

УДК 62-643;536.463

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОДАЧИ ГАЗОВ-РАЗБАВИТЕЛЕЙ НА ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ ЖИДКОГО ТОПЛИВА, РАСПЫЛЯЕМОГО ПЕРЕГРЕТЫМ ВОДЯНЫМ ПАРОМ

Е.П. Копьев¹, И.С. Садкин^{1,2}, Е.Ю. Шадрин¹

¹Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН

²Новосибирский государственный технический университет

Для развития представлений о закономерностях физико-химических процессов при сжигании жидких углеводородов в условиях подачи газов окислителей-разбавителей в рамках настоящей работы проведено экспериментальное исследование экологических и теплотехнических показателей сжигания жидких углеводородов при распыле струей перегретого водяного пара в камеру газогенерации с варьированием подачи дымовых газов (разбавителей) и кислорода в подаваемом в камеру воздухе. Получено, что при распыле топлива перегретым водяным паром добавление к первично подаваемому в камеру газогенерации воздуху разбавителей позволяет дополнительно снизить выбросы оксидов азота (менее 40 мг/кВт · ч для дизельного топлива), а повышение концентрации кислорода ведет к его росту. При отношении содержания кислорода в камере газогенерации к разбавителю меньше 0,18 наблюдаются пульсации внешнего пламени. В результате выполнения экспериментального исследования показано, что объединение подходов распыления топлива струей перегретого водяного пара с повышенным содержанием кислорода или разбавлением дымовыми газами с использованием предварительной камеры газогенерации позволяет значительно снизить выбросы вредных веществ при сжигании жидких углеводородов.

Ключевые слова: горение, распыление паром, разбавление, добавление кислорода, камера газогенерации.

DOI: 10.17212/1727-2769-2025-1-35-50

Введение

При производстве продукции зачастую накапливается значительное количество отходов, которые потенциально могут быть использованы в качестве дополнительного источника энергии [1, 2]. В настоящее время такой подход вовлечения отходов в технологический процесс называется Waste-to-energy [3]. Использование отходов в качестве топлива позволяет не только уменьшить издержки производства на их утилизацию, но и снизить себестоимость продукции за счет получения дешевой энергии из производственных остатков.

Наиболее предпочтительными для использования в качестве такого не-проектного топлива являются отходы, содержащие большое количество углеводородов. Они могут быть в газообразном, жидком и твердом состоянии. Для газообразных отходов возможно применение стандартных

решений и устройств, используемых в газовом оборудовании [4]. Для твердых непроектных топлив зачастую используют слоевое сжигание [5]. Однако при использовании жидких углеводородных отходов необходимо применение специальных методов и подходов, так как такие непроектные топлива – это жидкости с переменным фракционным составом, разным содержанием механических примесей и воды, количеством сернистых соединений и азотсодержащих продуктов, тяжелых остатков [6], которые при горении образуют продукты сгорания с содержанием сажи и токсичных компонентов. Сжигание такого топлива традиционными способами не является эффективным и требует применения дополнительных решений.

Основываясь на подходе внешнего парового распыления, в ИТ СО РАН был предложен подход сжигания жидких непроектных углеводородных топлив, заключающийся в паровом распыле топлива с предварительной частичной паровой газификацией [7]. Преимущества подхода заключаются в сжигании жидкого топлива при его распылении струей перегретого водяного пара [8]. Отличительной особенностью такого метода является то, что он основан на взаимодействии высокоскоростной струи перегретого водяного пара с каплей топлива, за счет чего происходит первичная атонизация и создание однородного топливного спрея, а наличие камеры газогенерации позволяет реализовать реакции паровой газификации части углеродсодержащих продуктов термического разложения и неполного сгорания топлива, что приводит к повышению степени выгорания топлива.

Несмотря на полученные эффекты и стабильность воспламенения жидких непроектных топлив в струе пара в присутствии камеры газогенерации, не была рассмотрена возможность взаимодействия данного подхода с другими способами, в частности добавления в область сгорания одного или нескольких дополнительных разбавителей (выхлопные газы, азот, углекислый газ, пары воды и др.) как дополнительного широко известного и применяемого эффективного способа снижения содержания токсичных компонентов в продуктах сгорания [9–11]. В литературе было показано, что использование разбавителей позволяет влиять на характеристики протекания процесса горения. Например, в работе [12] было получено, что разбавление смеси азотом существенно влияет на скорость горения, стабильность пламени и образование сажи, однако возникают риски образования окислов азота. В то же время в [13] отмечается, что CO_2 оказывает более сильное ингибирующее действие на скорость ламинарного горения, чем N_2 . Таким образом, в работах отмечается, что организация рециркуляции дымовых газов ведет к снижению температуры горения и снижению процессов образования оксидов азота, что также отражено в [14,15].

С другой стороны, дополнительно улучшить характеристики сжигания низкокачественных топлив также можно и за счет повышения содержания кислорода в подаваемом для окисления воздухе [16]. Кроме того, способ кислородно-топливного сжигания, в настоящее время активно предлагается разработчиками как метод, обеспечивающий упрощение процесса захвата углекислого газа для снижения выбросов парниковых газов [17–20].

Однако сжигание с повышенным содержанием кислорода в подаваемом воздухе имеет ряд недостатков, связанных с высокими температурами горения и образованием большого количества термического NO_x [21].

Данная работа направлена на экспериментальное исследование экологических и теплотехнических показателей сжигания жидких углеводородов в условиях совместного впрыска пара в зону горения, рециркуляции дымовых газов и варьирования кислорода в подаваемом воздухе. Научная значимость работы определяется важностью полученных результатов для развития представлений о закономерностях физико-химических процессов при сжигании жидких углеводородов в условиях подачи газов окислителей-разбавителей и создания научных основ разработки перспективных экологически безопасных теплоэнергетических технологий.

1. Экспериментальный стенд и методика измерений

Исследование процесса сжигания жидких углеводородных топлив, распыленных струей перегретого водяного пара с повышенным содержанием кислорода или разбавлением дымовыми газами, было проведено на примере лабораторного образца горелочного устройства. Конструкция устройства представлена на рис. 1. В используемой горелке реализуется способ диспергирования и сжигания жидкого топлива, при котором происходит взаимодействие высокоскоростной струи пара с топливом с дальнейшим его испарением, частичной паровой газификацией продуктов термического разложения и неполного сгорания топлива в камере газогенерации. Внутрь горелки в камеру газогенерации принудительно подается воздух для инициации процесса горения и создания условий частичной паровой газификации топлива при взаимодействии углерода топлива с водяным паром. В устройстве также реализована возможность подмешивания газов-разбавителей (азот, углекислый газ) или окислителя (кислород) к подаваемому внутрь камеры газогенерации воздуху.

Горелочное устройство изготовлено из нержавеющей стали, имеет вертикально направленное пламя, мощность до 20 кВт. Паровая форсунка (полный угол раскрытия струи 20°) установлена соосно у основания камеры газогенерации и ориентирована вертикально вверх. Топливоподающая трубка установлена под углом к горизонту, конец трубки расположен в непосредственной близости у основания паровой струи и имеет скос. Принудительная подача воздуха со смесью газов в камеру газогенерации осуществляется через три отверстия с диаметром 6 мм, расположенных равномерно по окружности в нижней части корпуса горелки. Более подробное описание устройства приведено в работе [22]

Экспериментальный огневой стенд, на котором проводятся исследования, представлен на рис. 2. Данный стенд является частью крупной научной установки, которая подробно описана в [7]. Стенд оснащен автоматизированными системами подачи топлива, генерации пара, имеет возможность подачи сжатого воздуха. Для текущих исследований была организована возможность подачи кислорода, азота и углекислого газа из баллонного комплекса. Подача каждого компонента осуществляется по отдель-

ной магистрали из внешнего баллона через редуктор и регулируется игольчатым краном. Показания расхода регистрируются с помощью цифрового расходомера. Подача воздуха и дополнительных газов организована с возможностью подмеса к линии воздуха для подачи внутрь камеры газогенерации горелочного устройства.

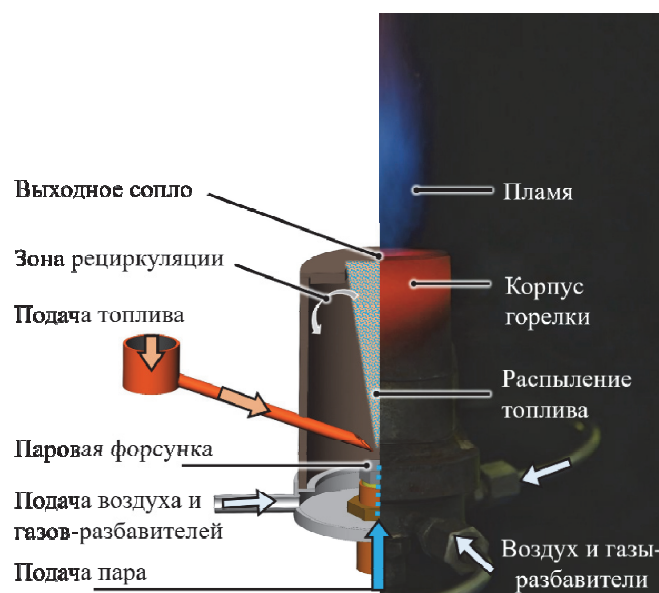


Рис. 1 – Схема горелочного устройства с распылением топлива струей перегретого пара с принудительной подачей смеси воздуха с газами разбавителями и окислителями в камеру газогенерации

Fig. 1 – Scheme of a burner device with fuel atomization by a jet of superheated steam with forced supply of a mixture of air with diluent and oxidizer gases into the gas generation chamber

Для изучения характеристик пламени (температура и газовый состав пламени) и параметров тепловыделения и газового состава были использованы термопарные, газоаналитические методы. Для определения параметров работы горелочного устройства в различных режимах подачи окислителя или разбавителя в камеру газогенерации горелки использовались калориметрический и газоаналитические методы.

Измерение средней температуры в пламени проводилось с использованием Pt-Rh/Pt-Rh термопары (относительная погрешность прибора 0,5 %) на оси горелки вдоль всего факела с шагом 10 мм на расстоянии 200 мм от основания пламени. Учитывались потери излучением с поверхности термопары при нахождении в высокотемпературном потоке, которые достигали 200° (или 15 % от измеренного значения). Помимо этого, производилась фиксация внешних параметров пламени с помощью фотосъемки фотокамерой Canon DS126071 с выдержкой 1/200 с, ISO-1600 и f/3.5.

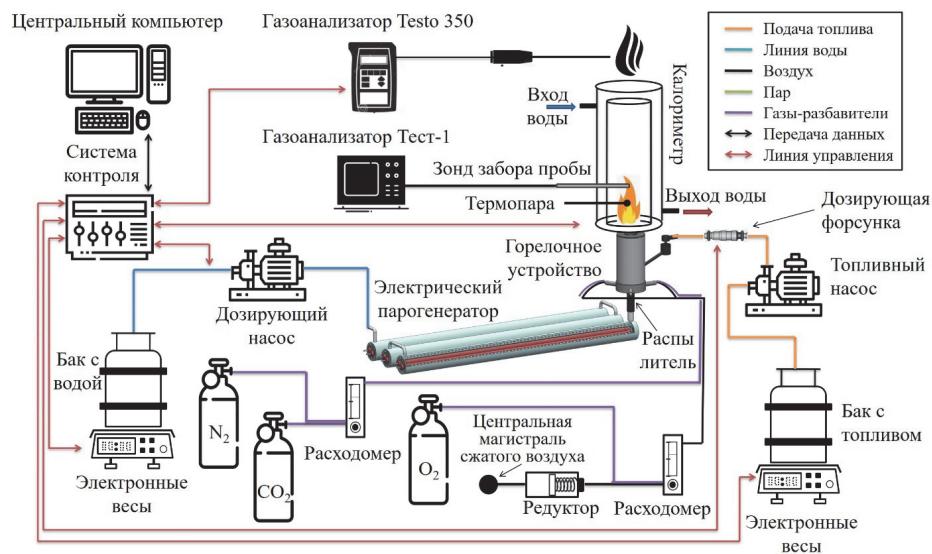


Рис. 2 – Схема установки с установленным баллонным комплексом подачи углекислого газа, азота и кислорода

Для измерения полноты сжигания топлива использовался проточный калориметр, принцип которого основан на измерении температуры и расхода теплоносителя. Факел горелочного устройства вводился во внутренний канал калориметра после установления постоянной разности температуры теплоносителя (водопроводной воды) на входе и на выходе. Температура воды измерялась на входе и на выходе калориметра при установившемся стационарном тепловом режиме с помощью хромель-алюмелевых термопар. Характерное время тепловой релаксации калориметра составляло 6,5 мин. Количество тепла, полученного от продуктов сгорания в калориметре за время проведения опыта, определялось как разность тепловой энергии теплоносителя на выходе и на входе калориметра. При расчете полезной мощности вычиталась энергия пара, полученная в электрическом парогенераторе и выделяемая затем при охлаждении и конденсации в калориметре.

Измерение промежуточных и конечных продуктов сгорания осуществлялось при помощи газоанализаторов Тест-1 и Testo 350 соответственно. Забор газа в пламени производился специальным охлаждаемым зондом. Продукты сгорания остужались до комнатной температуры – для «заморозки» протекающих процессов горения и получения наиболее достоверных данных о газовом составе промежуточных компонентов в пламени. Отбор проб газа проводился на оси горелки вдоль всего факела с шагом 20 мм на расстояние 200 мм от основания пламени. Время отбора проб в точке 90 с, частота 1 Гц. Забор проб конечных продуктов сгорания осуществлялся на выходе из калориметра. Температура газового потока на выходе примерно соответствует температуре наружного воздуха. Измерения

проведены в стационарных условиях в течение 10 минут с частотой 1 Гц для каждого режима.

Для анализа вредных выбросов использовались рекомендации, представленные в европейском стандарте для горелочных устройств DIN EN:267. А именно: содержание в дымовых газах СО и NO_x, определяемые газоанализатором [ppm], пересчитывалось в удельные величины выбросов [мг/кВт · ч].

Для проведения экспериментальных исследований использовались следующие параметры: расход топлива 1 кг/ч (~12,5 кВт), относительный расход пара 0,8 (массовое отношение подачи пара к топливу для обеспечения высоких экологических показателей должен быть не ниже 0,65 [22]), избыток воздуха в камере газогенерации 0,3 (для обеспечения высоких экологических показателей должен быть не выше 0,5 [23]), что соответствует расходу воздуха 4,5 кг/ч. Ранее без добавления разбавителей-окислителей для выбранного режима были получены содержание СО и NO_x в продуктах сгорания 40 мг/кВт · ч и 80 мг/кВт · ч, соответственно [23].

При использовании созданной системы подачи газов-разбавителей (азот и углекислый газ) и кислорода были определены границы срыва пламени в горелочном устройстве, определяемые визуально по переходу к пульсационному режиму горения. Получено, что такой переход осуществляется при подаче к потоку воздуха дополнительно азота или углекислого газа с расходом выше, чем 0,77 кг/ч или 0,7 кг/ч соответственно (отношение содержания кислорода к разбавителю ~0,18). По кислороду было обнаружено, что увеличение доли окислителя в подаваемой смеси увеличивает степень излучения элементов корпуса горелочного устройства. Во избежание аварийных ситуаций исследования по увеличению доли окислителя в подаваемых в камеру газогенерации газов были ограничены режимом подачи кислорода с массовой концентрацией не выше 50 %.

В таблице представлены характеристики исследуемых режимов и фотографии внешнего пламени горелочного устройства. Таким образом, к исследованию были приняты режимы работы устройства при подаче с первичным воздухом разбавителей азота и углекислого газа с расходами 0,77 и 0,7 кг/ч соответственно, а также вместо воздуха подавалась смесь кислорода с газом-разбавителем в долях по объему 0.21:0.79 (смесь, аналогичная воздуху), 0,33 : 0,67, а также 0,5 : 0,5 (см. таблицу).

Описание исследуемых режимов

Description of the modes under study

	Номер режима						
	1	2	3	4	5	6	7
Расход воздуха, кг/ч	4,5	4,5	4,5	—	—	—	—
Расход кислорода, кг/ч	—	—	—	0,95	0,95	0,95	0,95

Окончание таблицы / The End Table

	Номер режима						
	1	2	3	4	5	6	7
Расход азота, кг/ч	–	–	0,77	–	1,75	–	0,95
Расход диоксида углерода, кг/ч	–	0,7	–	1,75	–	0,95	–
Фото							

2. Результаты измерений и их анализ

На рис. 3 представлены результаты измерения средней температуры в пламени вдоль оси симметрии горелочного устройства. Можно отметить, что добавление разбавителя в виде азота или углекислого газа к первичному воздуху приводит к значительному снижению максимальных значений температуры. При этом аналогичное обратное поведение наблюдается при формировании смесей кислород-азот, кислород-углекислый газ с равными массовыми долями. По мере повышения концентрации кислорода в первичной подаче окислителя и снижения общего массового расхода подаваемых газов наблюдается рост температуры факела на выходе из камеры газогенерации горелочного устройства и увеличение максимума температуры. Затем по мере разбавления внешнего факела атмосферным воздухом происходит выравнивание температурных кривых как для воздушного, так и обогащенного кислородом первичной подачи окислителя.

При анализе промежуточных компонентов продуктов сгорания вдоль оси симметрии горелочного устройства (рис. 4) было обнаружено, что для режимов с повышенной концентрацией кислорода, при уменьшении добавки газа-разбавителя относительно состава воздуха за счет создания искусственной смеси кислород-углекислый газ, кислород-азот наблюдаются некоторые различия в характере изменения промежуточных компонентов. В режиме подачи углекислого газа наблюдается рост содержания СО относительно аналогичного режима с подачей азота в качестве газа-разбавителя.

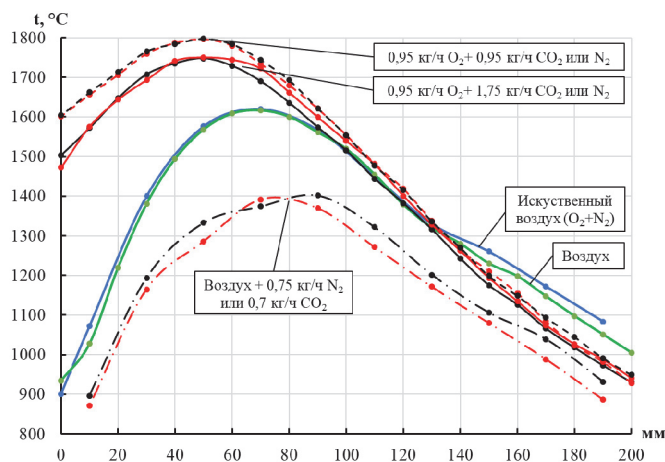


Рис. 3 – Усредненная по времени температура в пламени вдоль оси симметрии горелочного устройства

Fig. 3 – Time-averaged flame temperature along the axis of symmetry of the burner device

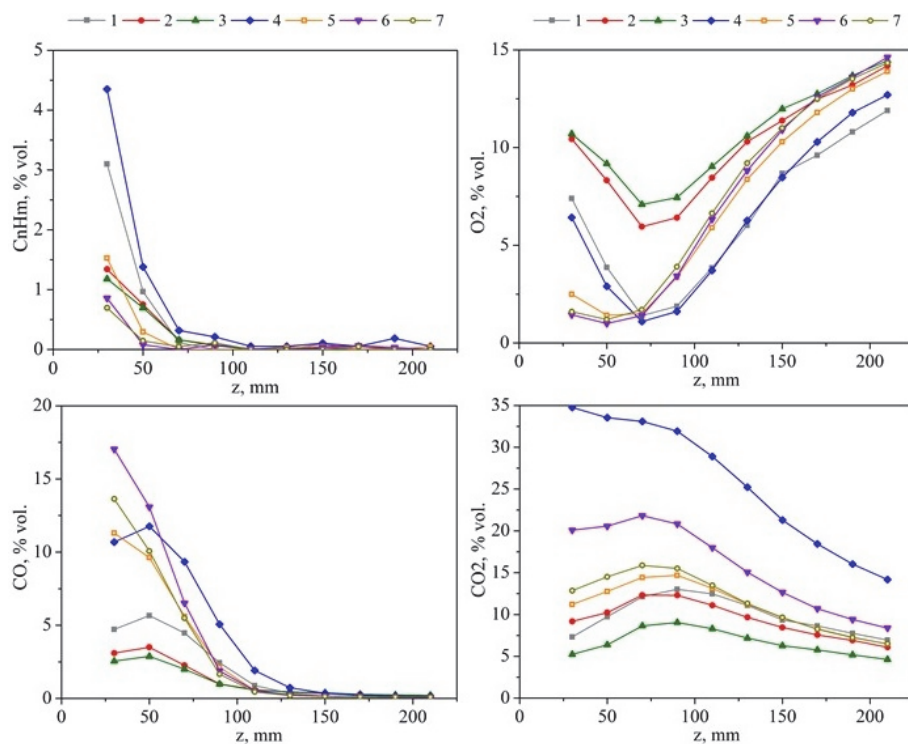


Рис. 4 – Усредненные по времени значения промежуточных компонентов продуктов сгорания вдоль оси симметрии горелочного устройства. Цифры соответствуют режимам, указанным в таблице

Fig. 4 – Time-averaged values of intermediate components of combustion products along the axis of symmetry of the burner device. The numbers correspond to the modes specified in Table

Вероятно, это связано с диссоциацией CO_2 в условиях высоких температур пламени. Также в случае углекислого газа отмечается повышенное содержание компонентов неполного сгорания топлива C_nH_m . Увеличение концентрации кислорода в первичном дутье до 50 % путем смешения с равным по массе CO_2 или N_2 имеет близкий характер изменения компонентов пламени. Однако для режима с углекислым газом наблюдается более высокая концентрация продуктов диссоциации углекислого газа и неполного сгорания топлива. Добавление к воздушному дутью разбавителей в виде азота или углекислого газа также заметно влияет на концентрации промежуточных компонентов в пламени. При этом расположение точек минимума концентраций кислорода и максимума углекислого газа не изменяется. Слабо изменяется и поведение компонентов неполного сгорания и газификации топлива.

Исследование выбросов в конечных продуктах сгорания, охлажденных в проточном калориметре и приведенных к удельным показателям, показало, что добавление к воздуху разбавителей в виде углекислого газа и азота позволяет снизить выбросы оксидов азота вдвое (с 80 до 32 и 35 $\text{мг/кВт} \cdot \text{ч}$ соответственно) (рис. 5). При этом, повышение концентрации кислорода в дутье до 33 и 50 % путем уменьшения газа-разбавителя ведет к росту выбросов оксидов азота.

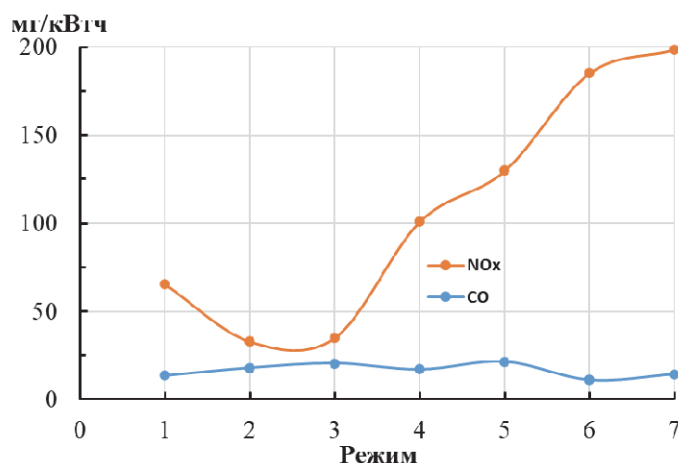


Рис. 5 – Усредненные по времени значения конечных компонентов продуктов сгорания на выходе дымовых газов из калориметра

Fig. 5 – Time-averaged values of the final components of combustion products at the flue gas outlet from the calorimeter

Для режимов с добавлением азота выбросы на 25 % выше, чем для вариантов с углекислым газом, что указывает на образование оксидов еще в камере газогенерации. Конечные выбросы оксида углерода, несмотря на дополнительную подачу CO^2 в некоторых режимах, изменяются слабо и во всех режимах не превышают 25 $\text{мг/кВт} \cdot \text{ч}$. При увеличении концентрации кислорода до 50 % отмечается снижение до уровня 15 $\text{мг/кВт} \cdot \text{ч}$.

Низкие выбросы СО соответствуют высокой степени сгорания топлива: количество тепла для изучаемых режимов в пределах погрешностей близко к значению наивысшей теплоты сгорания дизельного топлива 44,8 МДж/кг. При этом при снижении доли газа-разбавителя наблюдается небольшой рост значений относительно табличных и, наоборот, при разбавлении воздуха дополнительными газами отмечается небольшое снижение расчетных значений.

Обработка и анализ полученных экспериментальных результатов показали, что для режимов при подаче дополнительных разбавителей в камеру газогенерации наблюдается значительное снижение содержания оксидов азота в уходящих газах, что вероятнее всего связано с существенным снижением максимальной температуры внешнего пламени горелочного устройства за счет добавления холодной газовой среды ~200 °С. Однако снижение температуры одинаково как для случая с азотом, так и с углекислым газом, несмотря на различную теплоемкость (816 и 1042 Дж/кг · К) и объемное разбавление, которое они вносят со своим потоком.

Заключение

В рамках настоящей работы проведено экспериментальное исследование экологических и теплотехнических показателей сжигания жидких углеводородов в условиях совместного впрыска пара в зону горения, рециркуляции дымовых газов и варьирования кислорода в подаваемом воздухе. Для этого было проведено изучение характеристик пламени, а также параметров работы горелочного устройства при варьировании в камере газогенерации содержания разбавителя и окислителя при распылении топлива перегретым водяным паром.

В результате изучения граничных режимов работы было получено, что при отношении содержания кислорода в камере газогенерации к разбавителю меньше 0,18, наблюдаются пульсации внешнего пламени, а также значительное снижение максимальных значений температуры. При этом по мере повышения концентрации кислорода в первичной подаче окислителя и снижения общего массового расхода подаваемых газов наблюдается рост температуры факела на выходе из камеры газогенерации горелочного устройства и увеличение максимума температуры. В то же время для исследуемых режимов, газовый анализ конечных продуктах сгорания показал, что добавление к воздуху разбавителей в виде углекислого газа и азота позволяет вдвое снизить выбросы оксидов азота, а повышение концентрации кислорода ведет к его росту.

В результате выполнения экспериментального исследования получено, что объединение подходов распыления топлива струей перегретого водяного пара с повышенным содержанием кислорода или разбавлением дымовыми газами с использованием предварительной камеры газогенерации позволяет значительно снизить выбросы вредных веществ при сжигании жидких углеводородов. Полученные результаты могут быть использованы в качестве научных основ для разработки перспективных экологически

безопасных теплоэнергетических технологий использования непроектного жидкого топлива для его утилизации с получением тепловой и электрической энергии с низкой стоимостью.

ЛИТЕРАТУРА

1. Experimental investigation of waste oil processing by partial oxidation in a moving bed reactor / D. Podlesniy, A. Zaichenko, M. Tsvetkov, M. Salganskaya, A. Chub, E. Salgansky // *Fuel*. – 2021. – Vol. 298. – Art. 120862. – DOI: 10.1016/J.FUEL.2021.120862.
2. Eliminating environmental impact of coal mining wastes and coal processing by-products by high temperature oxy-fuel CFB combustion for clean power generation: a review / F. Cheng, Y. Zhang, G. Zhang, K. Zhang, J. Wu, D. Zhang // *Fuel*. – 2024. – Vol. 373. – Art. 132341. – DOI: 10.1016/J.FUEL.2024.132341.
3. Methane hydrate regasification to intensify the combustion of low-rank coal fuels / K. Vinogradskiy, P.S. Nagibin, S.Ya. Misyura, V.S. Morozov, N.E. Shlegel, P.A. Strizhak // *Fuel*. – 2025. – Vol. 381. – Art. 133432. – DOI: 10.1016/J.FUEL.2024.133432.
4. Impact of furnace and waste layer control on HCl and SO₂ in combustion gas from a grate-fired waste-to-energy boiler / W. Meynendonckx, M. Ishteva, M. Verbeke, N. Alderweireldt, J. De Greef // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2025. – Vol. 193. – P. 710–720. – DOI: 10.1016/J.PSEP.2024.11.051.
5. **Lasek J.A., Glód K., Słowik K.** The co-combustion of torrefied municipal solid waste and coal in bubbling fluidised bed combustor under atmospheric and elevated pressure // *Renewable Energy*. – 2021. – Vol. 179. – P. 828–841. – DOI: 10.1016/J.RENENE.2021.07.106.
6. Experimental studies of crude oil combustion in a top-mounted silo combustor / D. Nowak, T. Dobski, R. Slefarski, R. Jankowski, F. Magni // *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2011. Vol. 2. Combustion, fuels and emissions, Parts A and B*. – ASME, 2012. – P. 269–275. – DOI: 10.1115/GT2011-45248.
7. NO_x reduction by steam injection method during liquid fuel and waste burning / I.S. Anufriev, E.P. Kopyev, I.S. Sadkin, M.A. Mukhina // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2021. – Vol. 152. – P. 240–248. – DOI: 10.1016/j.psep.2021.06.016.
8. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet / I.S. Anufriev, E.Y. Shadrin, E.P. Kopyev, S.V. Alekseenko, O.V. Sharypov // *Applied Thermal Engineering*. – 2019. – Vol. 163. – Art. 114400. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114400.
9. **Al-Qurashi K., Lucking A.D., Boehman A.L.** The deconvolution of the thermal, dilution, and chemical effects of exhaust gas recirculation (EGR) on the reactivity of engine and flame soot // *Combustion and Flame*. – 2011. – Vol. 158. – P. 1696–1704. – DOI: 10.1016/j.combustflame.2011.02.006.
10. Effect of low-nitrogen combustion system with flue gas circulation technology on the performance of NO_x emission in waste-to-energy power plant / P. Zhang, Y. Shao, J. Niu, X. Zeng, X. Zheng, C. Wu // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*. – 2022. – Vol. 175. – Art. 108910. – DOI: 10.1016/J.CEP.2022.108910.
11. Effects of inert dilution and preheating temperature on lean flammability limit of syngas / S. Li, Y. Zhang, X. Qiu, B. Li, H. Zhang // *Energy and Fuels*. – 2014. – Vol. 28. – P. 3442–3452. – DOI: 10.1021/ef500187s.

12. Experimental characterization of the different nitrogen dilution effects on soot formation in ethylene diffusion flames / Q. Wang, G. Legros, J. Bonnetty, C. Morin // *Proceedings of the Combustion Institute*. – 2017. – Vol. 36. – P. 3227–3235. – DOI: 10.1016/j.proci.2016.07.063.
13. **Prathap C., Ray A., Ravi M.R.** Effects of dilution with carbon dioxide on the laminar burning velocity and flame stability of H₂-CO mixtures at atmospheric condition // *Combustion and Flame*. – 2012. – Vol. 159. – P. 482–492. – DOI: 10.1016/j.combustflame.2011.08.006.
14. Design and analysis of moderate or intense low-oxygen dilute combustion burner / R.S. Kumar, S. Gowtham, B. Kamali, M. Asokan, P.R. Surya Sai, D.D. Xavier, S. Seralathan, V. Hariram // *Materials Today: Proceedings*. – 2020. – Vol. 33. – P. 3832–3837. – DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.223.
15. Exhaust gas recirculation applied to single-shaft gas turbines: an energy and exergy approach / J. Hachem, T. Schuhler, D. Orhon, M. Cuif-Sjostrand, A. Zoughaib, M. Molière // *Energy*. – 2022. – Vol. 238. – Art. 121656. – DOI: 10.1016/J.ENERGY.2021.121656.
16. Oil heavy residues oxy-combustion with CO₂ capture / M. Younes, A. Jamal, T. Niass, A. Levasseur, O. Stallmann, G. Di Federico // *Energy Procedia*. – 2017. – Vol. 114. – P. 505–521. – DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1193.
17. **Koohestanian E., Shahraki F.** Review on principles, recent progress, and future challenges for oxy-fuel combustion CO₂ capture using compression and purification unit // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2021. – Vol. 9. – Art. 105777. – DOI: 10.1016/J.JECE.2021.105777.
18. Oxy-fuel coal combustion – a review of the current state-of-the-art / G. Scheffknecht, L. Al-Makhadmeh, U. Schnell, J. Maier // *International Journal of Greenhouse Gas Control*. – 2011. – Vol. 5. – P. 16–35. – DOI: 10.1016/J.IJGGC.2011.05.020.
19. Account for variations in the H₂O to CO₂ molar ratio when modelling gaseous radiative heat transfer with the weighted-sum-of-grey-gases model / R. Johansson, B. Leckner, K. Andersson, F. Johnsson // *Combustion and Flame*. – 2011. – Vol. 158. – P. 893–901. – DOI: 10.1016/j.combustflame.2011.02.001.
20. Modeling of an oxy-coal flame under a steam-rich atmosphere / Z. Mao, L. Zhang, X. Zhu, C. Pan, B. Yi, C. Zheng // *Applied Energy*. – 2016. – Vol. 161. – P. 112–123. – DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.018.
21. **Adams T.A.** Challenges and opportunities in the design of new energy conversion systems // *Computer Aided Chemical Engineering*. – 2014. – Vol. 34. – P. 5–14. – DOI: 10.1016/B978-0-444-63433-7.50002-X.
22. **Anufriev I.S., Kopyev E.P.** Diesel fuel combustion by spraying in a superheated steam jet // *Fuel Processing Technology*. – 2019. – Vol. 192. – P. 154–169. – DOI: 10.1016/j.fuproc.2019.04.027.
23. New ecology safe waste-to-energy technology of liquid fuel combustion with superheated steam / I.S. Anufriev, E.P. Kopyev, S.V. Alekseenko, O.V. Sharypov, M.S. Vigriyanov // *Energy*. – 2022. – Vol. 250. – Art. 123849. – DOI: 10.1016/J.ENERGY.2022.123849.

STUDY OF THE INFLUENCE OF DILUENT GAS SUPPLY ON THE COMBUSTION PROCESS OF LIQUID FUEL SPRAYED WITH SUPERHEATED STEAM

Kopyev E.P.¹, Sadkin I.S.^{1,2}, Shadrin E.Yu.¹

¹ *Kutateladze Institute of Thermophysics, SB RAS, Novosibirsk, Russia*

² *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

In order to develop ideas about the regularities of physicochemical processes during combustion of liquid hydrocarbons under conditions of supply of oxidizer-diluent gases, within the framework of the present work an experimental study of ecological and thermal engineering indices of combustion of liquid hydrocarbons during spraying with a jet of superheated steam into the gasification chamber with variation of supply of flue gases (diluent) and oxygen in the air supplied to the chamber was carried out. It was found that during fuel spraying with superheated steam the addition of diluents to the air initially supplied to the gasification chamber allows to additionally reduce emissions of nitrogen oxides (less than 40 mg/kWh for diesel fuel), and an increase in the oxygen concentration leads to its growth. When the ratio of the oxygen content in the gasification chamber to the diluent is less than 0.18, pulsations of the external flame are observed. As a result of the experimental study, it was shown that combining the approaches of fuel atomization with a jet of superheated water vapor with an increased oxygen content or dilution with flue gases using a preliminary gas generation chamber allows for a significant reduction in emissions of harmful substances during the combustion of liquid hydrocarbons.

Keywords: combustion, steam atomization, dilution, oxygen addition, gas generation chamber.

DOI: 10.17212/1727-2769-2025-1-35-50

REFERENCES

1. Podlesniy D., Zaichenko A., Tsvetkov M., Salganskaya M., Chub A., Salgansky E. Experimental investigation of waste oil processing by partial oxidation in a moving bed reactor. *Fuel*, 2021, vol. 298, art. 120862. DOI: 10.1016/J.FUEL.2021.120862.
2. Cheng F., Zhang Y., Zhang G., Zhang K., Wu J., Zhang D. Eliminating environmental impact of coal mining wastes and coal processing by-products by high temperature oxy-fuel CFB combustion for clean power generation: a review. *Fuel*, 2024, vol. 373, art. 132341. DOI: 10.1016/J.FUEL.2024.132341.
3. Vinogradskiy K., Nagibin P.S., Misyura S.Y., Morozov V.S., Shlegel N.E., Strizhak P.A. Methane hydrate regasification to intensify the combustion of low-rank coal fuels. *Fuel*, 2025, vol. 381, art. 133432. DOI: 10.1016/J.FUEL.2024.133432.
4. Meynendonckx W., Ishteva M., Verbeke M., Alderweireldt N., De Greef J. Impact of furnace and waste layer control on HCl and SO₂ in combustion gas from a grate-fired waste-to-energy boiler. *Process Safety and Environmental Protection*, 2025, vol. 193, pp. 710–720. DOI: 10.1016/J.PSEP.2024.11.051.
5. Lasek J.A., Głód K., Słowik K. The co-combustion of torrefied municipal solid waste and coal in bubbling fluidised bed combustor under atmospheric and elevated pressure. *Renewable Energy*, 2021, vol. 179, pp. 828–841. DOI: 10.1016/J.RENENE.2021.07.106.

6. Nowak D., Dobski T., Slefarski R., Jankowski R., Magni F. Experimental studies of crude oil combustion in a top-mounted silo combustor. *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2011*. Vol. 2. *Combustion, fuels and emissions, Parts A and B*. ASME, 2012, pp. 269–275. DOI: 10.1115/GT2011-45248.
7. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Sadkin I.S., Mukhina M.A. NOx reduction by steam injection method during liquid fuel and waste burning. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, vol. 152, pp. 240–248. DOI: 10.1016/j.psep.2021.06.016.
8. Anufriev I.S., Shadrin E.Y., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Sharypov O.V. Study of liquid hydrocarbons atomization by supersonic air or steam jet. *Applied Thermal Engineering*, 2019, vol. 163, art. 114400. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114400.
9. Al-Qurashi K., Lueking A.D., Boehman A.L. The deconvolution of the thermal, dilution, and chemical effects of exhaust gas recirculation (EGR) on the reactivity of engine and flame soot. *Combustion and Flame*, 2011, vol. 158, pp. 1696–1704. DOI: 10.1016/j.combustflame.2011.02.006.
10. Zhang P., Shao Y., Niu J., Zeng X., Zheng X., Wu C. Effect of low-nitrogen combustion system with flue gas circulation technology on the performance of NOx emission in waste-to-energy power plant. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 2022, vol. 175, art. 108910. DOI: 10.1016/J.CEP.2022.108910.
11. Li S., Zhang Y., Qiu X., Li B., Zhang H. Effects of inert dilution and preheating temperature on lean flammability limit of syngas. *Energy and Fuels*, 2014, vol. 28, pp. 3442–3452. DOI: 10.1021/ef500187s.
12. Wang Q., Legros G., Bonnety J., Morin C. Experimental characterization of the different nitrogen dilution effects on soot formation in ethylene diffusion flames. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2017, vol. 36, pp. 3227–3235. DOI: 10.1016/j.proci.2016.07.063.
13. Prathap C., Ray A., Ravi M.R. Effects of dilution with carbon dioxide on the laminar burning velocity and flame stability of H₂-CO mixtures at atmospheric condition. *Combustion and Flame*, 2012, vol. 159, pp. 482–492. DOI: 10.1016/j.combustflame.2011.08.006.
14. Kumar R.S., Gowtham S., Kamali B., Asokan M., Surya Sai P.R., Xavier D.D., Seralathan S., Hariram V. Design and analysis of moderate or intense low-oxygen dilute combustion burner. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 33, pp. 3832–3837. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.223.
15. Hachem J., Schuhler T., Orhon D., Cuif-Sjostrand M., Zoughaib A., Molière M. Exhaust gas recirculation applied to single-shaft gas turbines: an energy and exergy approach. *Energy*, 2022, vol. 238, art. 121656. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2021.121656.
16. Younes M., Jamal A., Niass T., Levasseur A., Stallmann O., Di Federico G. Oil heavy residues oxy-combustion with CO₂ capture. *Energy Procedia*, 2017, vol. 114, pp. 505–521. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.1193.
17. Koohestanian E., Shahraki F. Review on principles, recent progress, and future challenges for oxy-fuel combustion CO₂ capture using compression and purification unit. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, vol. 9, art. 105777. DOI: 10.1016/J.JECE.2021.105777.
18. Scheffknecht G., Al-Makhadmeh L., Schnell U., Maier J. Oxy-fuel coal combustion – a review of the current state-of-the-art. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2011, vol. 5, pp. 16–35. DOI: 10.1016/J.IJGGC.2011.05.020.

19. Johansson R., Leckner B., Andersson K., Johnsson F. Account for variations in the H_2O to CO_2 molar ratio when modelling gaseous radiative heat transfer with the weighted-sum-of-grey-gases model. *Combustion and Flame*, 2011, vol. 158, pp. 893–901. DOI: 10.1016/j.combustflame.2011.02.001.
20. Mao Z., Zhang L., Zhu X., Pan C., Yi B., Zheng C. Modeling of an oxy-coal flame under a steam-rich atmosphere. *Applied Energy*, 2016, vol. 161, pp. 112–123. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.10.018.
21. Adams T.A. Challenges and opportunities in the design of new energy conversion systems. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2014, vol. 34, pp. 5–14. DOI: 10.1016/B978-0-444-63433-7.50002-X.
22. Anufriev I.S., Kopyev E.P. Diesel fuel combustion by spraying in a superheated steam jet. *Fuel Processing Technology*, 2019, vol. 192, pp. 154–169. DOI: 10.1016/j.fuproc.2019.04.027.
23. Anufriev I.S., Kopyev E.P., Alekseenko S.V., Sharypov O.V., Vigriyanov M.S. New ecology safe waste-to-energy technology of liquid fuel combustion with superheated steam. *Energy*, 2022, vol. 250, art. 123849. DOI: 10.1016/J.ENERGY.2022.123849.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Копьев Евгений Павлович – родился в 1991 г., канд. техн. наук, заведующий лабораторией экологических проблем теплоэнергетики, ФГБУН «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН». Область научных интересов: энергетика, сжигание топлива. Опубликовано 100 научных работ (РИНЦ). (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр-т Лаврентьева, д. 1. E-mail: kopyev.evgeniy@mail.ru).

Kopyev Evgeny Pavlovich – Candidate of Sciences (Eng.), Head of Laboratory of Environmental Problems of Thermal Power Engineering, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS. His research interests are currently focused on Thermal Engineering and Combustion of Fuels. He is author of about 100 scientific papers (RSCI). (Address: 1, Lavrentyev Av., Novosibirsk, 630090, Russia, E-mail: kopyev.evgeniy@mail.ru).



Садкин Иван Сергеевич – родился в 1998 г., аспирант НГТУ, инженер-исследователь лаборатории экологических проблем теплоэнергетики, ФГБУН «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН». Область научных интересов: энергетика, сжигание топлива. Опубликовано 58 научных работ (РИНЦ). (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр-т Лаврентьева, д. 1. E-mail: sadkinvanya@mail.ru).

Sadkin Ivan Sergeevich – PhD student of NSTU, engineer researcher of Environmental Problems of Thermal Power Engineering, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS. His research interests are currently focused on Thermal Engineering and Combustion of Fuels. He is author of about 58 scientific papers (RSCI). (Address: 1, Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, E-mail: sadkinvanya@mail.ru).



Шадрин Евгений Юрьевич – родился в 1992 г., канд. физ.-мат. наук, младший научный сотрудник лаборатории экологических проблем теплоэнергетики, ФГБУН «Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН». Область научных интересов: энергетика, сжигание топлива. Опубликовано 100 научных работ (РИНЦ). (Адрес: 630090, Россия, Новосибирск, пр-т Лаврентьева, д. 1. E-mail: evgen_zavita@mail.ru).

Shadrin Evgeny Yurievich – Candidate of Sciences (Phys. & Math.), Junior Researcher of Environmental Problems of Thermal Power Engineering, Kutateladze Institute of Thermophysics SB RAS. His research interests are currently focused on Thermal Engineering and Combustion of Fuels. He is author of about 100 scientific papers (RSCI). (Address: 1, Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia, E-mail: evgen_zavita@mail.ru).

Статья поступила 11 февраля 2025 г.

Received February 11, 2025

To Reference:

Kopyev E.P., Sadkin I.S., Shadrin E.Yu. Issledovanie vliyaniya podachi gazov-razbavitelei na protsess goreniya zhidkogo topliva, raspylyaemogo peregretym vodyanym parom [Study of the influence of diluent gas supply on the combustion process of liquid fuel sprayed with superheated steam]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2025, no. 1 (66), pp. 35–50. DOI: 10.17212/1727-2769-2025-1-35-50.