

УДК 62-643, 662.61, 536.462

## СЖИГАНИЕ МАЗУТА В СТРУЕ ВОДЯНОГО ПАРА В НОВОМ ГОРЕЛОЧНОМ УСТРОЙСТВЕ

С. В. Алексеенко, И. С. Ануфриев, М. С. Вигриянов,  
Е. П. Копьев, И. С. Садкин, О. В. Шарыпов

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия  
E-mails: alexs@itp.nsc.ru, anufriev@itp.nsc.ru, vigriyanovms@rambler.ru,  
kopyeve@itp.nsc.ru, sadkinvanya@mail.ru, sharypov@itp.nsc.ru

Проведен комплекс экспериментальных исследований по определению тепловых и экологических характеристик процесса сжигания мазута марки М-100 при его распылении струей перегретого водяного пара в лабораторном образце нового горелочного устройства. Предложена схема сжигания жидкого топлива, исключая засорение узких топливных каналов форсунок и эффективная при сжигании высоковязкого топлива и отходов. Реализован процесс стабильного сжигания мазута в горелочном устройстве малой мощности (7 кВт) при малых значениях концентрации токсичных выбросов и больших значениях полноты сгорания топлива.

**Ключевые слова:** горелочное устройство, мазут, перегретый водяной пар, состав продуктов сгорания, calorиметрические измерения.

DOI: 10.15372/PMTF20200302

**Введение.** Мазут является распространенным резервным или основным топливом на тепловых электростанциях, часто применяется в качестве растопочного топлива и играет важнейшую роль в обеспечении удаленных территорий тепловой и электрической энергией [1, 2]. Однако мазут — это остаточный продукт процесса перегонки нефти, что обуславливает наличие в нем тяжелых и сложных углеводородов, высокую вязкость, повышенное содержание серы, механических примесей, парафинов, металлов [3]. Указанные особенности этого вида жидкого топлива препятствуют его эффективному сгоранию при использовании традиционных способов сжигания, вызывают загрязнение топливной аппаратуры, усиливают коррозию отдельных элементов горелок вследствие образования агрессивных отложений и нагара [4], а образующиеся продукты сгорания содержат большое количество сажи и токсичных выбросов, таких как оксиды  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$  [5, 6]. Поэтому для эффективного сжигания мазута необходимы специальные технологии и устройства, позволяющие повысить энергетические показатели, снизить эмиссию токсичных продуктов сгорания в атмосферу и увеличить срок службы оборудования.

В настоящее время наиболее распространенными способами увеличения полноты сгорания жидкого топлива с одновременным уменьшением количества вредных выбросов являются ступенчатое сжигание, использование нетоксичных форсунок, рециркуляция дымо-

---

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 18-79-10134).

© Алексеенко С. В., Ануфриев И. С., Вигриянов М. С., Копьев Е. П.,  
Садкин И. С., Шарыпов О. В., 2020

вых газов [7] и др. Также используются механические форсунки, форсунки с распыляемой средой и комбинированные форсунки (инжекторы) [8]. Это обусловлено необходимостью уменьшения диаметра капли распыляемого топлива для его более полного сгорания [9]. Для модернизации действующих установок применяется также совместное сжигание мазута и природного газа [10], однако использование данного метода не позволяет решить принципиальную задачу повышения качества сжигания самого мазута. Известны способы сжигания мазута в кипящем слое [11], когда полнота сгорания 99,8 % достигается путем увеличения толщины слоя, при этом выбросы  $\text{NO}_x$  незначительны вследствие невысокой температуры горения. Другой известный метод — газификация мазута [12], исключая выбросы сажевых частиц. Для уменьшения количества выбросов  $\text{NO}_x$  (за счет уменьшения температуры в камере горения) используются также водотопливные эмульсии [13], хорошо себя зарекомендовавшие при сжигании дизельного топлива [14–16] и нефти [17, 18]. Однако эти методы имеют общий недостаток: для полного сгорания распыленного высоковязкого топлива требуется достаточно длительное время нахождения в камере сгорания, что налагает ограничения на минимальные размеры и мощность горелочных устройств. В основном мазутные горелки имеют мощность  $W \geq 200$  кВт, однако в зависимости от приложений требуются также устройства со значительно меньшей мощностью ( $W \geq 10$  кВт), в том числе для автономного энергообеспечения в удаленных районах с отсутствием электро- и газоснабжения.

Альтернативой указанным способам сжигания жидких углеводородов является метод впрыскивания пара, который широко используется в дизельных двигателях [19] и газотурбинных установках [20] для уменьшения концентрации термических оксидов азота. Способ бессажного сжигания жидкого топлива, при котором для его горения используется перегретый водяной пар, предложен в Институте теплофизики СО РАН (г. Новосибирск) в 2003 г. [21] и продолжает активно развиваться под руководством С. В. Алексеенко. Получен ряд новых научных результатов при исследовании горения дизельного топлива [22, 23] и отработанного машинного масла [24] с подачей в зону горения струи перегретого водяного пара, разработаны оригинальные конструкции горелочных устройств [25, 26], которые позволяют эффективно сжигать некондиционные жидкие углеводороды. При использовании данного способа распыление топлива осуществляется высокоскоростной струей водяного пара, что исключает засорение узких топливных каналов форсунок при сжигании высоковязкого топлива и отходов.

Целью настоящей работы является создание горелочного устройства малой мощности для эффективного сжигания мазута с соблюдением экологических норм. Для этого проведены экспериментальные исследования по определению тепловых и экологических характеристик процесса сжигания мазута марки М-100 при его распылении струей перегретого водяного пара в лабораторном образце нового горелочного устройства.

**Экспериментальный стенд и методика измерений.** Для проведения экспериментальных исследований разработано новое горелочное устройство (рис. 1) на основе ранее предложенной конструкции с распылением топлива паровой струей [23], а также принципа стадийного сжигания. Горелка имеет следующие размеры: внешний диаметр камеры сгорания 60 мм, высота 140 мм, диаметр выходного отверстия 25 мм, диаметр паровой форсунки 1 мм, внутренний диаметр блока дожигания 80 мм, его высота 50 мм, диаметр выходного отверстия 40 мм, диаметр основания рассекателя конусной формы 40 мм, высота 20 мм. Блок дожигания (см. рис. 1), установленный на выходное сопло оригинального горелочного устройства [23], внутри которого по центру расположено тело обтекания конусообразной формы, обеспечивает образование зоны рециркуляции, повышающей степень сгорания топлива. Все элементы горелочного устройства выполнены из нержавеющей стали марки 12Х18Н10Т.

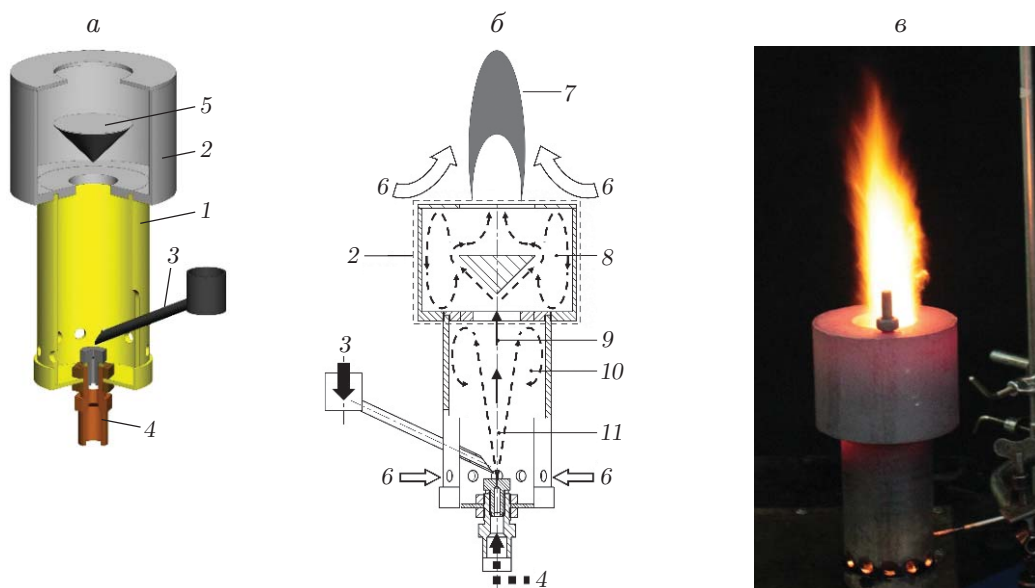


Рис. 1. Схема горелочного устройства (а), схема процесса сжигания мазута в горелочном устройстве (б) и факел горелки (в):

1 — камера газогенерации, 2 — блок дожигания, 3 — подача пара, 4 — подача топлива, 5 — рассекатель потока, 6 — воздух, 7 — пламя, 8 — зона рециркуляции, 9 — зона газификации ( $\text{H}_2\text{O} + \text{C} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$ ), 10 — область воспламенения, 11 — газок капельная струя

В горелочном устройстве реализована следующая схема сжигания жидкого топлива (см. рис. 1, б). Поток перегретого водяного пара истекает из форсунки в камеру сгорания горелочного устройства. В основание паровой струи подается жидкое топливо, в результате чего формируется мелкодисперсный газок капельный поток. В области натекания на внутреннюю плоскость сопла камеры в периферийной зоне формируется область рециркуляции, в которой инициируется воспламенение при пуске и стабилизируется воспламенение паротопливной струи при работе устройства. Факел, содержащий капли несгоревшего топлива, из камеры сгорания проникает в блок дожигания. В результате натекания реагирующего потока на рассекатель образуется зона рециркуляции, способствующая догоранию несгоревших частиц топлива. На выходе из горелки формируется устойчивый факел (см. рис. 1, в), не содержащий капель топлива, таким образом увеличивается степень сгорания топлива. Конструкцией предусмотрен естественный приток воздуха из атмосферы в зону реакции — через отверстия в нижней части корпуса.

Для получения тепловых и экологических характеристик использовались экспериментальные методики и оборудование, подробно описанные в работах [22, 23]: методы калориметрии — для измерения параметра тепловыделения  $q$  при сжигании мазута; термодарные измерения в факеле с использованием платинородий-платинородиевой термопары типа В (диаметр проволоки 0,3 мм); газовый состав равновесных продуктов сгорания определялся с помощью газоанализатора Testo 350 (рис. 2). Экспериментальный стенд для исследования сажепарового режима горения жидких углеводородов входит в состав уникальной научной установки «Крупномасштабный термогидродинамический стенд для исследования тепловых и газодинамических характеристик энергоустановок» [27].

**Результаты измерений.** При проведении экспериментальных исследований использовался мазут марки М-100 (84,8 % С — 11,3 % Н — 2,9 % S — 1 %  $\text{H}_2\text{O}$  — 0,3 % N) со следующими физическими и химическими характеристиками: плотность 957,56 кг/м<sup>3</sup>, вязкость при температуре 80 °С  $127,4 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с, минимальная и максимальная теплота сгорания 40,04 и 42,32 МДж/кг соответственно.

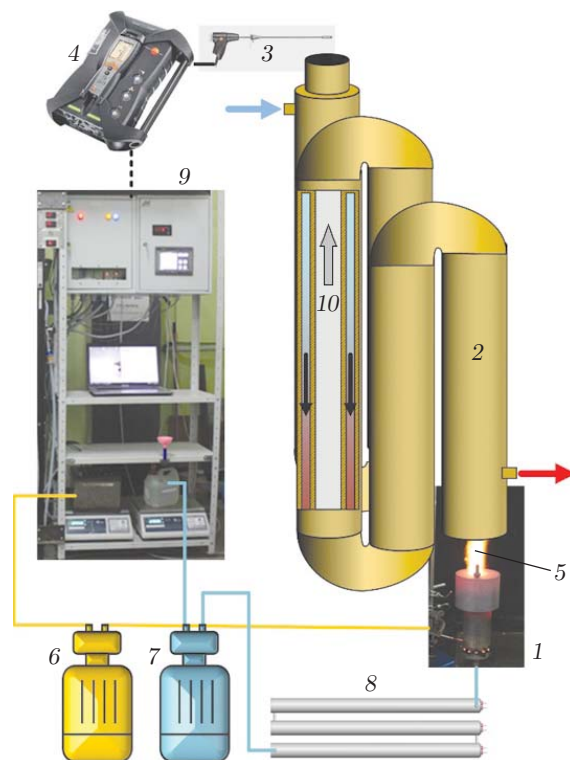


Рис. 2. Схема экспериментальной установки:

1 — горелочное устройство, 2 — проточный калориметр, 3 — пробоотборный зонд газоанализатора, 4 — рабочий блок газоанализатора, 5 — термопара, 6 — система подачи топлива, 7 — система подачи питающей воды, 8 — электрический парогенератор, 9 — шкаф управления экспериментальной установкой, 10 — продукты сгорания

Эксперименты проводились при различных условиях работы горелочного устройства. Расход топлива варьировался в диапазоне  $F_f = 0,4 \div 2,2$  кг/ч. Поскольку при температуре  $50\text{ }^\circ\text{C}$  мазут не течет, для уменьшения вязкости он предварительно нагревался до температуры, равной  $80\text{ }^\circ\text{C}$ . Расход пара менялся в диапазоне  $F_v = 0,2 \div 1,4$  кг/ч, температура пара была постоянной:  $T_s = 260 \pm 10\text{ }^\circ\text{C}$  (перегрев пара изменялся в диапазоне от  $65$  до  $110\text{ }^\circ\text{C}$ ). Расход топлива  $F_f$  соответствовал допустимой мощности горелочного устройства при лабораторных измерениях, диапазон значений  $F_v$  — рабочему диапазону дозирующего водяного насоса, а также производительности лабораторного парогенератора, необходимой для перегрева пара до заданной температуры. В [23] установлено, что температура пара не оказывает существенного влияния на показатели сжигания топлива, поэтому в настоящей работе ее значение не варьировалось.

Основным результатом проведенных испытаний является разработанная конструкция горелочного устройства малой мощности ( $W \geq 7$  кВт), в которой обеспечивается стабильное горение мазута в широком диапазоне значений режимных параметров при больших значениях полноты сжигания. Для исследуемых режимов работы горелочного устройства получены карты содержания монооксида углерода и оксидов азота в продуктах сгорания (рис. 3). Выявлены области с низкой концентрацией CO (менее  $100\text{ мл/м}^3$ ) и  $\text{NO}_x$  (менее  $250\text{ мл/м}^3$ ), в которых массовая концентрация пара в смеси с топливом приблизительно равна  $50\%$ . Граница области срыва пламени соответствует максимальной предельной концентрации пара ( $60\%$ ) и минимальной концентрации оксидов азота ( $150\text{ мл/м}^3$ ). Минимальные значения концентрации CO и  $\text{NO}_x$  соответствуют действующим экологичес-

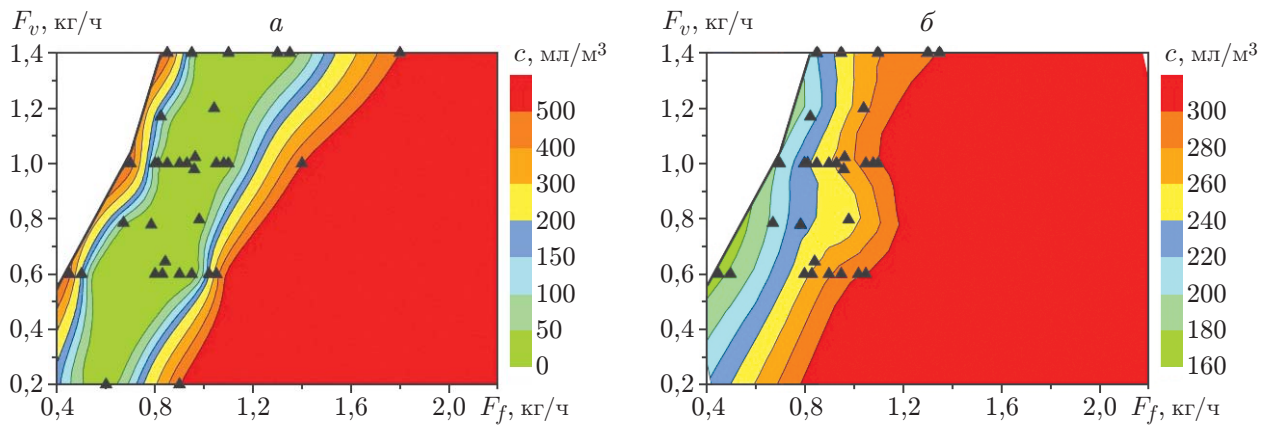


Рис. 3.  $(F_v-F_f)$ -диаграмма концентрации  $c$  оксидов CO (а) и  $\text{NO}_x$  (б) в продуктах сгорания при сжигании мазута (точки — экспериментальные данные)

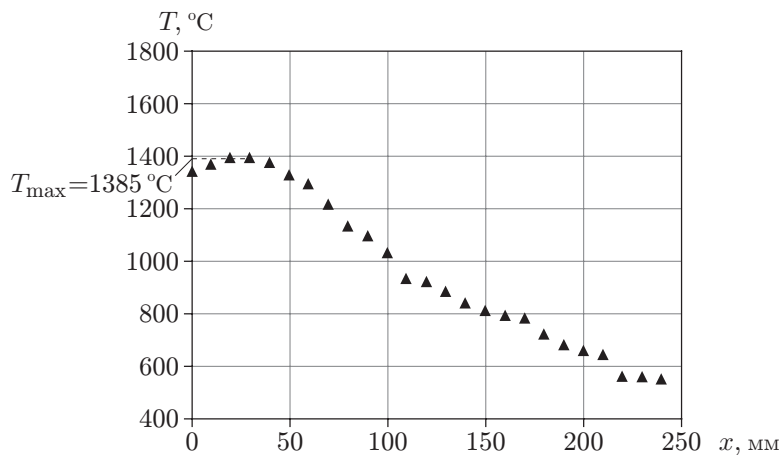


Рис. 4. Профиль осредненной по времени температуры во внешнем факеле горелки вдоль ее вертикальной оси при  $T_s = 260 \pm 10$  °С,  $F_f = 0,8$  кг/ч,  $F_v = 0,8$  кг/ч

ким нормативам [28]. С увеличением расхода пара концентрация оксидов азота в продуктах сгорания уменьшается (см. рис. 3,б), при этом максимальная температура пламени (рис. 4) составляет  $T_{\max} \approx 1400$  °С. При меньших значениях температуры концентрация образовавшихся термических оксидов азота уменьшается. Эти данные согласуются с результатами, полученными при сжигании дизельного топлива с подачей пара [23], а также с данными о впрыске пара в дизельный двигатель [19]. На рис. 5 приведены зависимости коэффициента полноты сгорания топлива  $\eta$  и мощности горелочного устройства  $W$  от расходов пара и топлива (полнота сгорания топлива  $\eta = (q/q_f) \cdot 100$  % определена как отношение количества тепла, фактически выделившегося при сгорании топлива массой 1 кг, к максимальной теплоте сгорания). В режимах с низкой концентрацией CO и  $\text{NO}_x$  имеет место большое значение полноты сгорания топлива, достигающее 99 %. Мощность горелочного устройства в исследуемом диапазоне значений расхода топлива меняется в диапазоне  $W = 7 \div 10$  кВт.

Таким образом, в результате проведенных испытаний получены большие значения экологических и теплотехнических характеристик сжигания мазута в перспективном горелочном устройстве малой мощности.

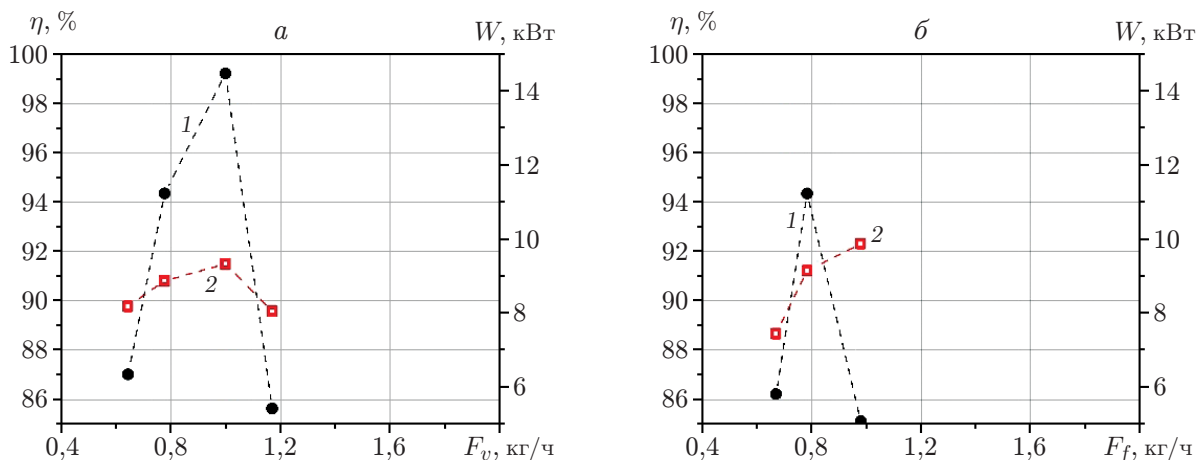


Рис. 5. Зависимости коэффициента полноты сгорания топлива  $\eta$  (1) и мощности горелочного устройства  $W$  (2) от расхода пара при постоянном расходе топлива  $F_f = 0,8$  кг/ч (а) и от расхода топлива при постоянном расходе пара  $F_v = 0,8$  кг/ч (б)

**Закключение.** Разработано перспективное горелочное устройство малой мощности ( $W \geq 7$  кВт) с распылением струей перегретого водяного пара, обеспечивающее стабильное горение мазута в широком диапазоне режимных параметров при больших значениях полноты сжигания. В результате проведенных комплексных экспериментальных исследований получены карты концентраций монооксида углерода и оксидов азота в продуктах сгорания. Минимальные значения концентрации СО (менее 100 мл/м<sup>3</sup>) и NO<sub>x</sub> (менее 250 мл/м<sup>3</sup>) достигаются при концентрации пара, приблизительно равной 50 %, и соответствуют действующим экологическим нормативам. При этом обеспечиваются большие значения полноты сгорания топлива ( $\eta \approx 99$  %). Полученные результаты могут быть использованы при разработке эффективных горелочных устройств для сжигания некондиционных жидких углеводородов и горючих отходов с целью получения тепловой энергии.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Heating** oil explained. Washington: U.S. Energy Inform. Administr., 2019. [Electron resource]. Режим доступа: <https://www.eia.gov/energyexplained/heating-oil/use-of-heating-oil.php>.
2. **Oil:** crude and petroleum products explained. Washington: U.S. Energy Inform. Administr., 2019. [Electron resource]. Режим доступа: <https://www.eia.gov/energyexplained/oil-and-petroleum-products/use-of-oil.php>.
3. **Abdul Jameel A. G., Han Y., Brignoli O., et al.** Heavy fuel oil pyrolysis and combustion: Kinetics and evolved gases investigated by TGA-FTIR // J. Anal. Appl. Pyrolysis. 2017. V. 127. P. 183–195. DOI: 10.1016/j.jaap.2017.08.008.
4. **Barroso J., Barreras F., Ballester J.** Behavior of a high-capacity steam boiler using heavy fuel oil. Pt 1. High-temperature corrosion // Fuel Process. Technol. 2004. V. 86, iss. 2. P. 89–105. DOI: 10.1016/j.fuproc.2003.12.006.
5. **Goldstein H. L., Siegmund C. W.** Influence of heavy fuel oil composition and boiler combustion conditions on particulate emissions // Environment. Sci. Technol. 1976. V. 10, N 12. P. 1109–1114. DOI: 10.1021/es60122a006.

6. **Sippula O., Hokkinen J., Puustinen H., et al.** Comparison of particle emissions from small heavy fuel oil and wood-fired boilers // *Atmospher. Environment*. 2009. V. 43, iss. 32. P. 4855–4864. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2009.07.022.
7. **Тумановский А. Г., Бабий В. И., Енякин Ю. П. и др.** Совершенствование технологий сжигания топлив // *Теплоэнергетика*. 1996. № 7. С. 30–39. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=15055485>.
8. **Mikaniki P., Najafi S. M. A., Ghassemi H.** Experimental study of a heavy fuel oil atomization by pressure-swirl injector in the application of entrained flow gasifier // *Chinese J. Chem. Engng.* 2019. V. 27, iss. 4. P. 765–771. DOI: 10.1016/j.cjche.2018.10.001.
9. **Garaniya V. B.** Modelling of heavy fuel oil spray combustion using continuous thermodynamics: Ph. D. Thesis. Newnham: Univ. Tasmania (Australian Maritime College), 2009.
10. **Schneider D. R., Bogdan Z.** Effect of heavy fuel oil/natural gas co-combustion on pollutant generation in retrofitted power plant // *Appl. Thermal Engng.* 2007. V. 27, iss. 11/12. P. 1944–1950. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2006.12.017.
11. **Miccio F., Okasha F. M.** Fluidized bed combustion and desulfurization of a heavy liquid fuel // *Chem. Engng J.* 2005. V. 105, iss. 3. P. 81–89. DOI: 10.1016/j.cej.2004.10.001.
12. **Khaleghi M. S. B., Markadeh R. S.** Thermodynamic evaluation of mazut gasification for using in power generation // *Petrol. Sci. Technol.* 2016. V. 34, iss. 6. P. 531–538. DOI: 10.1080/10916466.2016.1149491.
13. **Kouravand S., Kermani A. M.** Clean power production by simultaneous reduction of  $\text{NO}_x$  and  $\text{SO}_x$  contaminants using mazut nano-emulsion and wet flue gas desulfurization // *J. Cleaner Product.* 2018. V. 201. P. 229–235. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.017.
14. **Alahmer A., Yamin J., Sakhrieh A., Hamdan M. A.** Engine performance using emulsified diesel fuel // *Energy Convers. Management.* 2010. V. 51. P. 1708–1713. DOI: 10.1016/j.enconman.2009.11.044.
15. **Kannan K., Udayakumar M.**  $\text{NO}_x$  and HC emission control using water emulsified diesel in single cylinder diesel engine // *J. Engng Appl. Sci.* 2009. V. 4. P. 59–62.
16. **Andrews G. E., Bartle S. W., Pang S. W., et al.** Diesel/water emulsions. Influence on ignition delay and emissions // *Proceedings of the International Centre for Heat and Mass Transfer*. S. l.: Taylor and Francis Inc, 1989. P. 613–625.
17. **Jacques M. T., Jordan J. B., Williams A., Hadley-Coates L.** The combustion of water-in-oil emulsions and the influence of asphaltene content // *Symp. (Intern.) Combust.* 1977. V. 16, iss. 1. P. 307–319. DOI: 10.1016/S0082-0784(77)80334-2.
18. **Ballester M., Fueyo N., Dopazo C.** Combustion characteristics of heavy oil-water emulsions // *Fuel*. 1996. V. 75. P. 695–705. DOI: 10.1016/0016-2361(95)00309-6.
19. **Parlak A., Ayhan V., Üst Y.** New method to reduce  $\text{NO}_x$  emissions of diesel engines: electronically controlled steam injection system // *J. Energy Inst.* 2012. V. 85, N 3. P. 135–139.
20. **Farokhipour A., Hamidpour E., Amani E.** A numerical study of  $\text{NO}_x$  reduction by water spray injection in gas turbine combustion chambers // *Fuel*. 2018. V. 212. P. 173–186. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.10.033.
21. Пат. RU2219435 РФ, МКИ F 23 D 5/00, F 23 C 99/00, F 23 L 7/00. Способ бессажного сжигания топлива / М. С. Вигриянов, В. В. Саломатов, С. В. Алексеенко. Опубл. 20.12.2003.
22. **Anufriev I. S., Alekseenko S. V., Sharypov O. V., Kopyev E. P.** Diesel fuel combustion in a direct-flow evaporative burner with superheated steam supply // *Fuel*. 2019. V. 254. 115723. DOI: 10.1016/j.fuel.2019.115723.
23. **Anufriev I.S., Kopyev E. P.** Diesel fuel combustion by spraying in a superheated steam jet // *Fuel Process. Technol.* 2019. V. 192. P. 154–169. DOI: 10.1016/j.fuproc.2019.04.02742.

24. **Anufriev I. S., Alekseenko S. V., Kopyev E. P., Sharyпов O. V.** Combustion of ubstandard liquid hydrocarbons in atmosphere burners with steam gasification // J. Engng Thermophys. 2019. V. 28, N 3. P. 1–8. DOI: 10.1134/S1810232819030032.
25. **Пат. RU2684300 РФ, МКИ F 23 D 5/04, F 23 L 7/00.** Паромасляное горелочное устройство / И. С. Ануфриев, М. С. Вигриянов, С. В. Алексеенко, О. В. Шарыпов, Е. П. Копьев. Опубл. 05.04.2019.
26. **Пат. RU2647172 РФ, МКИ F 23 L 7/00, F 23 D 11/20, F 23 C 99/00.** Горелочное устройство / М. С. Вигриянов, И. С. Ануфриев, Е. П. Копьев, О. В. Шарыпов, Е. Ю. Шадрин. Опубл. 14.03.2018.
27. **Каталог** уникальных научных установок. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <http://скр-рф.ru/usu/73570>.
28. **DIN EN 267:2011-11.** Automatic forced draught burners for liquid fuels. Publ. 01.01.2011.

*Поступила в редакцию 20/III 2020 г.,  
после доработки — 20/III 2020 г.  
Принята к публикации 30/III 2020 г.*

---