесс зарождения пузырьков в составах № 3–5 происходит интенсивнее на 15–25%. Кроме того, более активное микровзрывное измельчение способствует увеличению количества вторичных фрагментов на 10–40%.

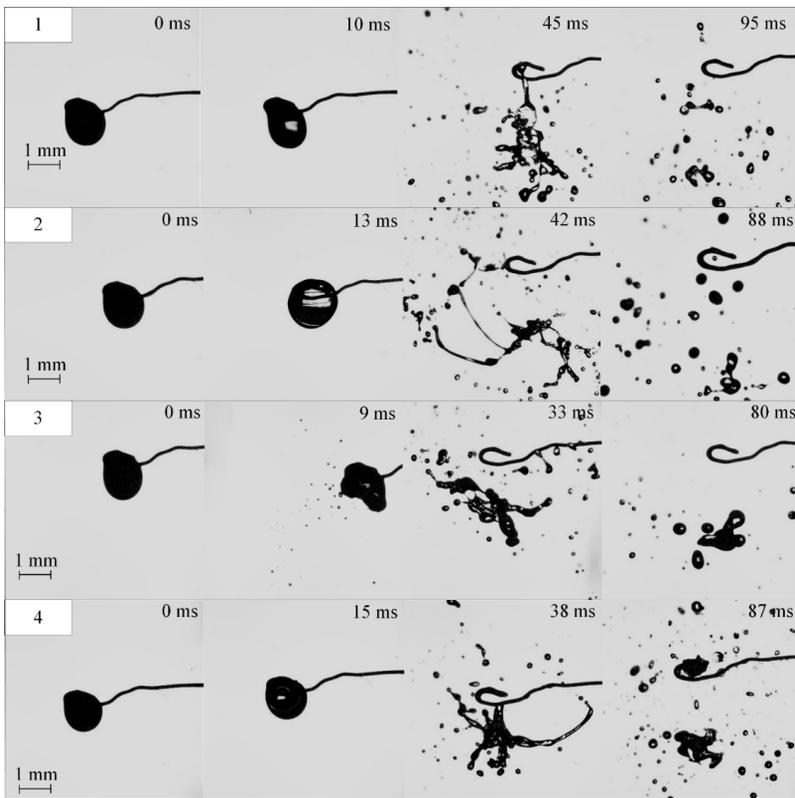


Рис. 10. Типичные видеокадры микровзрывного измельчения водомазутных капель при температуре газовой среды около 900 °С: 1 — состав № 2; 2 — состав № 3; 3 — состав № 4; 4 — состав № 5

Fig. 10. Typical video frames of micro-explosive grinding of water and oil droplets at a gas temperature of about 900 °С: 1 — composition No. 2; 2 — composition No. 3; 3 — composition No. 4; 4 — composition No. 5

На рис. 11 приведена зависимость отношения площадей свободных поверхностей до и после измельчения капель водомазутных эмульсий при микровзрыве. Полученные зависимости показывают, что микровзрывное измельчение обеспечивает многократное увеличение площади поверхности испарения исходной капли. Добавление в топливо специализированных присадок на основе жирных кислот растительных масел (составы № 3, 4) и сочетания положительных и отрицательных ионов (состав № 5) повышает эффективность микровзрывного измельчения: площадь вторичных фрагментов увеличивается на 28,4, 43,4 и 59,8% соответственно.

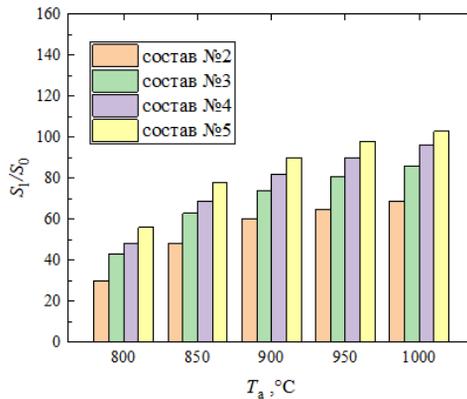


Рис. 11. Зависимости отношения площадей свободных поверхностей от температуры нагрева капли (T_a)

Fig. 11. Dependence of the ratio of free surface areas on the droplet heating temperature (T_a)

В связи с тем, что при добавлении специализированных присадок в водомазутное топливо вода связывается с тяжелыми углеводородами, образуется более стабильная смесь. Таким эмульсиям требуется меньше времени для микровзрывного разрушения. В результате в каплях скапливается больше пузырьков газа и повышается давление, усиливая микровзрыв [Shen и др., 2023].

Заключение

1. Результаты исследования показали, что для водомазутного топлива при взаимодействии капель между собой режим дробления происходит при значениях We более 150. При добавлении специализированных присадок граница перехода режима дробления смещается в сторону меньших значений We на 20%. Анализ компонентного состава исследуемых эмульсий позволил установить, что при добавлении присадок на основе жирных кислот растительных масел (составы № 3, 4) и особого сочетания положительно и отрицательно заряженных ионов (состав № 5) граница перехода режима агломерации смещается в сторону меньших значений We в среднем на 5,4, 7,6 и 9,5% соответственно.

2. Проведенные исследования по соударению капель водомазутных эмульсий с твердой подложкой позволили выявить, что при добавлении присадки на основе особого сочетания положительных и отрицательных ионов (состав № 5) граница перехода между режимами растекания и дробления смещается в сторону меньших значений We на 10%. Благодаря полученным результатам удалось определить, что состав № 5 является наиболее оптимальным. При соударении капель состава № 5 с твердой подложкой образовывалось наибольшее количество вторичных фрагментов (с характерными размерами около 0,05 мм): на 10–25% больше относительно других исследуемых составов.
3. Установлено, что при взаимодействии капель водомазутных эмульсий с добавлением присадок и твердой частицы, созданной путем пиролиза такого топлива, граница перехода между режимами растекания и дробления смещается в сторону меньших значений We на 10–20%. При добавлении этих присадок отношения площадей свободных поверхностей увеличиваются на 10–15%.
4. Показано, что добавление в топливо специализированных присадок на основе жирных кислот растительных масел (составы № 3, 4) и сочетания положительных и отрицательных ионов (состав № 5) повышает эффективность микровзрывного измельчения на 28,4, 43,4 и 59,8% соответственно за счет увеличения площади поверхности испарения (соотношение S_1/S_0 увеличилось в несколько раз).

Таким образом, снижая вязкость и межфазное и поверхностное натяжение топлива, можно контролировать процесс вторичного измельчения капель водомазутных эмульсий. Результаты выполненных исследований показали, что комбинированная методика вторичного измельчения капель водомазутных эмульсий способствует существенному росту площади поверхности жидкости ($S_1/S_0 > 100$).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Блинов Е. А. 2007. Топливо и теория горения. Раздел — подготовка и сжигание топлива: учеб. пос. СПб.: Изд-во СЗТУ. 119 с.
- Катин В. Д., Осатюк В. С., Фирщикова А. А. 2020. Экологичное сжигание жидкого топлива в виде водомазутных эмульсий в водогрейных и паровых котлах // Экология и безопасность жизнедеятельности: сб. ст. XX Междунар. науч.-практ. конф. (14–15 декабря 2020 г., Пенза, Россия) / под ред. В. А. Селезнева, И. А. Лушкина. Пенза: РИО ПГАУ. С. 100–103.
- Achebe C. H., Ogunedo B. M. O., Chukwunneke J. L., Anosike N. B. 2020. Analysis of diesel engine injector nozzle spray characteristics fueled with residual fuel oil // *Heliyon*. Vol. 6. No. 8. Article e04637. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04637>
- Antonov D., Piskunov M., Strizhak P., Tarlet D., Bellettre J. 2020. Dispersed phase structure and micro-explosion behavior under different schemes of water-fuel droplets heating // *Fuel*. Vol. 259. Article 116241. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116241>
- Avulapati M. M., Megaritis T., Xia J., Ganippa L. 2019. Experimental understanding on the dynamics of micro-explosion and puffing in ternary emulsion droplets // *Fuel*. Vol. 239. Pp. 1284–1292. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.112>

- Bodansky D. 2018. Chapter 17. Regulating greenhouse gas emissions from ships: The role of the International Maritime Organization // *Ocean Law Debates*. Leiden: Brill | Nijhoff. Pp. 478–501. https://doi.org/10.1163/9789004343146_019
- Chaussonnet G., Gepperth S., Holz S., Koch R., Bauer H. J. 2020. Influence of the ambient pressure on the liquid accumulation and on the primary spray in prefilming airblast atomization // *International Journal of Multiphase Flow*. Vol. 125. Article 103229. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103229>
- Chen X., Xi X., Zhang L., Wang Z., Cui Z., Long W. 2023. Experimental study on nucleation and micro-explosion characteristics of emulsified heavy fuel oil droplets at elevated temperatures during evaporation // *Applied Thermal Engineering*. Vol. 224. Article 120114. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120114>
- Gattuso J.-P., Magnan A., Billé R., Cheung W. W. L., Howes E. L., Joos F., Allemand D., Bopp L., Cooley S. R., Eakin C. M., Hoegh-Guldberg O., Kelly R. P., Pörtner H.-O., Rogers A. D., Baxter J. M., Laffoley D., Osborn D., Rankovic A., Rochette J., Sumaila U. R., Treyer S., Turley C. 2015. Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO₂ emissions scenarios // *Science*. Vol. 349. No. 6243. Article aac4722. <https://doi.org/10.1126/science.aac4722>
- Islamova A. G., Kerimbekova S. A., Shlegel N. E., Strizhak P. A. 2022. Droplet-droplet, droplet-particle, and droplet-substrate collision behavior // *Powder Technology*. Vol. 403. Article 117371. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117371>
- Jin C., Sun T., Ampah J. D., Liu X., Geng Z., Afrane S., Yusuf A. A., Liu H. 2022. Comparative study on synthetic and biological surfactants' role in phase behavior and fuel properties of marine heavy fuel oil-low carbon alcohol blends under different temperatures // *Renewable Energy*. Vol. 195. Pp. 841–852. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.088>
- Kalpokaite-Dichkuvėnė R., Stravinskis G. 2006. Behavior of a fuel oil droplet on a hot surface // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. Vol. 79. No. 1. Pp. 10–17. <https://doi.org/10.1007/s10891-006-0060-y>
- Kicherer A., Spliethoff H., Maier H., Hein K. R. G. 1994. The effect of different reburning fuels on NO_x-reduction // *Fuel*. Vol. 73. No. 9. Pp. 1443–1446. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(94\)90059-0](https://doi.org/10.1016/0016-2361(94)90059-0)
- Klimenko A., Shlegel N. E., Strizhak P. A. 2023. Breakup of colliding droplets and particles produced by heavy fuel oil pyrolysis // *Energy*. Vol. 283. Article 128480. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128480>
- Kropotova S. S., Tkachenko P. P., Strizhak P. A. 2022. The effect of impurities on water droplet collision regimes and behavior // *Microgravity Science and Technology*. Vol. 34. No. 4. Article 54. <https://doi.org/10.1007/s12217-022-09974-z>
- Likhanov V. A., Lopatin O. P. 2020. Development of environmentally friendly alcohol-fuel emulsions for diesel engines // *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1515. No. 4. Article 042019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042019>
- Lv Q., Li J., Guo P., Zhang B., Tang P. 2023. Effect of Reynolds number on impact force and collision process of a low-velocity droplet colliding with a wall carrying an equal-mass deposited droplet // *International Journal of Multiphase Flow*. Vol. 163. Article 104432. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2023.104432>

- Park H. Y., Han K., Kim H. H., Park S., Jang J., Yu G. S., Ko J. H. 2020. Comparisons of combustion characteristics between bioliquid and heavy fuel oil combustion in a 0.7 MWth pilot furnace and a 75 MWe utility boiler // *Energy*. Vol. 192. Article 116557. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116557>
- Promptov M., Pigarev S. 2016. Technology for improving water-fuel oil emulsions properties using polycarboxylic acids // *Advanced Materials and Technologies*. No. 3. Pp. 69–80. <https://doi.org/10.17277/amt.2016.03.pp069-080>
- Shadrin E. Yu., Anufriev I. S., Butakov E. B., Kopyev E. P., Alekseenko S. V., Maltsev L. I., Sharypov O. V. 2021. Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner // *Fuel*. Vol. 303. Article 121182. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121182>
- Shen S., Liu H., Liu Y., Liu X., Hu H., Hu Z., Wang T. 2023. Dynamic details inside water-in-oil (W/O) emulsion droplet and its impact on droplet evaporation and micro-explosion // *Fuel*. Vol. 338. Article 127254. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127254>
- Shlegel N. E., Tkachenko P. P., Strizhak P. A. 2020. Collision of water droplets with different initial temperatures // *Powder Technology*. Vol. 367. Pp. 820–830. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.017>
- Shlegel N. E., Strizhak P. A. 2023. Regime maps of collisions of fuel oil/water emulsion droplets with solid heated surface // *Fuel*. Vol. 342. Article 127734. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127734>
- Solomatin Ya., Shlegel N. E., Strizhak P. A. 2019. Atomization of promising multicomponent fuel droplets by their collisions // *Fuel*. Vol. 255. Article 115751. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115751>
- Tao L., Fairley D., Kleeman M. J., Harley R. A. 2013. Effects of switching to lower sulfur marine fuel oil on air quality in the San Francisco Bay area // *Environmental Science & Technology*. Vol. 47. No. 18. Pp. 10171–10178. <https://doi.org/10.1021/es401049x>
- Valiullin T. R., Vershinina K. Yu., Kuznetsov G. V., Strizhak P. A. 2020. An experimental investigation into ignition and combustion of groups of slurry fuel droplets containing high concentrations of water // *Fuel Processing Technology*. Vol. 210. Article 106553. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106553>
- Zhang X., Changqing H., Jingjing Z., Ying T., Lin H., Hong S., Xingang L. 2023. Demulsification of water-in-heavy oil emulsions by oxygen-enriched non-ionic demulsifier: Synthesis, characterization and mechanisms // *Fuel*. Vol. 338. Article 127274. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127274>
- Zhu M., Ma Y., Zhang D. 2012. Effect of a homogeneous combustion catalyst on the combustion characteristics and fuel efficiency in a diesel engine // *Applied Energy*. Vol. 91. No. 1. Pp. 166–172. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.09.007>
- Zroychikov N. A., Kormilitsyn V. I., Borozdin V. S., Pay A. V. 2020. A review of technologies for treatment of fuel oil during storage and preparation for burning in boiler units' furnaces // *Thermal Engineering*. Vol. 67. No. 2. Pp. 106–114. <https://doi.org/10.1134/S0040601520020068>

References

- Blinov, E. A. (2007). *Fuel and combustion theory. Section — preparation and combustion of fuel*. SZTU Publishing House. [In Russian]
- Katin, V. D., Osatyuk, V. S., & Firtsikova, A. A. (2020). Ecological burning of liquid fuel as a water-oil emulsions in hot water and steam boilers. In V. A. Seleznev, & I. A. Lushkin (Eds.), *Ecology and life safety: The collection of articles of the 20th International scientific and practical conference* (pp. 100–103). Penza State Agrarian University. [In Russian]
- Achebe, C. H., Ogunedo, B. M. O., Chukwunke, J. L., & Anosike, N. B. (2020). Analysis of diesel engine injector nozzle spray characteristics fueled with residual fuel oil. *Heliyon*, 6(8), Article e04637. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04637>
- Antonov, D., Piskunov, M., Strizhak, P., Tarlet, D., & Bellettre, J. (2020). Dispersed phase structure and micro-explosion behavior under different schemes of water-fuel droplets heating. *Fuel*, 259, Article 116241. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116241>
- Avulapati, M. M., Megaritis, T., Xia, J., & Ganippa, L. (2019). Experimental understanding on the dynamics of micro-explosion and puffing in ternary emulsion droplets. *Fuel*, 239, 1284–1292. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.112>
- Bodansky, D. (2018). Chapter 17. Regulating greenhouse gas emissions from ships: The role of the International Maritime Organization. In *Ocean Law Debates* (pp. 478–501). Brill | Nijhoff. https://doi.org/10.1163/9789004343146_019
- Chaussonnet, G., Gepperth, S., Holz, S., Koch, R., & Bauer, H. J. (2020). Influence of the ambient pressure on the liquid accumulation and on the primary spray in prefilming airblast atomization. *International Journal of Multiphase Flow*, 125, Article 103229. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2020.103229>
- Chen, X., Xi, X., Zhang, L., Wang, Z., Cui, Z., & Long, W. (2023). Experimental study on nucleation and micro-explosion characteristics of emulsified heavy fuel oil droplets at elevated temperatures during evaporation. *Applied Thermal Engineering*, 224, Article 120114. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120114>
- Gattuso, J.-P., Magnan, A., Billé, R., Cheung, W. W. L., Howes, E. L., Joos, F., Allemand, D., Bopp, L., Cooley, S. R., Eakin, C. M., Hoegh-Guldberg, O., Kelly, R. P., Pörtner, H.-O., Rogers, A. D., Baxter, J. M., Laffoley, D., Osborn, D., Rankovic, A., Rochette, J., Sumaila, U. R., Treyer, S., & Turley, C. (2015). Contrasting futures for ocean and society from different anthropogenic CO₂ emissions scenarios. *Science*, 349(6243), Article aac4722. <https://doi.org/10.1126/science.aac4722>
- Islamova, A. G., Kerimbekova, S. A., Shlegel, N. E., & Strizhak, P. A. (2022). Droplet-droplet, droplet-particle, and droplet-substrate collision behavior. *Powder Technology*, 403, Article 117371. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117371>
- Jin, C., Sun, T., Ampah, J. D., Liu, X., Geng, Z., Afrane, S., Yusuf, A. A., & Liu, H. (2022). Comparative study on synthetic and biological surfactants' role in phase behavior and fuel properties of marine heavy fuel oil-low carbon alcohol blends under different temperatures. *Renewable Energy*, 195, 841–852. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.06.088>
- Kalpokaite-Dichkuvene, R., & Stravinskas, G. (2006). Behavior of a fuel oil droplet on a hot surface. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 79(1), 10–17. <https://doi.org/10.1007/s10891-006-0060-y>

- Kicherer, A., Spliethoff, H., Maier, H., & Hein, K. R. G. (1994). The effect of different reburning fuels on NO_x-reduction. *Fuel*, 73(9), 1443–1446. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(94\)90059-0](https://doi.org/10.1016/0016-2361(94)90059-0)
- Klimenko, A., Shlegel, N. E., & Strizhak, P. A. (2023). Breakup of colliding droplets and particles produced by heavy fuel oil pyrolysis. *Energy*, 283, Article 128480. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.128480>
- Kropotova, S. S., Tkachenko, P. P., & Strizhak, P. A. (2022). The effect of impurities on water droplet collision regimes and behavior. *Microgravity Science and Technology*, 34(4), Article 54. <https://doi.org/10.1007/s12217-022-09974-z>
- Likhanov, V. A., & Lopatin, O. P. (2020). Development of environmentally friendly alcohol-fuel emulsions for diesel engines. *Journal of Physics: Conference Series*, 1515(4), Article 042019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1515/4/042019>
- Lv, Q., Li, J., Guo, P., Zhang, B., & Tang, P. (2023). Effect of Reynolds number on impact force and collision process of a low-velocity droplet colliding with a wall carrying an equal-mass deposited droplet. *International Journal of Multiphase Flow*, 163, Article 104432. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2023.104432>
- Park, H. Y., Han, K., Kim, H. H., Park, S., Jang, J., Yu, G. S., & Ko, J. H. (2020). Comparisons of combustion characteristics between bioliquid and heavy fuel oil combustion in a 0.7 MWth pilot furnace and a 75 MWe utility boiler. *Energy*, 192, Article 116557. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116557>
- Promtov, M., & Pigarev, S. (2016). Technology for improving water-fuel oil emulsions properties using polycarboxylic acids. *Advanced Materials and Technologies*, (3), 69–80. <https://doi.org/10.17277/amt.2016.03.pp.069-080>
- Shadrin, E. Yu., Anufriev, I. S., Butakov, E. B., Kopyev, E. P., Alekseenko, S. V., Maltsev, L. I., & Sharypov, O. V. (2021). Coal-water slurry atomization in a new pneumatic nozzle and combustion in a low-power industrial burner. *Fuel*, 303, Article 121182. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121182>
- Shen, S., Liu, H., Liu, Y., Liu, X., Hu, H., Hu, Z., & Wang, T. (2023). Dynamic details inside water-in-oil (W/O) emulsion droplet and its impact on droplet evaporation and micro-explosion. *Fuel*, 338, Article 127254. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127254>
- Shlegel, N. E., Tkachenko, P. P., & Strizhak, P. A. (2020). Collision of water droplets with different initial temperatures. *Powder Technology*, 367, 820–830. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.04.017>
- Shlegel, N. E., & Strizhak, P. A. (2023). Regime maps of collisions of fuel oil/water emulsion droplets with solid heated surface. *Fuel*, 342, Article 127734. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.127734>
- Solomatin, Ya., Shlegel, N. E., & Strizhak, P. A. (2019). Atomization of promising multicomponent fuel droplets by their collisions. *Fuel*, 255, Article 115751. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115751>
- Tao, L., Fairley, D., Kleeman, M. J., & Harley, R. A. (2013). Effects of switching to lower sulfur marine fuel oil on air quality in the San Francisco Bay area. *Environmental Science & Technology*, 47(18), 10171–10178. <https://doi.org/10.1021/es401049x>
- Valiullin, T. R., Vershinina, K. Yu., Kuznetsov, G. V., & Strizhak, P. A. (2020). An experimental investigation into ignition and combustion of groups of slurry fuel droplets containing high concentrations of water. *Fuel Processing Technology*, 210, Article 106553. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106553>

- Zhang, X., Changqing, H., Jingjing, Z., Ying, T., Lin, H., Hong, S., & Xingang, L. (2023). Demulsification of water-in-heavy oil emulsions by oxygen-enriched non-ionic demulsifier: Synthesis, characterization and mechanisms. *Fuel*, 338, Article 127274. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127274>
- Zhu, M., Ma, Y., & Zhang, D. (2012). Effect of a homogeneous combustion catalyst on the combustion characteristics and fuel efficiency in a diesel engine. *Applied Energy*, 91(1), 166–172. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.09.007>
- Zroychikov, N. A., Kormilitsyn, V. I., Borozdin, V. S., & Pay, A. V. (2020). A review of technologies for treatment of fuel oil during storage and preparation for burning in boiler units' furnaces. *Thermal Engineering*, 67(2), 106–114. <https://doi.org/10.1134/S0040601520020068>

Информация об авторах

Никита Евгеньевич Шлегель, кандидат технических наук, доцент Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия
nik.shlegel.ask@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7402-5321>

Андрей Клименко, студент магистратуры, Инженерная школа энергетики, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия
ayk40@tpu.ru

Information about the authors

Nikita E. Shlegel, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Research School of Physics, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
nik.shlegel.ask@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7402-5321>

Andrey Klimenko, Master Student, Power Engineering School, National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia
ayk40@tpu.ru