УДК 62-643;536.463

ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ДИЗЕЛЬНОГО ТОПЛИВА ПРИ ЕГО РАСПЫЛЕНИИ ПЕРЕГРЕТЫМ ВОДЯНЫМ ПАРОМ В УСЛОВИЯХ ЗАКРЫТОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ

Е. П. Копьев, И. С. Садкин, М. А. Мухина, Е. Ю. Шадрин, И. С. Ануфриев

Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, kopyeve@itp.nsc.ru

На примере дизельного топлива впервые исследованы характеристики горения жидких углеводородов в струе перегретого водяного пара в условиях закрытого топочного пространства. Представлена модернизированная конструкция оригинального горелочного устройства малой мощности, основанная на принципе распыла топлива высокоскоростной струей пара, с возможностью регулировки подачи первичного и вторичного воздуха. Определены показатели вредных выбросов при изменении коэффициента избытка воздуха внутри топки. Впервые проведено сравнение разработанного горелочного устройства с серийным образцом жидкотопливного горелочного устройства — дизельной горелкой Weishaupt. Показано, что добавление перегретого водяного пара обеспечивает высокую полноту сгорания топлива и низкое содержание CO и NO_x в продуктах сгорания, отвечающее самым строгим европейским стандартам.

Ключевые слова: горелочное устройство, снижение вредных выбросов, перегретый водяной пар, низкоэмиссионное сжигание.

DOI 10.15372/FGV2022.9276

ВВЕДЕНИЕ

Резкое увеличение темпов загрязнения окружающей среды приводит к необходимости поиска новых технологий и совершенствования существующих методов снижения выбросов при сгорании топлива. Применяемые методы контроля выбросов NO_x , основанные на снижении пиковой температуры при горении, включают в себя ступенчатое сжигание [1, 2], рециркуляцию дымовых газов [3, 4], сжигание предварительно подготовленных бедных смесей [5–7], водотопливных эмульсий [8, 9], мягкое горение [10–12]. Еще одним методом получения более однородного поля температур, при котором пиковая температура снижается, является добавление газов-разбавителей [13, 14].

В качестве разбавителя большой интерес представляет водяной пар в связи с его дешевизной и легкодоступностью [15]. Добавление пара изменяет физические свойства и, в частности, температуру, что оказывает влияние на кинетику процесса горения, изменяя концентрацию активных радикалов, таких как H и OH. В свою очередь, увеличение количества радикалов OH способствует окислению CO до CO_2 [16, 17]. Добавление пара в систему сгорания уменьшает пиковую температуру из-за его высокой удельной теплоемкости, что приводит к снижению образования оксидов азота [18].

Целью настоящей работы является экспериментальное исследование горения дизельного топлива в струе пара в условиях камеры сгорания водогрейного котла с управлением коэффициентом избытка воздуха. Для реализации поставленной задачи был создан закрытый огневой экспериментальный стенд и новое горелочное устройство для сжигания жидкого топлива, распыляемого струей перегретого водяного пара в условиях закрытой камеры сгорания.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Для исследования тепловых и экологических характеристик сжигания жидких углеводородных топлив в присутствии перегретого водяного пара в условиях закрытой камеры сгорания был создан закрытый огневой экс-

Горелочное устройство изготовлено в рамках государственного задания ИТ СО РАН (АААА-121031800229-1). Исследование характеристик горелочного устройства выполнено в рамках гранта Правительства РФ для государственной поддержки исследований, проводимых под руководством ведущих ученых в вузах России (ведущий ученый К. Маркидес) (соглашение № 075-15-2022-1043).

[©] Копьев Е. П., Садкин И. С., Мухина М. А., Шадрин Е. Ю., Ануфриев И. С., 2023.



Рис. 1. Фотография измерительного участка закрытого огневого экспериментального стенда:

1 — горелочное устройство с принудительной подачей в зону реакции струи перегретого водяного пара и регулируемой подачей воздуха, 2 — котел Viessmann Vitola 200, 3 — контроллер управления котлом, 4 — электрический парогенератор, 5 — плунжерный дозирующий насос (для подачи воды), 6 — система подачи сжатого воздуха, 7 — расходомер сжатого воздуха MASS-VIEW, 8 — ноутбук, подключенный к автоматизированной системе управления парогенератором и подачи топлива, 9 — подача топлива, 10 — дымовая труба с активным охлаждением, 11 — аналоговоцифровой преобразователь, 12 — предохранительный клапан, 13 — блок газоанализатора, 14 зонд газоанализатора, 15 — система наддува воздуха, 16 — система вентиляции

периментальный стенд на базе жидкотопливного водогрейного котла Viessmann Vitola 200 (рис. 1).

Котел представляет собой объем (кольцевой теплообменник 0.061 м³), заполненный теплоносителем, в центре которого располагается цилиндрическая камера сгорания, в ко-



Рис. 2. Схема котловой установки:

1— кольцевой теплообменник, 2— камера сгорания, 3— горелочное устройство, 4— пламеотражатель, 5— теплопередающая стенка котла, 6— неохлаждаемый отвод с конденсатоприемником, 7— проточный калориметр по типу «труба в трубе»

торую устанавливается горелочное устройство (рис. 2). Для повышения теплоотдачи в камере сгорания установлен керамический пламеотражатель. Для снижения тепловых потерь с уходящими газами на выходе из котла была смонтирована дымовая труба с активным охлаждением, представляющая собой в нижней части утепленный неохлаждаемый отвод с конденсатоприемником, который переходит в проточный калориметр — конструкция «труба в трубе» длиной 1.2 м, без изгибов. Внешняя поверхность дымовой трубы теплоизолирована. В зоне выхода газов из трубы имеется вытяжное отверстие системы вентиляции, установленной на некотором расстоянии от выходной трубы калориметра, чтобы не создавать разрежения внутри камеры сгорания котла.

Установка оборудована автоматизированными системами управления и подачи топлива, генерации перегретого водяного пара заданных параметров, подачи сжатого воздуха внутрь горелочных устройств (подача воздуха под давлением) и наддува воздуха в камеру сгорания котла (рис. 3), что позволяет проводить экспе-



Рис. 3. Схема экспериментальной установки

риментальные исследования сжигания жидких углеводородных топлив в струе пара в условиях камеры сгорания водогрейного котла при регулируемой подаче первичного и вторичного воздуха.

Система подачи топлива является контурной. Для закачки топлива из топливного бака в прямую линию топливопровода использовался шестеренчатый насос с максимальным давлением подачи 8 атм. На конце прямой линии устанавливались дозирующая форсунка ZMZ6354 и регулятор давления топлива на 3 атм. Обратная связь по расходу топлива осуществляется при помощи электронных весов САS AD-10H (предел допускаемой погрешности 1 г), на которые устанавливается топливный бак. Также в топливной системе предусмотрены системы подогрева (до 110 °C) и грубой очистки для работы с высоковязким топливом.

Генерация перегретого водяного пара заданных параметров осуществляется в электрическом парогенераторе (средняя потребляемая мощность 1.5 кВт), который позволяет на выходе получать перегретый водяной пар с температурой до 550 °C, давлением до 2 МПа. Давление контролируется цифровым датчиком давления ОВЕН ПД-100 (погрешность 1 кПа). Стабильная подача воды в парогенератор обеспечивается плунжерным дозировочным насосом НД 0,5Р 1,6/100 K14A (класс точности — 0.5), расход до 1.6 л/ч. Масса воды контролируется при помощи электронных весов CAS AD-5H (предел допускаемой погрешности 0.5 г). Сжатый воздух подается из централизованной системы. На линии сжатого воздуха установлены редуктор и расходомер с игольчатым краном для регулировки расхода MASS-VIEW компания «Bronkhorst», диапазон измерения воздуха 0.1 ÷ 15.5 кг/ч. Система наддува воздуха в камеру сгорания включает в себя корпус с воздушным каналом и двигатель с установленными на привод лопатками. Регулировка наддува воздуха осуществляется заслонкой на выходе воздушного канала, а также регулятором напряжения, позволяющим менять частоту вращения приводного двигателя лопаток. Максимальное задаваемое значение подаваемого наддувом воздуха составляет до 100 кг/ч.



Рис. 4. Фотография и схема горелочного устройства

2. ГОРЕЛОЧНОЕ УСТРОЙСТВО

Для изучения характеристик процесса сжигания жидких углеводородных топлив в струе пара в условиях камеры сгорания водогрейного котла Viessmann Vitola 200 в ИТ СО РАН было создано горелочное устройство тепловой мощностью до 50 кВт, которое может работать в условиях закрытой камеры сгорания (рис. 4). Горелочное устройство состоит из корпуса в виде стакана; сопла на торце корпуса в виде крышки с отверстием в центре; паровой форсунки с паропроводом, установленной в дно корпуса; топливоподающей трубки. Габаритные размеры устройства: внутренний диаметр камеры газогенерации 60 мм, высота камеры 100 мм; диаметр отверстия паровой форсунки 0.6 мм. В горелке между дном (основанием) и корпусом имеется кольцевая зона принудительной подачи первичного воздуха, необходимого для инициирования воспламенения жидкого топлива и стабилизации пламени. Для того чтобы горелочное устройство работало в условиях закрытой камеры сгорания, его монтировали в систему наддува вторичного воздуха в крышке водогрейного котла.

На основе предыдущих решений [19, 20] в разрабатываемом устройстве реализован способ распыла топлива струей перегретого водяного пара. Такой способ имеет ряд преимуществ перед традиционными способами. А именно, за счет воздействия высокоскоростной струи перегретого водяного пара на капли топлива происходит первичная атомизация и создается однородный топливный спрей, что облегчает воспламенение, а также повышает полноту сгорания топлива. При этом реализованный способ распыления топлива струей пара (без использования топливной форсунки) исключает проблему засорения и коксования каналов подачи и дает возможность использовать горючие отходы с механическими примесями. При впрыске в камеру сгорания пара происходит реакция паровой газификации углеродосодержащих продуктов термического разложения и наблюдается неполное сгорание топлива с образованием водяного газа ($H_2O + C \rightarrow$ $CO + H_2$). Образующийся синтез-газ затем сгорает в пламени, что в совокупности ведет к повышению полноты сгорания топлива. Кроме того, при впрыске пара в зону горения увеличивается количество активных радикалов ОН, что позволяет снижать сажеобразование. За счет разбавления горючей смеси паром температурные максимумы пламени снижаются и образование термических оксидов азота сокрашается.

Указанные выше конструктивные особенности горелки и способа подачи и распыла топлива позволяют сжигать в разработанном горелочном устройстве широкий спектр жидких углеводородов без внесения изменений в конструкцию устройства.

3. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Полезная тепловая мощность от сжигания жидкого топлива в закрытом огневом экспериментальном стенде определялась как разность между тепловой энергией, полученной теплоносителем от продуктов реакции, и энергией, затрачиваемой на поддержание процесса (генерацию пара во внешнем электрогенераторе) в единицу времени. Температура теплоносителя с помощью температурных датчиков сопротивления (Pt1000) измерялась в нескольких точках: на входе и выходе установки, в тракте теплоносителя между проточным калориметром и кольцевым теплообменником (см. рис. 3). Вход холодного теплоносителя в установку осуществляется через проточный калориметр в месте выхода дымовых газов, против направления их движения. Такая схема движения теплоносителя и дымовых газов считается наиболее эффективной для съема максимально возможного количества тепла. После проточного калориметра теплоноситель поступает в кольцевой теплообменник, где идет наиболее активный нагрев, и горячий теплоноситель через объемный расходомер КАРАТ-520 выводится из стенда. В качестве теплоносителя используется вода.

Таким образом, количество тепла, полученное от продуктов сгорания топлива за время проведения эксперимента, определяется как сумма тепла, накопленного кольцевым теплообменником, и тепла, полученного теплоносителем (водой). Последнее вычисляется как разница количеств тепла, полученных теплоносителем на выходе из котла и на входе в проточный калориметр. За нулевой уровень принята тепловая энергия при температуре окружающей среды.

Для контроля состава газообразных продуктов горения в различных режимах работы устройств использовался газоанализатор TESTO 350, позволяющий измерять следующие компоненты (в скобках указан верхний предел измерений): O₂ (25 % об.), CO (500 ppm), NO (300 ppm), NO₂ (500 ppm), CO₂ (50 % об.) с погрешностью в пределах 5 %. Забор проб продуктов реакции проводился на выходе калориметра. Для анализа вредных выбросов и сопоставления полученных показателей с нормативными ограничениями использовались рекомендации, представленные в европейском стандарте для жидкотопливных горелочных устройств DIN EN 267 [21].

Таким образом, содержание СО и NO_x в дымовых газах, определяемое газоанализатором [ppm], пересчитывалось в удельные величины выбросов [мг/(кВт·ч)], чтобы можно было их сопоставить с нормативными документами и мировыми аналогами. Для пересчета концентраций NO_x и CO использовались следующие формулы (EN 267):

$$NO_x = NO_{x(ppm)} 2.056 \left(\frac{21}{21 - O_{meas}}\right) \left(\frac{V_0}{Q_{lhv}}\right), \quad (1)$$

$$\mathrm{CO} = \mathrm{CO}_{(\mathrm{ppm})} 1.25 \left(\frac{21}{21 - \mathrm{O}_{meas}}\right) \left(\frac{V_0}{Q_{lhv}}\right), \qquad (2)$$

где 2.056 и 1.25 — плотность соответственно NO_x и CO при нормальных условиях, кг/м³; NO_{x(ppm)} и CO_(ppm) — измеренное содержание соответствующих соединений в уходящих газах, ppm; О_{meas} — измеренное содержание кислорода в уходящих газах, % об.; V_0 — теоретический объем сухого воздуха, требуемый для полного сгорания 1 кг топлива, м³/кг; Q_{lhv} — низшая удельная теплота сгорания топлива, кВт·ч/кг.

4. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА И РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе предыдущих экспериментов на атмосферных горелочных устройствах [19, 20, 22, 23] (в том числе с регулируемой подачей первичного воздуха [20]) установлено, что для достижения наилучших экологических результатов при сжигании топлива в струе водяного пара оптимальная температура пара должна быть ≈250 °C [24]. Меньшие значения ведут к снижению положительных эффектов присутствия пара и ухудшению характеристик (особенно в случае перехода в область влажного пара), бо́льшие — к незначительным улучшениям, но при этом к непропорциональному росту затрат на парогенерацию.

В предыдущих работах также выявлено, что для большинства исследованных углеводородов (гептан, керосин, дизель, отработанное масло, мазут, нефть) значения оптимального соотношения пар/топливо с точки зрения баланса технической и экологической эффективности лежат в интервале 0.6 ÷ 0.8. Завышение относительного расхода пара, как и его занижение, ведет к срыву факела от чрезмерного «обводнения» или некачественного распыла и смесеобразования. Здесь же следует отметить, что важную роль играет диаметр паровой форсунки, который при постоянстве расхода пара определяет его давление и температуру насыщения. В предыдущих работах авторов диаметр форсунки составлял $0.6 \div 0.8$ мм,



Рис. 5. Зависимость содержания токсичных веществ от избытка воздуха в камере сгорания при сжигании в горелочном устройстве с впрыском перегретого водяного пара:

 $a,\, б$ — масса подаваемого первичного воздуха в камеру газоге
нерации 4.5 кг/ч, $e,\, z$ — 2.75 кг/ч

что позволяло поддерживать давление пара на уровне 5 ÷ 8 атм, достаточном для эффективного распыла жидких углеводородов в горелочных устройствах тепловой мощностью 10 ÷ 20 кВт с расходом топлива до 1.5 ÷ 2 кг/ч [25].

На основании результатов представленных выше исследований горелочное устройство было запущено и исследовано при сжигании дизельного топлива с расходом 1.2 кг/ч (15 кВт) и расходом перегретого водяного пара 1.0 кг/ч при перегреве ≈100 °С (температура пара ≈250 °С). Исследования проводились для двух режимов подачи первичного воздуха в камеру газогенерации — 2.75 и 4.5 кг/ч, которые были выбраны на основе ранее проведенных испытаний горелочного устройства аналогичного принципа действия с регулируемой подачей первичного воздуха, но с догоранием факела в открытой атмосфере со свободным притоком вторичного воздуха [20].

При варьировании подачи вторичного воздуха (наддува) была получена калибровочная зависимость содержания токсичных веществ (m_{fg} — массовое содержание веществ в уходящих газах, v_{fg} — их концентрация) от общего избытка воздуха в камере сгорания установки (рис. 5). Из полученных калибровочных кривых видно, что наименьшее содержание вредных веществ в продуктах сгорания (CO и NO_x) обеспечивается в диапазоне избытка воздуха $\alpha = 1.15 \div 1.4$. При этом минимум выбросов монооксида углерода наблюдается при $\alpha \approx 1.15$, что соответствует содержанию кислорода в уходящих газах $\approx 3 \%$ об. Выбросы оксидов азота в данном диапазоне изменяются незначительно.

Для режима с подачей первичного воздуха 4.5 кг/ч были получены следующие значения содержания монооксида углерода и оксидов азота: CO - 25 ppm, $NO_x - 40$ ppm, что эквивалентно CO — 32 мг/(кВт·ч), NO $_x$ — 85 мг/(кВт.ч). Для режима с подачей первичного воздуха 2.75 кг/ч эти показатели составили: CO — 34 ppm, NO_x — 28 ppm, что эквивалентно CO — 45 мг/(кВт·ч), NO $_x$ — 63 мг/(кВт·ч). По данному показателю в обоих исследуемых режимах горелочное устройство относится к классу 3 норматива DIN EN 267 [21] (выбросы CO — до 60 мг/(кВт·ч), NO $_x$ до 20 мг/(кВт·ч)). Однако режим с меньшим количеством подаваемого первичного воздуха предпочтительнее с точки зрения подавления образования оксидов азота, что согласуется с результатами [20]. В этом случае образуется аналог двухступенчатого сжигания с зоной предварительной газификации топлива внутри горелки и догоранием во внешнем факеле при вторичном дутье.

Измеренные количества полученного тепла для выбранных режимов составили 41.5 и 41.9 МДж/кг соответственно. С учетом погрешности измерительной системы (±2.5 %) и потерь тепла с уходящими газами, температура которых выше точки росы, это близко к значению низшей теплоты сгорания дизельного топлива 42.3 МДж/кг.

Кроме того, в рамках эксперимента было проведено сравнение вредных выбросов разработанного горелочного устройства с немецкой серийной дизельной горелкой Weishaupt WL5/1-B. Данная горелка предназначена для использования в коммунально-бытовых водогрейных котлах и в том числе подходит для котла Viessmann Vitola 200, на базе которого создан экспериментальный стенд.

Режимные параметры работы горелки Weishaupt WL5/1-В были приведены к сопоставимым значениям с параметрами разработанной горелки: расход дизельного топлива 1.2 кг/ч, исследуемый диапазон избытка воздуха $\alpha = 1.1 \div 1.5$.

Минимальные выбросы горелки Weishaupt составили 25 мг/(кВт·ч) для СО (в 1.4 раза ниже, чем у разработанного устройства) и 150 мг/(кВт·ч) для NO_x (в 2.4 раза выше, чем у разработанного устройства), что соответствует классу 2 норматива DIN EN 267 [21] и заявленным в паспорте характеристикам (СО — до 110 мг/(кВт·ч), NO_x — до 185 мг/(кВт·ч)). Таким образом, разработанное техническое решение с применением водяного пара позволило на 58 % снизить выбросы NO_x по сравнению с серийным аналогом.

Такое значительное снижение выбросов NO_x разработанным устройством согласуется с представленными в литературе исследованиями по снижению вредных выбросов путем добавления водяного пара в процессы горения. Так, в [26] показано, что в турбореактивных двигателях, работающих на керосине, пар может снизить выбросы NO_x вдвое при сохранении низкого уровня выбросов СО. В работах [27, 28] показано, что добавление водяного пара в количестве до 30 % позволяет в дизельном двигателе снизить выбросы NO_x на 48 %, но ведет к росту СО, а в случае этанол-дизельного топлива выбросы NO_x снижаются на 34 % при 20%-м добавлении пара [29]. Добавление пара эффективно и в условиях камеры сгорания газотурбинной установки, где его добавка в количестве 20 % по отношению к воздуху при сжигании природного газа уменьшает выбросы NO_x и CO до уровня ниже 10 ppm [30].

Таким образом, применение водяного пара является эффективным инструментом снижения выбросов в различных технических приложениях. Важно отметить, что наиболее сложно в горелочных устройствах добиться снижения именно оксидов азота. Предложенное техническое решение в разработанном авторами горелочном устройстве за счет впрыска пара в камеру сгорания позволило более чем вдвое снизить содержание NO_x по сравнению с серийной жидкотопливной горелкой Weishaupt и обладает эксплуатационными преимуществами за счет бесконтактного распыла топлива. В ходе экспериментов на котельной установке были подтверждены полученные ранее на атмосферных лабораторных горелках положительные эффекты от присутствия перегретого водяного пара, которые сохраняют свою актуальность и в условиях закрытого топочного пространства. Можно предположить, что данные эффекты будут присутствовать и при сжигании низкокачественных углеводородов. Их утилизация путем низкоэмиссионного сжигания является одной из целей разрабатываемого способа сжигания жидких углеводородов в струе водяного пара. Испытание разработанного устройства на отработанном масле представляется перспективным развитием данного исследования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено экспериментальное исследование характеристик горения дизельного топлива в струе перегретого водяного пара в разработанном горелочном устройстве в условиях камеры сгорания водогрейного котла с управлением коэффициентом избытка воздуха. Подтверждено снижение вредных выбросов при добавлении водяного пара в процессы горения, которые сохраняют актуальность и в условиях закрытого топочного пространства. Выбросы разработанного устройства соответствуют мировым стандартам и не уступают существующим серийным аналогам. Созданное горелочное устройство характеризуется относительно широким рабочим диапазоном как по количеству подаваемого пара и первичного воздуха, так и по общему избытку воздуха.

При использовании в созданном устройстве перегретого водяного пара с его массовым расходом свыше 50 % относительно топлива стабильное горение с низкими выбросами наблюдается при коэффициенте избытка воздуха 1.15 ÷ 1.4. Содержание токсичных веществ в продуктах сгорания удовлетворяет классу 3 европейского норматива жидкотопливных горелочных устройств DIN EN 267.

Наименьшие выбросы оксидов азота достигаются при коэффициенте избытка воздуха 1.15 и составляют 45 мг/(кВт·ч) для СО и 63 мг/(кВт·ч) для NO_x. Показатели по СО близки к характеристикам серийной немецкой горелки Weishaupt WL5/1-B, а выбросы NO_x в 2.4 раза ниже.

Из полученных результатов можно заключить, что предложенный принцип сжигания жидких углеводородов с распылением их перегретым водяным паром имеет ряд практических преимуществ перед существующими и широко применяющимися на практике решениями. Помимо низких показателей по содержанию вредных веществ в уходящих газах, конструкция горелочного устройства обеспечивает высокую полноту сгорания углеводородного топлива, отсутствие топливной системы высокого давления, проблем засорения и коксования каналов подачи топлива.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Zabetta E. C., Hupa M., Saviharju K. Reducing NO_x emissions using fuel staging, air staging, and selective noncatalytic reduction in synergy // Ind. Eng. Chem. Res. 2005. V. 44, N 13. P. 4552–4561. DOI: 10.1021/ie050051a.
- Elbaz A. M., Moneib H. A., Shebil K. M., Roberts W. L. Low NO_x-LPG staged combustion double swirl flames // Renew. Energy. — 2019. — V. 138. — P. 303–315. — DOI: 10.1016/j.renene.2019.01.070.
- 3. Dhyani V., Subramanian K. A. Control of backfire and NO_x emission reduction in a hydrogen fueled multi-cylinder spark ignition engine using cooled EGR and water injection strategies // Int. J. Hydrogen Energy. 2019. V. 44, N 12. P. 6287–6298. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.01.129.
- 4. Wang Z., Zhou S., Feng Y., Zhu Y. Research of NO_x reduction on a low-speed two-stroke marine diesel engine by using EGR (exhaust gas recirculation)–CB (cylinder bypass) and EGB (exhaust gas bypass) // Int. J. Hydrogen Energy. — 2017. — V. 42, N 30. — P. 19337– 19345. — DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.06.009.
- 5. Dhanuka S. K., Temme J. E., Driscoll J. F. Lean-limit combustion instabilities of a lean premixed prevaporized gas turbine combustor // Proc. Combust. Inst. — 2011. — V. 33, N 2. — P. 2961–2966. — DOI: 10.1016/j.proci.2010.07.011.
- 6. Kim K. T. Combustion instability feedback mechanisms in a lean-premixed swirlstabilized combustor // Combust. Flame. — 2016. — V. 171. — P. 137–151. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2016.06.003.
- Buschhagen T., Gejji R., Philo J., Tran L., Bilbao J. E. P., Slabaugh C. D. Selfexcited transverse combustion instabilities in a high pressure lean premixed jet flame // Proc. Combust. Inst. — 2019. — V. 37, N 4. — P. 5181– 5188. — DOI: 10.1016/j.proci.2018.07.086.
- 8. Basha J. S., Anand R. B. An experimental study in a CI engine using nanoadditive blended water-diesel emulsion fuel // Int. J. Green Energy. 2011. V. 8, N 3. P. 332–348. DOI: 10.1080/15435075.2011.557844.
- Ithnin A. M., Ahmad M. A., Bakar M. A. A., Rajoo S., Yahya W. J. Combustion performance and emission analysis of diesel engine fuelled with water-in-diesel emulsion fuel made from low-grade diesel fuel // Energy Conver. Manag. — 2015. — V. 90. — P. 375– 382. — DOI: 10.1016/j.enconman.2014.11.025.
- Cavaliere A., De Joannon M. Mild combustion // Prog. Energy Combust. Sci. — 2004. — V. 30, N 4. — P. 329–366. — DOI: 10.1016/j.pecs.2004.02.003.
- 11. Sabia P., Lavadera M. L., Giudicianni P., Sorrentino G., Ragucci R., de Joannon M.

 CO_2 and H_2O effect on propane autoignition delay times under mild combustion operative conditions // Combust. Flame. — 2015. — V. 162, N 3. — P. 533–543. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2014.08.009.

- Dally B. B., Riesmeier E., Peters N. Effect of fuel mixture on moderate and intense low oxygen dilution combustion // Combust. Flame. — 2004. — V. 137, N 4. — P. 418–431. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2004.02.011.
- 13. Li W., Liu Z., Wang Z., Xu Y. Experimental investigation of the thermal and diluent effects of EGR components on combustion and NO_x emissions of a turbocharged natural gas SI engine // Energy Convers. Manag. — 2014. — V. 88. — P. 1041–1050. — DOI: 10.1016/j.enconman.2014.09.051.
- Mohapatra S., Nehe P., Dash S. K., Vanteru M. R. Numerical analysis of lifted spray flames in various coflow conditions // Combust. Sci. Technol. 2019. V. 192, N 4. P. 680–700. DOI: 10.1080/00102202.2019.1590824.
- Farokhipour A., Hamidpour E., Amani E. A numerical study of 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.
- 16. Donohoe N., Heufer K. A., Aul C. J., Petersen E. L., Bourque G., Gordon R., Curran H. J. Influence of steam dilution on the ignition of hydrogen, syngas and natural gas blends at elevated pressures // Combust. Flame. — 2015. — V. 162, N 4. — P. 1126–1135. — DOI: 10.1016/j.combustflame.2014.10.005.
- Li Sh., Li S., Mira D., Zhu M., Jiang X. Investigation of dilution effects on partially premixed swirling syngas flames using a LES-LEM approach // J. Energy Inst. — 2018. — V. 91, N 6. — P. 902–915. — DOI: 10.1016/j.joei.2017.09.005.
- Mohapatra S., Garnayak S., Lee B. J., Elbaz A. M., Roberts W. L., Dash S. K., Reddy V. M. Numerical and chemical kinetic analysis to evaluate the effect of steam dilution and pressure on combustion of *n*dodecane in a swirling flow environment // Fuel. — 2021. — V. 288. — 119710. — DOI: 10.1016/j.fuel.2020.119710.
- 19. Anufriev I. S., Kopyev E. P., Sadkin I. S., Mukhina M. A. NO_x reduction by steam injection method during liquid fuel and waste burning // Process Saf. Environ. Prot. — 2021. — V. 152. — P. 240–248. — DOI: 10.1016/j.psep.2021.06.016.
- Р., **S**., 20. Anufriev Kopyev E. I. Alekseenko S. V., Sharypov Vigriyanov M. S. New ecc V., О. ecology safe waste-to-energy technology of liquid fuel combustion with superheated steam // Energy. — 2022. — $\dot{V}.$ 250. 123849.DOI: 10.1016/j.energy.2022.123849.

- 21. **DIN EN** 267:2011-11. Automatic forced draught burners for liquid fuels.
- 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.2019.04.027.
- 23. Anufriev I. S., Kopyev E. P., Mukhina M. A., Sadkin I. S. Investigation into characteristics of combustion of *n*-heptane sprayed by jet of steam or air // J. Eng. Thermophys. — 2022. — V. 31, N 3. — P. 420–428. — DOI: 10.1134/S1810232822030055.
- 24. 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.
- 25. Anufriev I. S., Shadrin E. Yu., Ko-pyev E. P., Alekseenko S. V., Sharypov O. V. Study of liquid hydro-carbons atomization by supersonic air or steam jet // Appl. Therm. Eng. 2019. V. 163. 114400. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114400.
- 26. Benini E., Pandolfo S., Zoppellari S. Reduction of NO emissions in a turbojet combustor by direct water/steam injection: numerical and experimental assessment // Appl. Therm. Eng. 2009. V. 29. P. 3506–3510. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2009.06.004.
- 27. Gonca G., Sahin B., Ust Y., Parlak A., Safa A. Comparison of steam injected diesel engine and Miller cycled diesel engine by using two zone combustion model // J. Energy Inst. 2015. V. 88, N 1. P. 43–52. DOI: 10.1016/j.joei.2014.04.007.
- 28. Gonca G., Sahin B., Parlak A., Ust Y., Ayhan V., Cesur I., Boru B. The effects of steam injection on the performance and emission parameters of a Miller cycle diesel engine // Energy. — 2014. — V. 78. — P. 266–275. — DOI: 10.1016/j.energy.2014.10.002.
- 29. Gonca G. Investigation of the effects of steam injection on performance and NO emissions of a diesel engine running with ethanol-diesel blend // Energy Convers. Manag. 2014. V. 77. P. 450–457. DOI: 10.1016/j.enconman.2013.09.031.
- 30. Göke S., Schimek S., Terhaar S., Reichel T., Göckeler K., Krüger O., Fleck J., Griebel P., Paschereit C. O. Influence of pressure and steam dilution on NO_x and CO emissions in a premixed natural gas flame // J. Eng. Gas Turbines Power. 2014. V. 136. 091508. DOI: 10.1115/1.4026942.

Поступила в редакцию 05.12.2022. Принята к публикации 14.12.2022.