

УДК 62-643;544.452

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГОРЕНИЯ ЖИДКИХ УГЛЕВОДОРОДОВ В УСЛОВИЯХ ПАРОВОЙ ГАЗИФИКАЦИИ В ПРИСУТСТВИИ ГАЗА-РАЗБАВИТЕЛЯ

Е. П. Копьев¹, Е. Ю. Шадрин¹, И. С. Садкин¹, М. А. Мухина¹,
С. Ю. Шимченко²

¹Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 630090 Новосибирск, kopyeve@itp.nsc.ru

²Институт тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова НАН Беларуси, 220072 Минск, Беларусь

На примере дизельного топлива исследованы характеристики сжигания жидких углеводородов в присутствии смеси перегретого водяного пара с газом-разбавителем в горелочном устройстве испарительного типа. В качестве газа-разбавителя использовался углекислый газ. В ходе экспериментов найдены режимы подачи перегретого водяного пара или вместо него углекислого газа, а также их смеси в различных пропорциях, обеспечивающие схожий профиль средней температуры в пламени, значений тепловой мощности и коэффициента избытка воздуха. Показано, что при сжигании топлива в присутствии перегретого водяного пара, углекислого газа и их смеси достигаются низкие концентрации CO и NO_x в продуктах сгорания. При подаче CO₂ эти значения находятся на границе допустимых концентраций для 3 класса по нормативу EN:267. В случае же подачи только перегретого водяного пара наблюдается более низкое содержание оксидов азота в уходящих газах по сравнению с углекислым газом: снижение концентрации NO_x достигает 15 %.

Ключевые слова: жидкие углеводороды, горение, пар, газ-разбавитель, газовый анализ, полнота сгорания, NO_x.

DOI 10.15372/FGV20220408

ВВЕДЕНИЕ

Воздействие на окружающую среду и накопление углеводородных отходов стали причиной повышенного внимания к задачам, связанным с повышением эффективности сгорания углеводородных топлив и сокращением выбросов при производстве тепла и электроэнергии. Решение данного вопроса может быть реализовано различными способами. Одним из них является подход низкотемпературного сгорания. Основная идея этого подхода заключается в использовании системы рециркуляции выхлопных газов для уменьшения скорости химической реакции окисления вследствие снижения температуры горючей смеси [1]. Таким образом, воспламенение углеводородов в усло-

виях низких температур позволяет получить одновременно снижение выбросов NO_x и сажи [2, 3]. В работе [4] показано, что присутствие CO₂ в гептановоздушной смеси приводит к увеличению задержки воспламенения как первой стадии, так и второй при определенных концентрациях газа-разбавителя.

В качестве газа-разбавителя могут также использоваться вода или водяной пар. Известно, что вода и пар применяются на практике для решения целого ряда задач: от снижения тепловой нагрузки и подавления детонации [5] в камере сгорания до диспергирования тяжелых топлив и сжигания водотопливных эмульсий, а также эффективного снижения выбросов NO_x, для которых, как показано в [6], использование технологии впрыска пара эффективнее технологии рециркуляционных газов. Снижение выбросов NO_x обычно связывают с повышением теплоемкости смеси при горении водородовоздушной [7] и метановоздушной [8, 9] смесей, а также смеси пропан-бутана с воздухом [10]. В то же время в ряде работ [11] отмечают, что добавление водяного пара приводит

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований совместно с Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований (проект № 20-58-04011). Расчет и подбор режимных параметров подачи смеси выполнены в рамках государственного задания ИТ СО РАН (AAAA-121031800229-1).

© Копьев Е. П., Шадрин Е. Ю., Садкин И. С., Мухина М. А., Шимченко С. Ю., 2022.

не только к разбавлению горючей смеси (физический эффект), но и к изменению протекания некоторых элементарных реакций (химический эффект).

Ранее авторами работы были проведены исследования процессов горения некондиционных жидких углеводородных топлив и производственных отходов с подачей в зону горения струи перегретого водяного пара. Результаты по сжиганию дизельного топлива и отработанного машинного масла в разработанных перспективных прямоточных горелочных устройствах опубликованы в работах [12–14]. Использование перегретого водяного пара позволило снизить содержание оксидов азота в отработанных газах до 30 % при высокой полноте сжигания низкокачественного топлива. Такой эффект предположительно связан со снижением температуры пламени, за счет чего сокращается образование «термического» NO_x , а также связан с протеканием паровой газификации, что позволяет сохранить высокую полноту сжигания топлива. Данный способ сжигания является одним из перспективных путей утилизации низкокачественных топлив и производственных отходов, которые могут быть подвержены сжиганию: отходы нефтедобычи и нефтепереработки, отработанные масла, смазочные жидкости и др. Однако кинетика горения жидких углеводородов, особенно некондиционных, при впрыске пара остается малоизученной, точные механизмы до сих пор не раскрыты, что не позволяет проводить достоверные численные расчеты при проектировании горелочных устройств. В настоящей работе проведено изучение характеристик сжигания жидких углеводородов в присутствии смеси перегретого водяного пара с газом-разбавителем в горелочном устройстве испарительного типа.

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ

Исследование проведено на лабораторном образце испарительного атмосферного горелочного устройства, схема которого показана на рис. 1. Основные части горелочного устройства: цилиндрический корпус, топочная камера с форкамерой, паровые форсунки, камера газогенерации и выходное сопло (материал — нержавеющая сталь). В нижней части топочной камеры имеются отверстия для естественного притока воздуха из атмосферы. Атмосферный воздух необходим для воспламенения

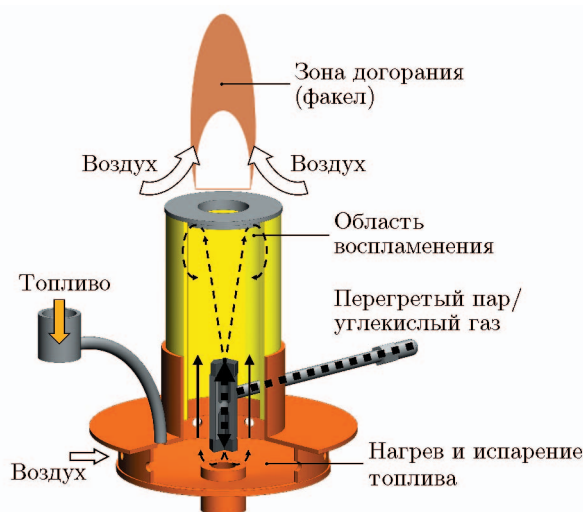


Рис. 1. Схема лабораторного испарительного атмосферного горелочного устройства, в котором реализован способ подачи перегретого водяного пара [13]

испаряющегося жидкого топлива в топочной камере. Устройство работает следующим образом. В топочную камеру подается топливо через топливопровод. В начальный момент времени топливо воспламеняется от внешнего пламени (от газовой горелки) и горит со свободной поверхности. В результате сжигание происходит со значительным недожогом — образуется большое количество сажи. В горелочном устройстве над топочной камерой у основания камеры газогенерации соосно установлены две паровые форсунки, соединенные с внешним парогенератором и ориентированные вертикально вверх и вниз. Из внешнего парогенератора подается перегретый водяной пар, который проходит через форсунки, и в результате образуются две высокоскоростные паровые струи, одна идет вниз в топочную камеру, другая — вверх в камеру газогенерации. Подача струи пара вниз в топочную камеру позволяет повысить температуру элементов топки и предотвращает коксование поверхностей. При подаче вверх в камеру газогенерации струя пара взаимодействует с продуктами термического разложения и неполного сгорания горючего (газификация). Образующаяся горючая смесь догорает в факеле, смешиваясь с кислородом из внешней атмосферы. Более подробно работа устройства описана в [13].

Горелочное устройство монтировалось в экспериментальную установку, которая приме-

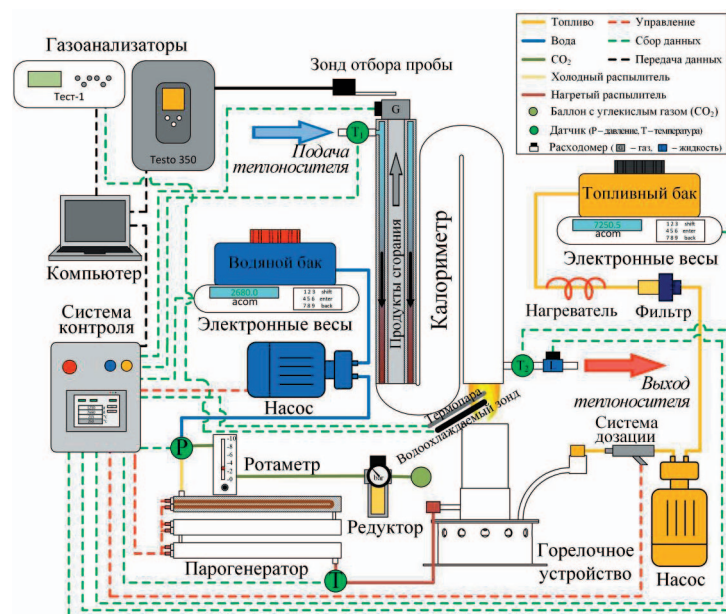


Рис. 2. Схема экспериментальной установки [13]

нялась авторами ранее в экспериментальных исследованиях тепловых и экологических показателей горелочных устройств различного типа [13–16]. Основными элементами стенда являются система подачи воды, электрический парогенератор, система подачи топлива, система подогрева топлива, горелочное устройство, калориметр и система газового анализа (рис. 2). Установка входит в состав уникальной установки УСУ «Крупномасштабный термогидродинамический стенд для исследования тепловых и газодинамических характеристик энергоустановок» [17]. Стабильный массовый расход топлива (до 2 кг/ч) задается топливной форсункой и насосом, масса контролируется при помощи электронных весов Acom PC-100W-10H (предел допускаемой погрешности 1 г). Для высоковязкого топлива используются системы подогрева (до 110 °C) и грубой очистки. Электрический парогенератор (средняя потребляемая мощность 1.5 кВт) позволяет на выходе получать перегретый водяной пар со следующими параметрами: температура до 550 °C, давление до 2 МПа, массовый расход до 1.4 кг/ч [18]. Стабильная подача воды в парогенератор обеспечивается плунжерным дозировочным насосом НД 0,5Р 1,6/100 К14А (класс точности 0.5), расход до 1.6 л/ч. Масса воды контролируется при помощи электронных весов Acom PC-100W-5 (предел допускаемой погрешности 0.5 г). Более подробно схема и прин-

цип работы установки изложены в [13].

В качестве газа-разбавителя использовался углекислый газ, который подавался в парогенератор в месте подачи воды (см. рис. 2). Каналы парогенератора имеют прямоугольное сечение 4×2 мм, а их суммарная длина составляет 18 м [18], что обеспечивает однородность смешения перегретого пара и разбавителя. Таким образом обеспечивались режимы работы горелочного устройства, в которых перегретый водяной пар постепенно замещался углекислым газом с той же температурой и тем же местом подачи, что позволяло проводить сравнительный анализ работы горелочного устройства при различных разбавителях (перегретый пар, углекислый газ и их смесь).

В данной работе экспериментально исследовались следующие показатели процесса сжигания: температура факела, состав промежуточных и конечных продуктов сгорания, полнота сгорания топлива при различных режимах работы устройства.

Температура во внешнем факеле в плоскости симметрии горелки измерялась платиноводород-платиноводородной термопарой (тип В). Рабочий спай термопары диаметром 0.3 мм перемещался при помощи автоматизированного координатно-перемещающего устройства (пространственный шаг 10 мм вдоль факела и 3 мм в радиальном направлении, время измерения в точке не менее

10 с, время задержки перед измерениями в точке 7 с).

Для проведения газового анализа промежуточных продуктов реакции в пламени горелки использовался газоанализатор Тест-1. Прибор позволяет регистрировать следующие компоненты (проценты даны по объему): CO ($0 \div 10$ %), H_2 ($0 \div 40$ %), C_nH_m ($0 \div 20$ %), CO_2 ($0 \div 20$ %), O_2 ($0 \div 21$ %), NO ($0 \div 5000$ ppm), NO_2 ($0 \div 3000$ ppm). Погрешности измерения концентраций компонентов: CO — ± 0.2 % (абс.) в диапазоне измеряемых значений $C = 0 \div 5$ % и ± 5 % (отн.) при $C > 5$ %; H_2 — ± 5 % (отн.); C_nH_m — ± 0.2 % (абс.) в диапазоне $C = 0 \div 5$ % и ± 5 % (отн.) при $C > 5$ %; CO_2 — ± 0.2 % (абс.) в диапазоне $C = 0 \div 7$ % и ± 5 % (отн.) при $C > 7$ %; O_2 — ± 0.2 % (абс.); NO — ± 9 ppm (абс.) в диапазоне $C = 0 \div 250$ ppm и ± 5 % (отн.) при $C > 250$ ppm; NO_2 — ± 10 ppm (абс.) в диапазоне $C = 0 \div 300$ ppm и ± 5 % (отн.) при $C > 300$ ppm.

Для контроля состава газообразных конечных продуктов горения (O_2 , CO, NO, NO_2 , SO_2 , CO_2) использовался газоанализатор Testo 350 (погрешность измерения ± 5 %). Забор проб продуктов реакции производился на выходе проточного калориметра, который использовался для определения полноты сгорания топлива в горелочном устройстве. Количество тепла определялось по разности температур теплоносителя на выходе и входе при заданном расходе (суммарная погрешность измерения ± 2.5 %) [13].

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Исследование характеристик пламени, тепловыделения, состава конечных продуктов сгорания проводилось при различных режимах работы горелочного устройства (табл. 1): при расходе пара $F_v = 0 \div 0.8$ кг/ч, расходе углекислого газа $F_{CO_2} = 0 \div 1.3$ кг/ч и стабильном расходе топлива $F_f = 0.8$ кг/ч (отклонения при регулировке от заданных средних значений расходов — в пределах ± 5 % для пара и углекислого газа и ± 2.5 % для топлива). Подбор параметров подаваемой газовой смеси осуществлялся исходя из того, что во всех рабочих режимах горелочного устройства импульс струи Y_{jet} должен быть одинаковым. Тем самым обеспечиваются схожие параметры горения, в том числе за счет подсоса воздуха из окружающей среды, создаваемого исходящими

Таблица 1

Исследуемые режимы работы горелочного устройства при подаче перегретого водяного пара, углекислого газа и их смеси

Номер режима	F_{CO_2} , кг/ч	Y_{jet, CO_2} , Н	F_{H_2O} , кг/ч	Y_{jet, H_2O} , Н	ΣY_{jet} , Н
1	0	0	0.8	0.198	0.198
2	0.33	0.048	0.6	0.148	0.196
3	0.63	0.098	0.4	0.098	0.196
4	0.95	0.146	0.2	0.050	0.196
5	1.27	0.198	0	0	0.198

из форсунок струями газа [15]. Температура подаваемой смеси T_v/CO_2 устанавливалась 250 ± 10 °С. Для проведения исследований использовалось дизельное топливо.

При помощи термопарных измерений были получены профили средней температуры в пламени вдоль оси симметрии устройства (рис. 3). Во всех режимах профили имеют схожий вид. При добавлении перегретого водяного пара наблюдается небольшое снижение температуры пламени на ≈ 60 °С, что, в частности, связано с тем, что теплоемкость пара (2.14 кДж/(кг·К)) больше, чем углекислого газа (1.05 кДж/(кг·К)). Различие расходов при подаче только одного из типов разбавителей составило $1 : 1.6$ соответственно (режимы 1 и 5,

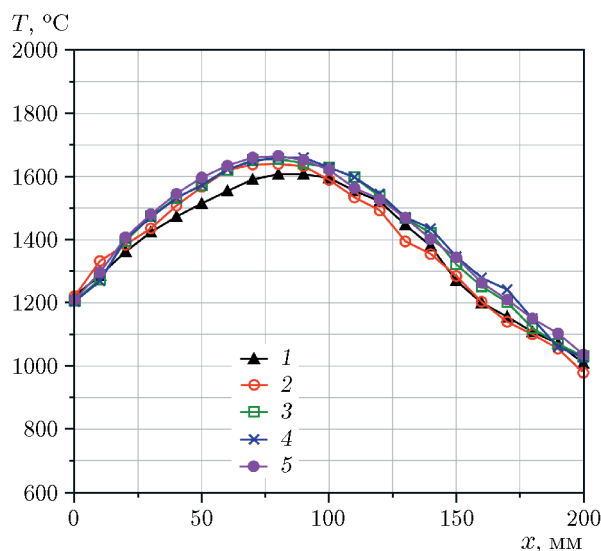


Рис. 3. Распределение средней температуры по оси симметрии пламени:

номера режимов соответствуют номерам в табл. 1

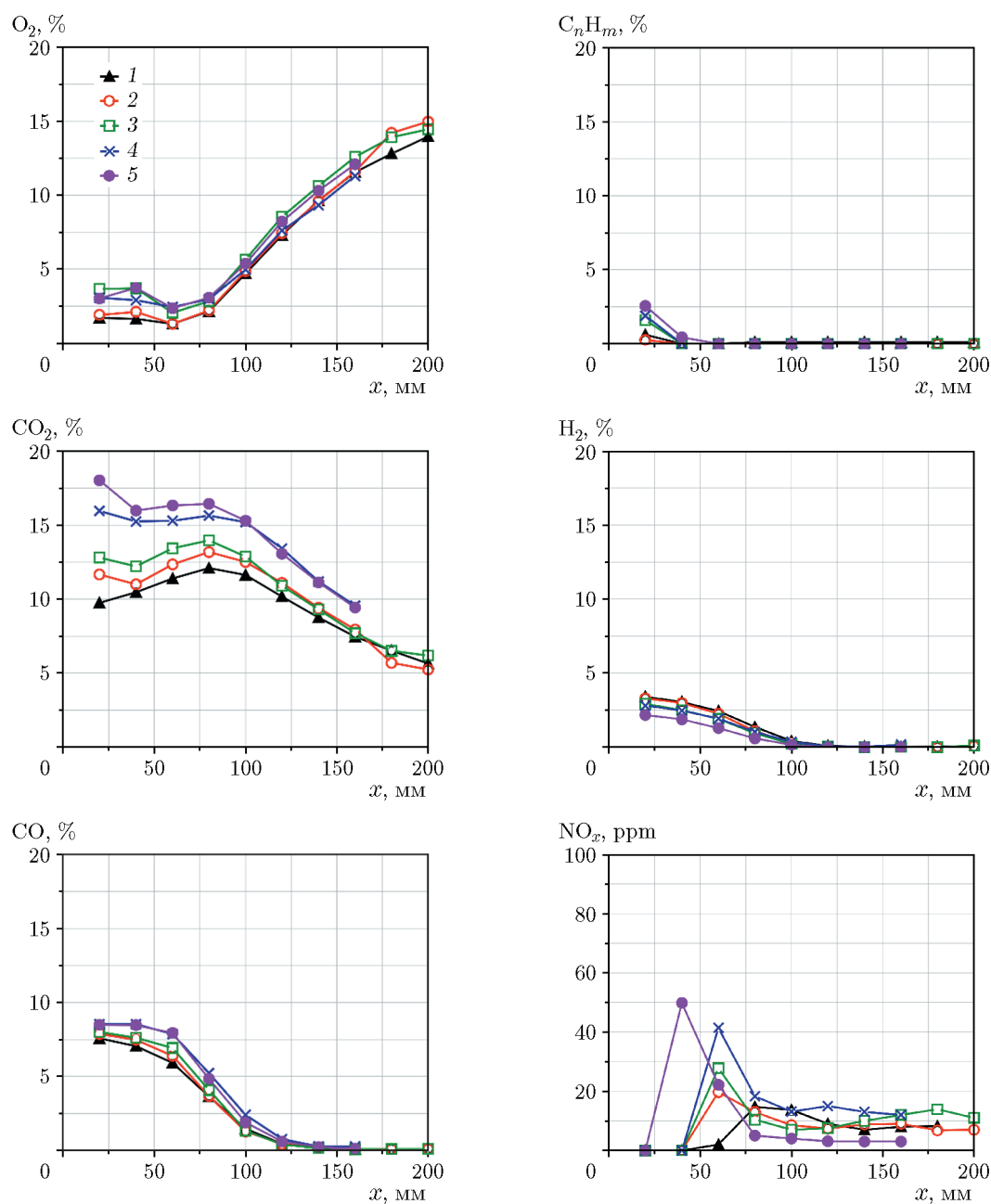


Рис. 4. Объемная доля компонентов в пламени вдоль вертикальной оси сопла горелочного устройства:

номера режимов соответствуют номерам в табл. 1

табл. 1). При этом схожесть профилей температуры свидетельствует о том, что замещение подачи пара нагретым углекислым газом не вносит значительных изменений в рабочий режим горелочного устройства. Для всех режимов максимум температуры ($1610 \div 1670$ °C) достигается на некотором расстоянии от основания пламени, что говорит о доокислении про-

дуктов реакции по мере их выхода из камеры газогенерации горелочного устройства.

Результаты промежуточных газовых компонентов в пламени устройства (рис. 4) показывают, что при замещении перегретого пара углекислым газом наблюдается рост в основании пламени максимальных значений CO до 35 %, C_nH_m — в четыре раза и снижение H₂

до 60 %. Отмечается существенный рост (до 50 ppm) максимальных значений NO_x вдоль оси симметрии пламени. Схожие профили O_2 указывают на то, что выбранные режимы подачи углекислого газа и его смеси с перегретым паром обеспечивают равный подсос и смешение с воздухом, как и в случае подачи только перегретого водяного пара. Однако у основания пламени концентрация O_2 увеличивается по мере добавления углекислого газа в струю перегретого пара, что, вероятно, в совокупности с ростом содержания CO может быть связано с распадом CO_2 в камере газогенерации на монооксид углерода и кислород. Рост NO_x связан с более высокой температурой пламени и с увеличением содержания кислорода в основании пламени [19]. Более низкие концентрации C_nH_m и H_2 в случае добавления перегретого водяного пара могут быть связаны с ускорением реакций, включающих радикал OH [19], а также с паровой газификацией [13].

Результаты, полученные на проточном калориметре (табл. 2), показали, что для всех режимов обеспечивается высокая полнота сгорания топлива $Q \approx 44.5$ МДж/кг, что в пределах погрешности близко к наивысшей теплоте сгорания дизельного топлива. Анализ же конечных продуктов сгорания демонстрирует, что массовое содержание CO в уходящих газах не зависит от состава подаваемой смеси (рис. 5). Однако при подаче только перегретого водяного пара (без добавления CO_2) обеспечиваются лучшие показатели по содержанию оксидов азота. А именно, при увеличении доли углекислого газа в смеси наблюдается рост массового содержания NO_x в уходящих газах, отнесенного к 1 кг сжигаемого топлива. Рост NO_x составляет около 15 % при полном замещении перегретого водяного пара углекислым

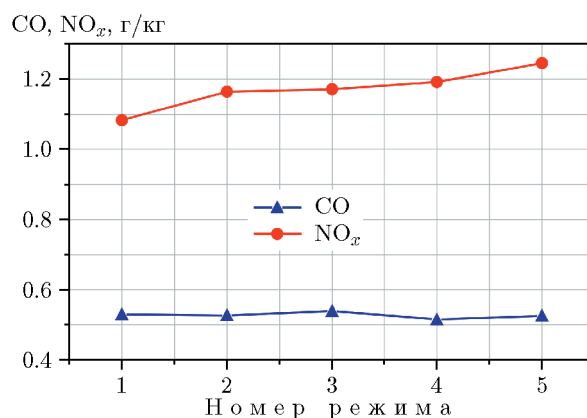


Рис. 5. Массовая доля CO и NO_x в конечных продуктах сгорания

газом, что связано как с более высокой температурой пламени, так и с увеличением количества кислорода в камере газогенерации у основания пламени, вызванных распадом CO_2 . По содержанию кислорода в конечных продуктах сгорания сделана оценка количества вовлеченного воздуха при сжигании топлива в различных режимах (F_{air} в табл. 2). Из табл. 2 видно, что выбранные расходы перегретого пара и углекислого газа обеспечивают одинаковые режимные параметры работы горелочного устройства, в частности коэффициент избытка воздуха α .

Из сопоставления полученных значений для различных режимов с нормативными показателями EN:267 [20] можно сделать вывод, что как для перегретого пара, так и для углекислого газа и их смеси полученные значения для монооксида углерода и оксидов азота удовлетворяют самому строгому 3 классу. Однако в случае подачи CO_2 содержание оксидов азота близко к границе допустимых концентраций, что делает использование перегретого водяного пара предпочтительнее при варьировании рабочих параметров устройства для практических приложений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе на примере дизельного топлива проведено изучение характеристик сжигания жидких углеводородов в присутствии смеси перегретого водяного пара с газом-разбавителем в горелочном устройстве испарительного типа. В качестве газа-разбавителя использовался углекислый газ. Параметры подаваемой газовой смеси подбирались исходя из того, что для всех

Таблица 2
Полученные режимные параметры работы горелочного устройства

Номер режима	F_f , кг/ч	T , °C	Q , МДж/кг	F_{air} , м³/ч	α
1	0.8	250 ± 10	44.5	13.4	1.29
2			44.6	13.7	1.32
3			44.4	13.6	1.31
4			44.5	13.4	1.29
5			44.4	13.3	1.28

рабочих режимов горелочного устройства импульс струи одинаков.

Показано, что при замещении перегретого водяного пара углекислым газом не наблюдается каких-либо значительных изменений в режимных параметрах горелочного устройства: тепловой мощности, коэффициенте избытка воздуха, профиле средней температуры в пламени вдоль оси симметрии устройства. Максимальное значение средней температуры в режимах с подачей только пара ниже, чем при подаче углекислого газа, на $\approx 60^\circ\text{C}$, вследствие большей теплоемкости водяного пара. При анализе промежуточных компонентов в процессе горения топлива при различных параметрах подачи смеси вдоль оси симметрии пламени было отмечено, что при замещении перегретого пара углекислым газом наблюдается существенный рост максимальных значений содержания NO_x , а также увеличение концентраций CO и O_2 в основании пламени, что вызвано более высокой температурой пламени, а также распадом CO_2 на монооксид углерода и кислород в пламени горелочного устройства. В случае добавления перегретого водяного пара происходит снижение содержания C_nH_m и увеличение H_2 , связанное с ускорением реакций с участием радикала OH , а также с паровой газификацией.

Анализ состава уходящих газов показал, что при подаче только перегретого водяного пара содержание оксидов азота в уходящих газах ниже по сравнению с углекислым газом: снижение показателя NO_x достигает 15 %. Из сопоставления полученных значений монооксида углерода и оксидов азота для различных режимов с нормативными показателями EN:267 следует, что они удовлетворяют самому строгому 3 классу. Однако в случае подачи углекислоты содержание оксидов азота находится близко к границе допустимых концентраций класса, что делает использование перегретого водяного пара предпочтительнее при варьировании рабочих параметров устройства для практических приложений.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Lu X., Han D., Huang Z.** Fuel design and management for the control of advanced compression-ignition combustion modes // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 2011. — V. 37, N 6. — P. 741–783. — DOI: 10.1016/J.PECS.2011.03.003.
2. **Kook S., Bae C., Miles P. C., Choi D., Pickett L. M.** The influence of charge dilution and injection timing on low-temperature diesel combustion and emissions // *SAE Tech. Papers.* — 2005. — DOI: 10.4271/2005-01-3837.
3. **Yao M., Zheng Z., Liu H.** Progress and recent trends in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engines // *Prog. Energy Combust. Sci.* — 2009. — V. 35, N 5. — P. 398–437. — DOI: 10.1016/J.PECS.2009.05.001.
4. **Liu Y., Sheng Y., Wei P., Zhang L., Yao S., Liu H., Sun H.** The third body effect of carbon dioxide on the *n*-heptane ignition delay characteristics under O_2/CO_2 conditions // *Combust. Sci. Technol.* — 2021. — DOI: 10.1080/00102202.2021.1893702.
5. **Li A., Zheng Z., Peng T.** Effect of water injection on the knock, combustion, and emissions of a direct injection gasoline engine // *Fuel.* — 2020. — V. 268. — 117376. — DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117376.
6. **Lee M. C., Seo S. B., Yoon J., Kim M., Yoon Y.** Experimental study on the effect of N_2 , CO_2 , and steam dilution on the combustion performance of H_2 and CO synthetic gas in an industrial gas turbine // *Fuel.* — 2012. — V. 102. — P. 431–438. — DOI: 10.1016/j.fuel.2012.05.028.
7. **Le Cong T., Dagaut P.** Experimental and detailed modeling study of the effect of water vapor on the kinetics of combustion of hydrogen and natural gas, impact on NO_x // *Energy Fuels.* — 2009. — V. 23, N 2. — P. 725–734. — DOI: 10.1021/ef800832q.
8. **Zou C., Song Y., Li G., Cao S., He Y., Zheng C.** The chemical mechanism of steam's effect on the temperature in methane oxy-steam combustion // *Int. J. Heat Mass Transfer.* — 2014. — N 75. — P. 12–18. — DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.03.051.
9. **Albin E., Nawroth H., Göke S., D'Angelo Y., Paschereit C. O.** Experimental investigation of burning velocities of ultra-wet methane — air — steam mixtures // *Fuel Process. Technol.* — 2013. — V. 107. — P. 27–35. — DOI: 10.1016/j.fuproc.2012.06.027.
10. **Honzawa T., Kai R., Seino M., Nishiie T., Suzuki Y., Okada A., Wazaki K., Kurose R.** Numerical and experimental investigations on turbulent combustion fields generated by large-scale submerged combustion vaporizer burners with water spray equipment // *J. Nat. Gas Sci. Eng.* — 2020. — V. 76. — 103158. — DOI: 10.1016/j.jngse.2020.103158.
11. **Cui G., Dong Z., Wang S., Xing X., Shan T., Li Z.** Effect of the water on the flame characteristics of methane hydrate combustion // *Appl. Energy.* — 2020. — V. 259. — 114205. — DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114205.
12. **Алексеев С. В., Ануфриев И. С., Вигриянов М. С., Копьев Е. П., Шарыпов О. В.** Характеристики процесса сжигания дизельного топлива в горелочном устройстве с по-

- дачей струи перегретого водяного пара // Физика горения и взрыва. — 2016. — Т. 52, № 3. — С. 37–44. — DOI: 10.15375/FGV20160305.
13. **Anufriev I. S., Alekseenko S. V., Sharyпов 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.
 14. **Алексеев С. В., Ануфриев И. С., Арсентьев С. С., Вигриянов М. С., Копьев Е. П., Шарыпов О. В.** Влияние параметров перегретого водяного пара на процесс горения жидких углеводородов // *Теплофизика и аэромеханика*. — 2019. — Т. 26, № 1. — С. 109–113.
 15. **Ануфриев И. С., Красинский Д. В., Шадрин Е. Ю., Копьев Е. П., Шарыпов О. В.** Исследование структуры газового потока, истекающего из форсунки горелочного устройства распылительного типа // *Теплофизика и аэромеханика*. — 2019. — Т. 26, № 5. — С. 703–718.
 16. **Anufriev I. S., Kopyev E. P., Sadkin I. S., Mukhina M. A.** Diesel and waste oil combustion in a new steam burner with low NO_x emission // *Fuel*. — 2021. — V. 290. — 120100. — DOI: 10.1016/j.fuel.2020.120100.
 17. **УСУ** «Крупномасштабный термогидродинамический стенд для исследования тепловых и газодинамических характеристик энергоустановок» [Электронный ресурс]. — <http://ckp-rf.ru/usu/73570/>.
 18. **Пат. РФ № 2701970** от 02.10.2019. Электрический парогенератор / Копьев Е. П., Вигриянов М. С., Ануфриев И. С., Шарыпов О. В., Осинцев Я. А.
 19. **Minakov A. V., Anufriev I. S., Kuznetsov V. A., Dekterev A. A., Kopyev E. P., Sharyпов O. V.** Combustion of liquid hydrocarbon fuel in an evaporative burner with forced supply of superheated steam and air to the reaction zone // *Fuel*. — 2022. — V. 309. — 122181. — DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122181.
 20. **Standard DIN EN 267:2011-11.** Automatic forced draught burners for liquid fuels.

Поступила в редакцию 19.01.2022.

После доработки 15.02.2022.

Принята к публикации 28.02.2022.