

03.1

## Микровзрывное измельчение капель водомазутной эмульсии при добавлении специализированных присадок

© Н.Е. Шлегель, А. Клименко

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия  
E-mail: nik.shlegel.ask@gmail.com

Поступило в Редакцию 16 февраля 2024 г.

В окончательной редакции 11 апреля 2024 г.

Принято к публикации 12 апреля 2024 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований микровзрывной фрагментации водомазутных капель с добавлением присадки ИОН-М. Исследования проведены при температуре газовой среды около 800°С. Изучены характеристики образования вторичных фрагментов в ходе микровзрывной фрагментации водомазутных капель при варьировании концентрации присадки ИОН-М. Показано, что добавление присадки ИОН-М (0.5 vol.%) приводит к увеличению количества вторичных фрагментов практически на 60%, а также к снижению их среднего размера на 30–50%. Установлено, что при добавлении присадки ИОН-М (0.5 vol.%) к водомазутному топливу увеличивается отношение площадей свободных поверхностей после и до фрагментации практически на 65% по сравнению с таковым для водомазутного топлива без присадки.

**Ключевые слова:** водомазутная эмульсия, микровзрыв, фрагментация, вторичные фрагменты, присадки.

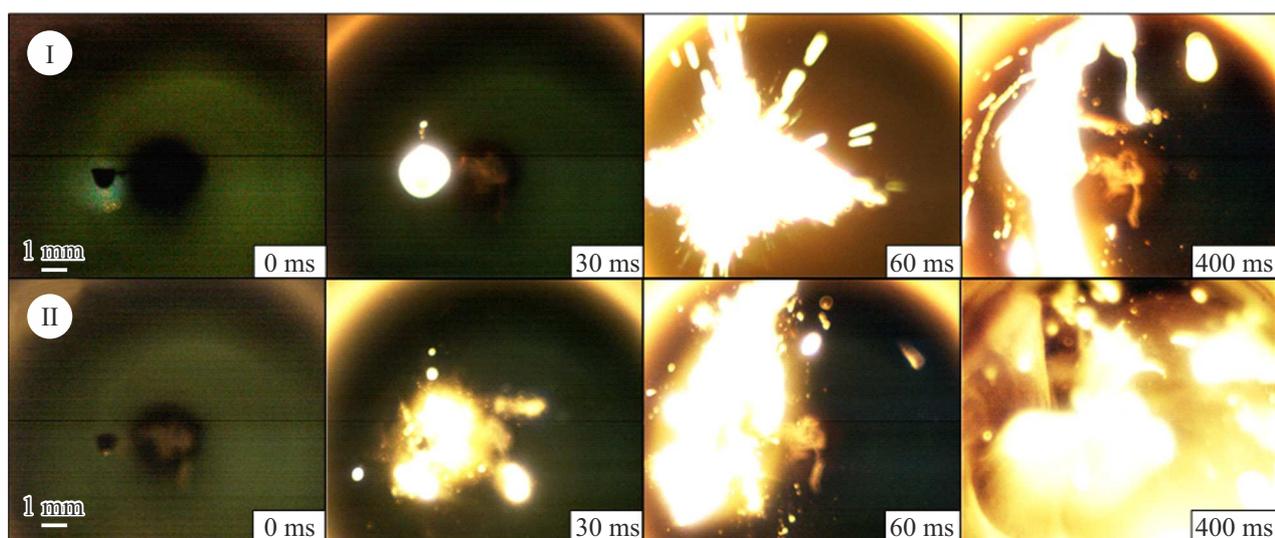
DOI: 10.61011/PJTF.2024.15.58433.19896

Применение водомазутного топлива позволяет сократить затраты на выработку тепловой энергии и уменьшить экологические риски, связанные с выбросами загрязняющих веществ [1]. Как правило, для эффективного сжигания топлива в мазут добавляют около 10 vol.% воды [2]. При таком содержании воды в мазуте улучшаются характеристики распыления топлива, а также снижаются концентрации антропогенных выбросов ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{CO}_x$  и др.). Этот эффект объясняется явлением микровзрыва. Основным механизмом микровзрыва таких топлив является перегрев негорючего компонента (воды) относительно температуры равновесия жидкости с паром. Это приводит к образованию пара под давлением. Пар начинает расширяться и накапливаться внутри капли, создавая давление, которое в конечном итоге приводит к разрушению капли на множество вторичных фрагментов [3]. Таким образом улучшается эффективность распыления мазутного топлива, что приводит к однородному заполнению камеры сгорания каплями топливной смеси. В [4] установлено, что при попадании капли водомазутного топлива в высокотемпературную среду происходит микровзрывное измельчение. Этот эффект приводит к более тонкому распылению топлива в камере сгорания. Таким образом увеличивается эффективность смешивания топлива и воздуха [5].

Для снижения вредных выбросов и улучшения эффективности сжигания топлива используются дополнительные специализированные присадки [6]. Они позволяют снизить стоимость вырабатываемой тепловой энергии. Поэтому добавление присадок к топливу обладает рядом преимуществ, таких как повышение эксплуатационных характеристик котла, снижение расхода топлива [7]. Поэтому важной задачей при изучении процесса микровзрывного измельчения водомазутного топлива является

исследование последствий дробления капель (например, размеров вторичных фрагментов). Вместе с тем определение оптимальной концентрации присадки в водомазутное топливо позволит достичь эффективной работы технологического оборудования, минимизировать расход топлива, снизить антропогенные выбросы и стабилизировать процесс распыления. В связи с этим необходимо установить характеристики вторичных фрагментов при варьировании концентрации присадки. Указанные задачи мотивировали проведение данного исследования.

Для приготовления водомазутной эмульсии (мазут 90 vol.%, вода 10 vol.%) применялось магнитное перемешивающее устройство. В качестве нагревательной системы использовалась трубчатая муфельная печь (диапазон температур от 300 до 1300°С). Исследуемые капли вводились в область регистрации с помощью координатного механизма, на конце которого находился держатель с никромовой проволокой диаметром 0.2 mm. Координатный механизм соединялся с компьютером, который отслеживал положение капли топлива. Температура нагрева варьировалась в диапазоне от 700 до 900°С. С помощью высокоскоростной видеокамеры Phantom Miro M310 регистрировались процессы нагрева и микровзрывного измельчения водомазутных капель. Частота съемки составляла 3200 кадров в секунду при разрешении 768 × 576 пикселей. Обработка видефрагментов осуществлялась с применением программного обеспечения Phantom Camera Control. При помощи высокоскоростной видеосъемки регистрировались следующие параметры: размеры капель ( $R_d$ ), количество вторичных фрагментов ( $N$ ) и их размеры ( $r_d$ ). Систематическая погрешность при определении  $r_d$  составила 0.025 mm. Для минимизации случайных погрешностей регистрации указанных



**Рис. 1.** Видеокadres микровзрывного измельчения водомазутных капель при температуре газовой среды около  $800^{\circ}\text{C}$  ( $R_d \approx 1$  мм). I — мазут 90 vol.%, вода 10 vol.%, II — мазут 89.5 vol.%, вода 10 vol.%, ИОН-М 0.5 vol.%.

параметров выполнялись серии из 15 экспериментов при сопоставимых начальных условиях [8].

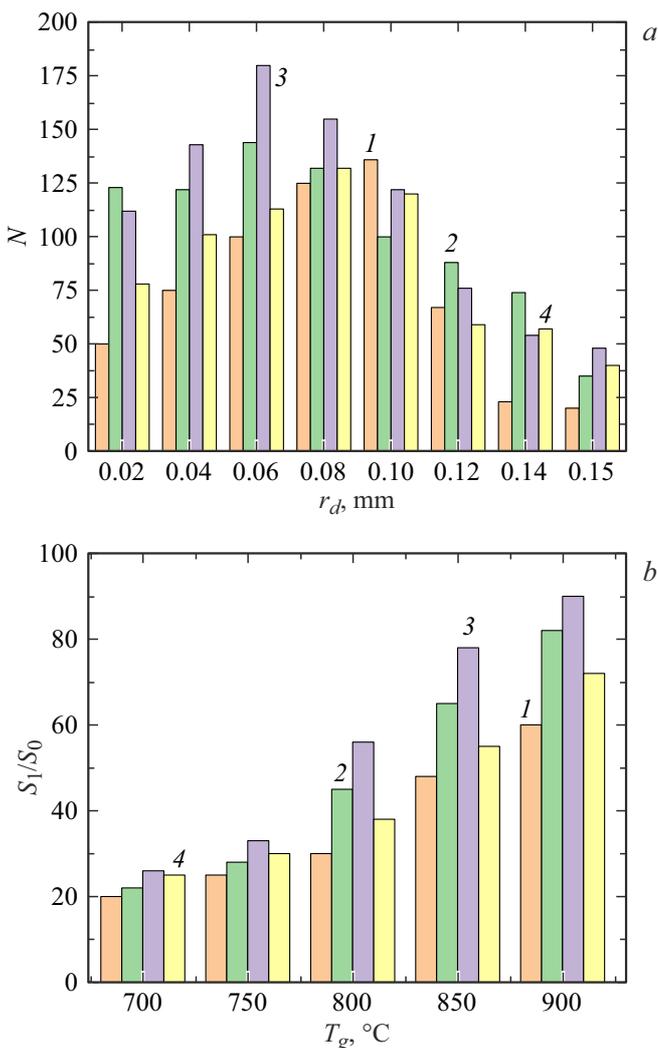
Для проведения экспериментальных исследований использовались четыре состава водомазутной эмульсии при варьировании концентрации присадки ИОН-М от 0 до 1 vol.%. Катализатор горения ИОН-М — это присадка в различные виды мазутов и печных топлив. Присадка ИОН-М представляет собой сочетание положительных и отрицательных ионов, электростатические поля которых оказывают упорядочивающее воздействие на молекулы веществ в топливе. Это обеспечивает разрушение крупных капель топлива на капли меньшего размера, что позволяет осуществить более полное сгорание углеводородов и существенно сократить выбросы сажи и твердых частиц. Такие присадки предназначены для повышения эффективности сжигания мазутного топлива в котлах и промышленных печах [9]. Таким образом, катализатор горения изменяет структуру и реологические свойства топлива, тем самым оптимизируется процесс горения.

Для измерения вязкости использовались ротационный вискозиметр Brookfield DV3T (диапазон измерения от 1 до  $6 \cdot 10^6$  мПа·с, точность  $\pm 1\%$ ), шпindel SC4-18 (диапазон измерения вязкости 50– $10^5$  мПа·с) и термостат Termex КРИО-ВТ-12-01 (диапазон рабочих температур от  $-30$  до  $+200^{\circ}\text{C}$ ) [10]. Измерения поверхностного натяжения проводились с помощью тензиометра Kruss K6 (диапазон измерения 1–90 мН·м, диапазон температур 1– $130^{\circ}\text{C}$ ). С помощью тензиометра определялась плотность топливной смеси [11]. С помощью оптического микроскопа МБС-12 определялось распределение размеров капель дисперсной фазы в водомазутной эмульсии. Калибровка осуществлялась по методике поверки МИ 253-87 [12]. Реологические характеристики составов приведены в таблице.

На рис. 1 представлены типичные кадры с иллюстрацией микровзрывного измельчения водомазутных капель при нагреве в высокотемпературной газовой среде. Установлено, что процесс испарения водомазутных капель протекал в несколько стадий. Сначала воспламенялась смесь воздуха, паров и летучих веществ мазута. Эта стадия имела разную длительность в зависимости от условий нагрева и других влияющих факторов (например, размеров капель). Вследствие зажигания летучих веществ увеличивалась температура в зоне горения капли, что приводило к ее диспергированию в режиме микровзрыва. В результате этого формировались вторичные фрагменты. На следующей стадии получившиеся вторичные фрагменты начинали распространяться по всей камере сгорания. Когда они подвергались нагреву, происходило их воспламенение. Благодаря этому эффекту в камере сгорания образовывалась обширная зона горения, имеющая значительные размеры. Таким образом, пламенная зона становилась достаточно большой, что способствует эффективному горению топлива. Это явление имеет важное значение для обеспечения стабильной работы энергетического оборудования. Пламенная зона горения, распространяющаяся по всей камере, обеспечивает равномерное распределение теплоты и энергии, что способствует оптимальному процессу сгорания. Продемонстрированные видеокadres показали, что при добавлении присадки ИОН-М (0.5 vol.%) в водомазутное топливо процесс микровзрыва происходил более интенсивно. Такой эффект связан с тем, что присадка ИОН-М изменяет реологические свойства топлива. Тяжелые углеводороды, которые присутствуют в топливе, переводятся в упорядоченное состояние. Тем самым происходит равномерное распределение воды по всему объему капли мазутного топлива. Также анализ кадров показал, что при добавлении присадки коли-

Основные реологические характеристики использованных жидкостей

Концентрация присадки ИОН-М, vol.%	Температура состава, °C	Плотность, kg/m <sup>3</sup>	Динамическая вязкость, mPa·s	Поверхностное натяжение, N/m
0	20/80	1021/933	1540/116	0.044/0.033
0.25	20/80	1020/933	1530/114	0.044/0.032
0.5	20/80	1016/933	1490/109	0.041/0.029
1	20/80	1018/933	1500/112	0.042/0.030



**Рис. 2.** Распределения вторичных фрагментов по размерам при микровзрывном измельчении капель водомазутных эмульсий ( $R_d \approx 1$  мм) при температуре газовой среды  $800^\circ\text{C}$  (a) и отношения площадей свободной поверхности жидкости после и до распада ( $S_1/S_0$ ) (b) при варьировании концентрации присадки ИОН-М (vol.%): 1 — 0, 2 — 0.25, 3 — 0.5, 4 — 1.

чество вторичных фрагментов становилось больше на 50%. Это обеспечивает более мелкий распыл в топке и высокую эффективность смешивания топлива с воз-

духом [5]. Увеличивается количество энергии топлива, уменьшаются потери теплоты на нагрев мазутного топлива.

На рис. 2 представлены распределения вторичных фрагментов по размерам  $N(r_d)$  при температуре газовой среды  $800^\circ\text{C}$ , а также отношения площадей свободной поверхности жидкости после ( $S_1$ ) и до ( $S_0$ ) распада водомазутных капель при варьировании концентрации присадки ИОН-М. Установлено, что при добавлении присадки ИОН-М возрастало количество вторичных фрагментов. Этот эффект обусловлен тем, что присадка ИОН-М изменяет молекулярную структуру водомазутной эмульсии, тем самым воздействуя на реологические характеристики. Результаты показали, что чем ниже вязкость водомазутной эмульсии, тем больше вторичных фрагментов с меньшими размерами формировалось в результате микровзрывного измельчения. Определено, что наиболее эффективной концентрацией присадки ИОН-М к водомазутному топливу с точки зрения влияния на характеристики вторичного измельчения является 0.5 vol.%. Добавление такой концентрации позволило увеличить количество вторичных фрагментов на 50–60%, а также снизить их средний размер на 30–50%. При дальнейшем увеличении концентрации до 1 vol.% происходило уменьшение вторичных фрагментов на 20%. Такой эффект связан с тем, что при повышении концентрации присадки увеличиваются вязкость и поверхностное натяжение топлива [5].

Сравнение отношений площадей свободных поверхностей показало, что добавление присадки ИОН-М с концентрацией 0.5 vol.% увеличивало отношение  $S_1/S_0$  на 30–85% по сравнению с таковым для водомазутного топлива. При концентрации присадки 1 vol.% отношение площадей  $S_1/S_0$  увеличивается на 20–25%. Добавление присадки с концентрацией 0.25 vol.% позволило увеличить отношение площадей  $S_1/S_0$  на 10–50%. Результаты показали, что оптимальная концентрация присадки ИОН-М для характеристик микровзрывного измельчения капель составляет около 0.5 vol.%.

Таким образом, проведенные эксперименты позволили установить характеристики вторичных фрагментов в ходе микровзрывной фрагментации водомазутных капель при варьировании концентрации присадки ИОН-М. Применение присадки с концентрацией 0.5 vol.% в среднем позволяет увеличить количество вторичных фрагментов

на 50–60% по сравнению с их количеством для водомазутного топлива.

### Финансирование работы

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

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] H. Zhang, Z. Lu, T. Wang, Z. Che, *Int. J. Heat Mass Transf.*, **219**, 124851 (2024). DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.124851
- [2] S. Shahnazari, M.A. Astaraki, M.A. Sobati, H. Ghassemi, *J. Energy Inst.*, **108**, 101204 (2023). DOI: 10.1016/j.joei.2023.101204
- [3] Д.В. Антонов, П.А. Стрижак, *Письма в ЖТФ*, **46** (3), 23 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.03.48987.18008 [D.V. Antonov, P.A. Strizhak, *Tech. Phys. Lett.*, **46**, 122 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020020029].
- [4] C. Cheng, Y. Hu, Y. Jiang, *Fuel*, **360**, 130609 (2024). DOI: 10.1016/j.fuel.2023.130609
- [5] X. Chen, X. Xi, G. Xiao, L. Zhang, Z. Wang, W. Long, *Fuel*, **332**, 126614 (2023). DOI: 10.1016/j.fuel.2022.126614
- [6] X. Rao, C. Sheng, X. Hou, Y. Wei, L. Dai, *Wear*, **528-529**, 204994 (2023). DOI: 10.1016/j.wear.2023.204994
- [7] Z. Prelec, T. Mrakovčić, V. Dragičević, *Fuel Process. Technol.*, **110**, 176 (2013). DOI: 10.1016/j.fuproc.2012.12.010
- [8] Д.В. Антонов, П.А. Стрижак, Р.М. Федоренко, *Письма в ЖТФ*, **46** (10), 14 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.10.49424.18244 [D.V. Antonov, P.A. Strizhak, R.M. Fedorenko, *Tech. Phys. Lett.*, **46**, 473 (2020). DOI: 10.1134/S1063785020050193].
- [9] A. Groysman, *Corrosion in systems for storage and transportation of petroleum products and biofuels* (Springer, Dordrecht, 2014), p. 23–41.
- [10] A. Klimenko, N.E. Shlegel, P.A. Strizhak, *Energy*, **283**, 128480 (2023). DOI: 10.1016/j.energy.2023.128480
- [11] P. Tkachenko, N. Shlegel, P. Strizhak, *Chem. Eng. Res. Des.*, **179**, 201 (2022). DOI: 10.1016/j.cherd.2022.01.019
- [12] А.Г. Чижиков, Ю.А. Кожевников, О.Е. Аладинская, *Альтернативная энергетика и экология*, № 3 (121), 96 (2013).