

УДК 662.7

АКТИВАЦИЯ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ КАМЕННОГО УГЛЯ НИТРАТОМ ЖЕЛЕЗА И ОТХОДАМИ МЕТАЛЛОПРОКАТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

© 2024 г. М. К. Шуатаев^{1, *}, А. Ж. Калтаев^{1, **}, К. Б. Ларионов^{1, 2, ***}

¹ФГАОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, 634050 Россия

²ФГБОУ ВО Кузбасский государственный технический университет им. Т.Ф. Горбачева, Кемерово, 650000 Россия

*e-mail: mks11@tpu.ru

**e-mail: azk2@tpu.ru

***e-mail: laryk070@gmail.com

Поступила в редакцию: 26.10.2023 г.

После доработки: 14.11.2023 г.

Принята к публикации: 20.12.2023 г.

Исследовано влияние отходов металлопрокатного производства и нитрата железа на характеристики процесса слоевого сжигания каменного угля. В качестве твердого топлива использован каменный уголь марки Т. Металлическую окалину и нитрат железа вводили в состав топлива методом механического смешения. Согласно данным *XRD*, в металлической окалине были идентифицированы фазы оксидов железа Fe_3O_4 и марганца Mn_3O_4 . Характеристики процесса горения исследуемых образцов изучали с помощью высокоскоростной видеосъемки с применением камеры сгорания при температуре греющей среды 700°C . Также было проведено масштабирование процесса активируемого слоевого горения угля с применением твердотопливного котельного агрегата. Экспериментально установлено, что использование металлической окалины и нитрата железа приводит к повышению реакционной способности топлива, о чем свидетельствует снижение времени задержки зажигания. За счет интенсификации процесса горения были снижены топливный недожог и концентрация образующегося СО в составе газофазных продуктов горения.

Ключевые слова: каменный уголь, металлическая окалина, нитрат железа, зажигание и горение, активация, реакционная способность, топливный недожог, газофазные соединения

DOI: 10.31857/S0023117724030085 EDN: NBVCOR

ВВЕДЕНИЕ

Уголь играет важную роль в мировой экономике, поскольку является ключевым энергоносителем, обеспечивающим основные объемы генерации электрической энергии [1]. Однако его использование также остается одним из крупнейших источников эмиссии парниковых газов и других сопутствующих технологических проблем [2].

Проблемы, связанные с экологическими и технологическими аспектами, возникающие при широком использовании угольных энергоресурсов, требуют особого внимания и разработки новых технологических подходов для их использования в энергетике. Одним из потенциальных способов эффективного преобразования угля является его каталитическое сжигание [3–4].

К настоящему времени в области каталитического сжигания угля существует множество исследований. В работах [5–7] было установлено,

что оксиды металлов (такие как Fe_2O_3 , CeO_2 , ZnO и CuO) положительно влияют на процесс термического преобразования угля, что проявлялось в увеличении скорости реакции окисления с повышением удельного выделения количества тепла. Также было обнаружено, что добавки Fe_2O_3 , CaO и MnO_2 могут ускорять процесс окисления каменного угля и антрацита с эффективным преобразованием их горючей части до CO_2 [6, 8]. Механизм каталитической активации процесса горения органических топлив связан с циклом окисления и восстановления оксидов [7, 9]. Таким образом, катализатор (оксид металла) играет роль агента, обеспечивающий адсорбцию и десорбцию окислителя, что в свою очередь повышает перенос адсорбированного кислорода к углероду и способствует выгоранию выделяющихся летучих соединений и углеродного остатка.

Авторы работ [10–12] установили, что использование отходов металлопрокатных производств (металлической окалины) может способствовать

повышению реакционности способности углей, что выражается в увеличении максимальной скорости реакции процесса окисления. В том числе использование металлической окалины позволяет снизить концентрацию оксида азота, образующегося в процессе горения угля [10].

Также в качестве активирующих добавок могут быть использованы прекурсоры оксидов металлов в виде нитратов, карбонатов, ацетатов и сульфатов металлов [13, 14]. Основным эффектом использования прекурсоров оксидов металлов является усиление их активирующего действия за счет двухстадийного механизма горения угля [14], который связан с разложением соли и выделением соответствующих газофазных продуктов (стадия 1) и последующим образованием оксида металла (стадия 2). Ранее [14] нами было установлено, что нитраты (на примере нитрата железа), в отличие от других видов солей, сильнее влияют на изменение характера процесса окисления углей. Прежде всего это связано с тем, что нитраты имеют сравнительно низкую температуру разложения [14] и участия на ранней стадии процесса горения угля образующихся оксидов азота NO и NO_2 .

Таким образом, прекурсоры в случае их комбинирования с оксидами металлов (например, металлической окалиной) могут оказывать усиливающее воздействие на активирующие свойства добавки, как на стадии зажигания угля, так и для последующего процесса горения.

В настоящей работе представлены результаты экспериментального исследования влияния активирующих добавок, выполненных на основе отходов металлопрокатного производства (металлической окалины) и предшественников оксидов металлов (нитрат железа) на реакционную способность каменного угля.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве образца твердого топлива был использован каменный уголь марки Т Алардинского месторождения Кемеровской области. Предварительно образец (с размером фракции $d = 5\text{--}10$ мм) подвергался измельчению в барабанной мельнице в течение 8 ч с соотношением массы мелющих тел к материалу 1 : 1. Далее измельченный образец подвергался фракционированию на ситах с размером ячеек менее 80 мкм.

Технические характеристики (влажность W^a , зольность A^d , выход летучих веществ V^{daf} и теплота сгорания Q_i^r) были определены с помощью стандартных методик: ГОСТ Р 52911-2013 “Определение общей влаги”, ГОСТ Р 55660-2013 “Определение выхода летучих веществ” и ГОСТ 147-2013 “Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания”. Элементный состав (C, H, N, S) был определен с помощью анализатора элементного состава *vario MICRO cube (Elementar, Германия)*. Распределение частиц по размерам было определено с помощью лазерного дифракционного анализатора частиц *Analysette 22 (Fritsch, Германия)*. Результаты анализов представлены в табл. 1.

Исследуемый образец угля характеризуется сравнительно высоким содержанием зольного остатка (12.3 мас. %) и теплотой сгорания (27.4 МДж/кг) при относительно низком значении летучих веществ (14.5 мас. %). Такие свойства, как правило, присущи углям с высокой степенью метаморфизма [15].

В качестве активирующих добавок были использованы порошок металлопрокатного производства (металлическая окалина) и нитрат железа $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$ в количестве 3.5 и 1.5 мас. % соответственно. Нитрат был использован в качестве дополнительного источника окисления для активации процессов зажигания и ранней стадии горения угля [14, 16, 17]. Также для сравнения был подготовлен топливный состав, содержащий 5 мас. % металлической окалины. Обозначение исследуемых составов топлив: исходный образец

Таблица 1. Физико-химические характеристики исследуемого образца каменного угля

Характеристика	Значение
Влажность W^a , мас. %	2.2
Зольность A^d , мас. %	12.7
Летучие вещества V^{daf} , мас. %	13.8
Низшая теплота сгорания Q_i^r , МДж/кг	27.6
Распределение частиц по размерам, мкм	
X_{10}	5.9
X_{50}	25.7
X_{90}	64.8
Элементный состав ^d , мас. %	
C	70.8
H	3.0
N	0.2
S	0.3
O	12.8

каменного угля — УК, образец каменного угля, модифицированный металлической окалиной — УК/Ме и образец каменного угля, модифицированный металлической окалиной и нитратом железа — УК/Ме/Fe.

Образец металлической окалины был получен с предприятия “Уральский металлургический завод” (г. Екатеринбург, Россия) и представляет из себя дисперсный порошок, образующийся на внешней поверхности плит, листов и профилей, при их производстве путем горячей прокатки. Распределение частиц по размерам металлической окалины, которое было определено с применением лазерного дифракционного анализатора частиц *Analysette 22 (Fritsch, Германия)*, характеризовалось мономодальной кривой со средним размером частиц 20.4 мкм (X_{10} — 2.7 мкм, X_{50} — 14.9 мкм и X_{90} — 51.4 мкм). Рентгенофазовый анализ, выполненный с помощью рентгеновского дифрактометра *Shimadzu XRD 7000s* (CuK_α -излучение), показал присутствие в окалине фаз оксидов железа и марганца.

Введение добавок в состав образца каменного угля осуществлялось механическим методом с

использованием шаровой мельницы без использования мелющих тел. Для исходного образца угля была осуществлена аналогичная процедура подготовки.

Исследование процессов зажигания и горения было выполнено с помощью экспериментального стенда, описание и принципиальная схема которого представлена в работах [14, 17].

При проведении эксперимента температура греющей среды в камере сгорания составляла $T_g = 700^\circ\text{C}$, масса топливной навески 0.1 ± 0.01 г. В качестве оценки изменения реакционной способности был выбран параметр — время задержки зажигания, продолжительность которого определялось по данным скоростной видеосъемки. Временем задержки зажигания считался интервал времени от момента, когда держатель с топливной навеской входил в фокус камеры, до начала видимого свечения поверхности топлива, что соответствовало началу процесса горения.

Газофазные продукты (CO , CO_2 и NO_x), образующиеся в процессе горения, проходили через трубку из камеры сгорания и анализировались с помощью поточного газоанализатора *Tecm-203 (БОНЭР, Россия)*. Расход газов через газоанализатор составлял 0.4 л/мин. Время опроса датчиков составляло 3 с. Процесс горения считался завершенным по прекращению образования газофазных продуктов в виде CO и CO_2 . Далее зольный остаток удалялся с металлической подложки и охлаждался в керамическом тигле.

После окончания эксперимента газоанализатор и печь продувались воздухом для обеспечения точности измерений. Также с целью повышения точности для каждого образца было проведено не менее семи экспериментов в одинаковых условиях.

Топливный недожог, содержащийся в зольном остатке, был определен с помощью муфельной печи при температуре 900°C в среде воздуха в течение 3 ч. Перед определением топливного недожога, зольный остаток выдерживался в сушильном шкафу при температуре 105°C для удаления внешней влаги, которая составляла 1–2 мас. %.

Также в работе было проведено масштабирование процесса активируемого горения в твердотопливном водогрейном котельном агрегате слоевого типа “*Прометей ЭКО*” (Сибэнерготерм,

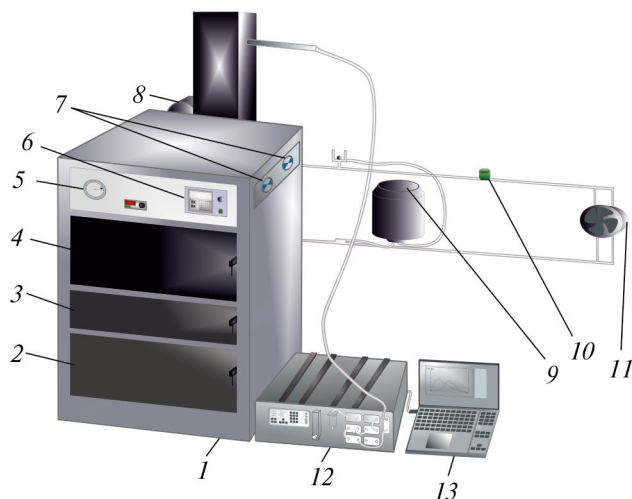


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментального стенда исследования слоевого процесса сжигания твердых топлив: 1 — котельный агрегат со слоевым способом сжигания, 2 — дверца зольной камеры, 3 — дверца чистки камеры горения, 4 — загрузочная дверца, 5 — капиллярный термометр, 6 — частотный регулятор, 7 — регуляторы первичного и вторичного воздуха, 8 — дымосос, 9 — расширительный бак, 10 — насос для циркуляции теплоносителя, 11 — потребитель тепла (тепловой вентилятор), 12 — поточный газоанализатор продуктов сгорания, 13 — персональный компьютер для сбора и обработки данных поточного газоанализатора.

Таблица 2. Технические характеристики котельного агрегата

Рабочее давление, бар	3.0
Объем бункера, л	170
КПД, %	93
Мощность (мин./ном.), кВт	14.3–30.0
Высота, мм	1610
Ширина, мм	680
Глубина, мм	945
Диаметр дымового патрубка, мм	150
Объем воды, л	106
Основное топливо	Дрова/Уголь
Рабочая производительность дымососа, м ³ /ч	200
Частота вращения электродвигателя дымососа, об./мин	2800

Россия) мощностью 30 кВт. Принципиальная схема экспериментального стенда приведена на рис. 1. В табл. 2 представлены технические характеристики котельного агрегата.

Методика проведения эксперимента включала несколько этапов. Предварительно приводился в действие дымосос, производительность которого регулировалась электродвигателем с помощью частотного преобразователя. Для обеспечения непрерывного присоса воздуха на всех этапах проведения эксперимента были открыты все регулирующие шиберы котельного агрегата.

Образец твердого топлива массой 2 ± 0.03 кг помещался на колосник через верхнюю камеру, выполняющую функцию топливного бункера. Далее с помощью газовой горелки осуществлялся розжиг угля.

В качестве теплоносителя была использована низкотемпературная жидкость (антифриз), используемая для работы теплообменного устройства (теплового вентилятора).

Анализ влияния используемых активирующих добавок проводился на основании данных о составе газофазных продуктов сгорания (CO , CO_2 , NO_x), регистрируемых с помощью поточного газоанализатора *Тест-203* (БОНЭР, Россия).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлена гистограмма, отражающая значения времени задержки зажигания τ_i исследуемых образцов при температуре греющей среды $T_g = 700^\circ\text{C}$.

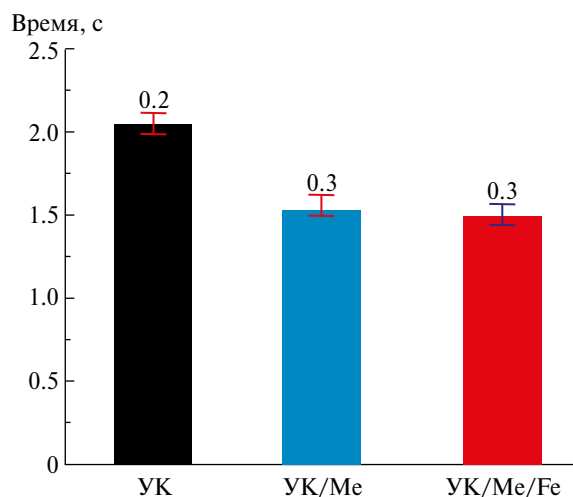


Рис. 2. Время задержки зажигания τ_i исследуемых образцов при температуре греющей среды $T_g = 700^\circ\text{C}$. Значения вычислены по данным высокоскоростной видеосъемки.

Активирующие добавки способствуют увеличению реакционной способности топлива, что выражено в сокращении времени задержки зажигания τ_i в среднем на 46%. При этом наибольшее изменение параметра τ_i наблюдается для образца угля, модифицированного нитратом железа и металлической окалиной (УК/Ме/Fe).

Изменение реакционной способности за счет использования активирующих добавок, в частности металлической окалины, вероятнее всего связано с ее каталитической активацией при нагреве. По данным *XRD*-анализа состав окалины определяется оксидом железа и марганца, обладающих высокими каталитическими свойствами, активирующих процесс горения. Формы кислорода, активированные на поверхности оксидов металлов, характеризуются высокой подвижностью и способностью окислять углеродистый субстрат. Так, взаимодействие оксидов металлов и углеродного материала сопровождается переносом электронной плотности, что способствует дополнительной активации окисленного субстрата. Также добавим, что металлы имеют более высокое значение теплопроводности (55–80 Вт/(м К)) [18] по сравнению с твердым органическим топливом (0.134 Вт/(м К)) [19]. В работе [20] сообщается, что интенсификация процесса окисления топлива железосодержащим порошком в том числе может быть связана не только с их составом, но и с различием морфологических и текстурных характеристиках частиц окалины относительно топлива, которые имеют более высокую удельную

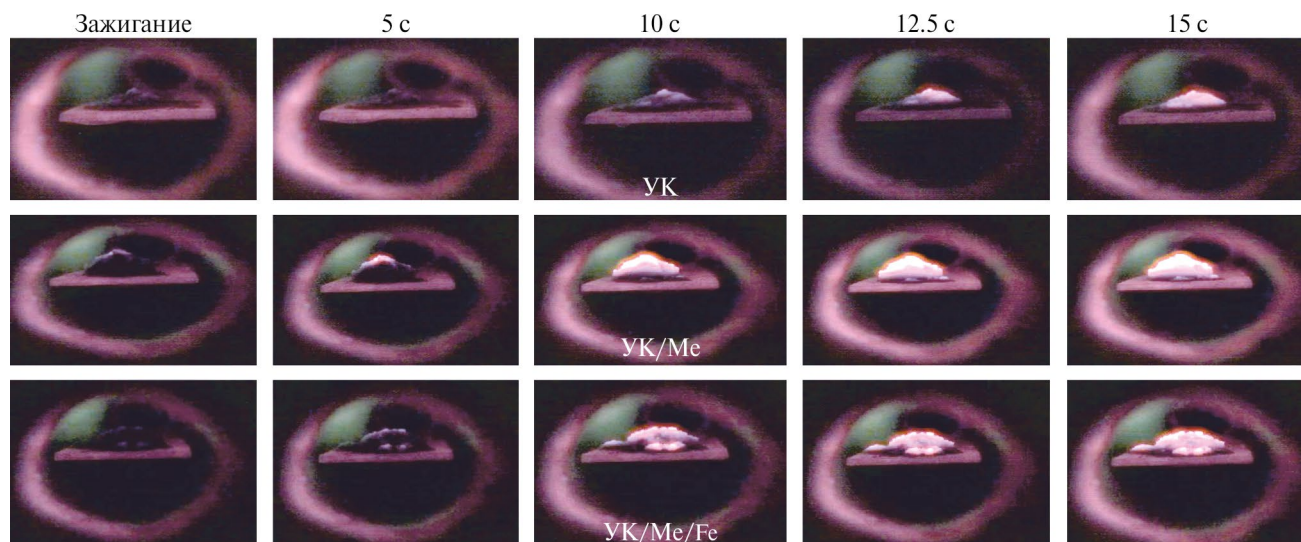


Рис. 3. Кадры высокоскоростной видеосъемки процессов зажигания и последующего горения исследуемых образцов. Температура греющей среды $T_g = 700^\circ\text{C}$, масса навески 0.1 г.

поверхность и пористость. Таким образом образец, содержащий окалину, характеризуется более быстрым прогревом топливного состава, что положительно отражается на кинетике процесса окисления и следственно приводит к сокращению времени задержки зажигания (рис. 2).

В свою очередь каталитическое действие нитрата железа заключается в том, что он усиливает активацию реакции окисления угля при более низких температурах, увеличивая эффективность процесса сжигания. Нитрат железа может вступать в реакцию с углем, выделяя оксид азота (NO_x) в процессе горения. Оксид азота, вместе с кислородом воздуха, способствует окислению и горению угля.

На рис. 3 представлены типичные кадры высокоскоростной видеосъемки процесса горения исследуемых образцов при $T_g = 700^\circ\text{C}$. Зажигание исходного образца (УК) происходит на поверхности навески без ярко выраженной локальной зоны и видимого пламени. Это обусловлено низким содержанием летучих соединений (табл. 1). Также отметим, что перед зажиганием предшествуют несколько стадий, связанных с нагревом топлива, испарением влаги и разрушением частиц топлива, что приводит к выделению летучих соединений. После зажигания образцов, во время их нахождения в камере сгорания, происходит распространение фронта горения, начиная с поверхности и последующим продвижением к центру навески. Это проявляется в увеличении

интенсивности свечения и, соответственно, повышении температуры.

Значения временных интервалов нагрева, зажигания и распространения фронта горения (скорости горения) являются отличительными для аналогичных процессов модифицированных образцов. Для модифицированных образцов отмечается более раннее зажигание (рис. 2) и увеличение скорости горения на начальной стадии процесса (временной интервал от момента зажигания 0–10 с), что проявляется в более интенсивном свечении топливной навески и распространении фронта горения. В основном это объясняется увеличением площади контакта между частицами топлива и каталитически активной частью добавки в виде оксидов металлов, что способствует более эффективному поступлению окислителя к углеродному субстрату и, следовательно, ускоряет процесс окисления.

По результатам прокаливании зольного остатка исследуемых образцов, полученных после их сжигания в камере сгорания, количество образующегося топливного недожога для исходного образца угля (УК) составило 3.4 мас. %. Для модифицированных образцов УК/Me и УК/Me/Fe – 1.3 и 1.4 мас. % соответственно. Снижение топливного недожога для модифицированных образцов может быть связано с каталитической активацией переноса кислорода в процессе горения топлива, а также развитием пористой структуры частиц топлива при интенсификации высвобождения летучих со-

единений и разложения нитрата железа (в случае образца УК/Ме/Fe).

На рис. 4 представлены зависимости изменения концентраций, образующихся газофазных продуктов сгорания (CO , CO_2 и NO_x) исследуемых образцов твердого топлива при температуре греющей среды ($T_g = 700^\circ\text{C}$).

Горение исследуемых образцов сопровождается образованием оксида углерода, что связано с неполным его окислением. Использование активирующих добавок способствует существенному уменьшению концентрации CO в газофазных продуктах сгорания (рис. 4, а). Оксиды металлов активируют процесс окисления, а их предшественник (нитрат железа) выступает в качестве дополнительного источника окислительной среды в виде образующегося NO_x [21], как основного газофазного продукта термического разложения нитратов [22]. Таким образом на ранней стадии горения образца, модифицированного нитратом железа, прослеживается более интенсивный характер выделения NO_x , что обусловлено разложением используемой добавки (рис. 4, в).

Также отметим, что для модифицированных образцов, несмотря на снижение количества горючей части топлива, наблюдаются сравнительно высокие значения максимальных концентраций образующегося CO_2 (рис. 4, б). Данный эффект связан с интенсификацией окисления CO и топливного недожога в результате участия каталитически активных металлов.

Образование NO_x (включая и образец УК/Ме/Fe) связано с вовлечением молекулярного азота из воздуха и окислением топливного азота (табл. 1). Последний вносит ключевой вклад в формирование образующегося NO_x при горении исследуемых образцов. При этом использование оксидов металлов (в частности, для образца УК/Ме) приводят к существенному снижению количества, образующегося NO_x , что также находится в согласии с данными авторов других работ [11, 23]. Данный эффект обусловлен ингибированием конверсии топливного азота. Также известно [24], что NO может подвергаться, как каталитическому, так и некаталитическому восстановлению при взаимодействии углерода и образующегося при его сгорании CO . Рядом научных групп [25–28] было обнаружено, что Fe и его оксиды в процессе каталитического сжигания твердого топлива играют ключевую роль в

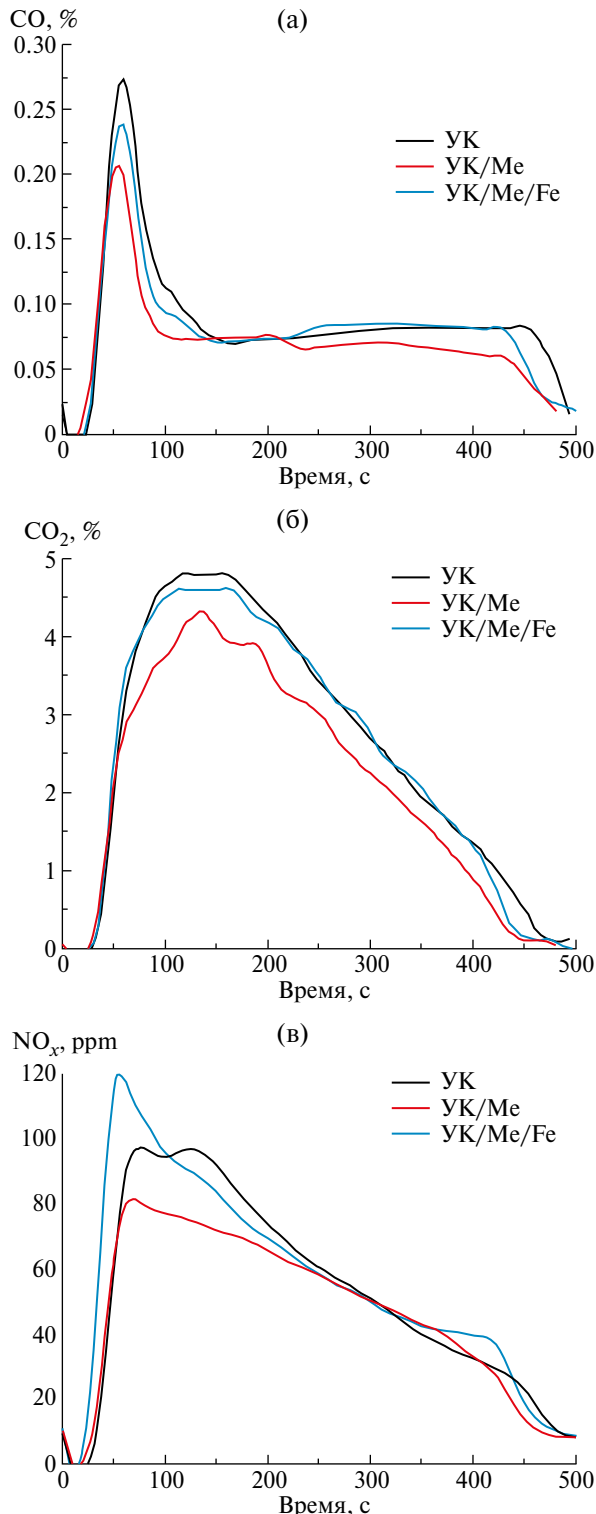


Рис. 4. Графики выхода дымовых газов при сгорании на топливной навеске при температуре греющей среды $T_g = 700^\circ\text{C}$ (CO (а), CO_2 (б), NO_x (в)).

восстановлении NO за счет переноса кислорода к углеродной поверхности и активации реакции $\text{C}-\text{NO}$ и $\text{NO}-\text{CO}$.

Таблица 3. Относительные значения подынтегральных площадей, характеризующие выделение газофазных соединений (CO , CO_2 и NO_x) для исходных ($S^{\text{CO}}_{\text{исх}}$ и $S^{\text{NO}_x}_{\text{исх}}$) и модифицированных ($S^{\text{CO}}_{\text{мод}}$ и $S^{\text{NO}_x}_{\text{мод}}$) образцов

Образец	$S^{\text{CO}}_{\text{мод}}/S^{\text{CO}}_{\text{исх}}$	$S^{\text{NO}_x}_{\text{мод}}/S^{\text{NO}_x}_{\text{исх}}$
УК/Ме	0.67	0.62
УК/Ме/Fe	0.78	1.04

В табл. 3 представлены относительные значения подынтегральных площадей, вычисленных по данным анализа газофазных соединений (CO и NO_x), образующихся в процессе горения исходного и модифицированных образцов в твердотопливном котельном агрегате слоевого типа.

Для образцов, модифицированных активирующими добавками, наблюдается значительное уменьшение выделения общего количества CO . Несмотря на то, что наибольший эффект по снижению количества топливного недожога и сравнительно сопоставимого изменения реакционной способности (рис. 2) был получен для образца УК/Ме/Fe, наименьшее количество образующегося CO прослеживается в случае использования металлической окалины (образец УК/Ме). Вероятнее всего это может быть связано в количественном увеличении доли оксидов металлов в составе угля и их вклада в каталитическую активацию процесса горения.

Использование металлической окалины (образец УК/Ме) также способствует значительному снижению выделения NO_x , что находится в согласии с данными, представленными на рис. 4. В свою очередь для образца УК/Ме/Fe процесс горения сопровождался с образованием дополнительного количества оксида азота, который связан с разложением нитрата железа на ранней стадии горения угля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе исследовано влияния отходов металлопрокатного производства (металлической окалины) и предшественников оксидов металлов (нитрат железа) на активацию процесса горения каменного угля. Добавки были нанесены методом механического смешения в количестве 5 мас. %. Нитрат железа был использован в качестве дополнительного компонента к металлической окалине (в количестве 1.5 мас. % от общей массы образцы) для усиления активирующих свойств добавки. Исследование процесса горения было выполнено с использованием экспериментального стенда сжигания твердого топлива с высокоскоростной видеосъемкой и

твердотопливного котельного агрегата со слоевым способом сжигания.

Установлено, что использование активирующих добавок приводит к повышению реакционной способности каменного угля, что было выражено в сокращении времени задержки зажигания (в среднем на 46%) и скорости распространения фронта горения.

Помимо повышения реакционной способности твердых топлив, применение активирующих добавок способствует снижению образующегося топливного недожога и более глубокого окисления CO до CO_2 . Аналогичная тенденция в части уменьшения эмиссии CO была установлена также при проведении исследования процесса активируемого горения каменного угля на твердотопливном котельном агрегате.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках проекта FZES-2024-0001.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. URL: <https://www.iea.org/energy-system/fossil-fuels/coal> (Дата обращения 09.10.2023).
2. URL: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer> (Дата обращения 09.10.2023).
3. *Ismagilov Z.R., Kerzhentsev M.A.* // Catal. Today. 1999. V. 47. № 1–4. P. 339.
4. *Simonov A.D., Fedorov N.A., Dubinin Y.V., Yazykov N.A., et al.* // Catal. Ind. 2013. V. 5. № 1. P. 42.
5. *Xuzhong G., Guo Zh., Wang Zh.* // Combustion and Flame 2010. V.157. № 2. P. 351.
6. *Ma B.G., Li X.G., Xu L., Wang K., Wang X.G.* // Thermochimica Acta. 2006. V. 445. №. 1. P. 19.
7. *Yin K., Zhou Y.M., Yao Q.Z., Fang C., Zhang Z.W.* //

- Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis. 2012. V. 106. №. 2. P. 369.
8. Zou C., Wen L., Zhang S., Bai C., Yin G. // Fuel Process Technol. 2014. V. 119. P. 136.
 9. Cheng J., Zhou F., Xuan X., Liu J., et al. // Fuel. 2017. V. 187. P. 398.
 10. Zhang H., Dou B., Li J., Zhao L., Wu K. // J. Energy Inst. 2020. V. 93. P. 2526.
 11. Lei Z., Liu M., Yan J., Chun T. et al. // Fuel. 2021. V. 289. P. 119779.
 12. Zou C., Zhao J. // J. Energy Inst. 2017. V. 90. P. 797.
 13. Larionov K.B., Berezikov N., Kaltaev A.Zh. Gorshkov A.S. // Coke Chem. 2022. V. 65. P. 167.
 14. Larionov K.B., Mishakov I.V., Slyusarskiy K.V., Tsibulskiy S.A., Tabakaev R.B., Bauman Y.I., Vedyagin A.A., Nalivaiko A.Y., Gromov A.A. et al. // Fuel Process. Technol. 2021. V. 213. P. 106706.
 15. Wang C., Lei M., Yan W., Wang S., Jia L. // Energy and fuels. 2011. V. 25. № 10. P. 4333.
 16. Gubin A.V., Kaltaev A.Z., Gorshkov A.S., Matveeva A.A., Larionov K.B. // Coke Chem. 2023. V. 66. № 5. P. 237.
 17. Larionov K.B., Kaltaev A.Z., Berezikov N.I. et al. // Combust. Sci. Technol. 2022. P. 1.
 18. Carvill J. Mechanical engineer's data handbook. Butterworth-Heinemann, 1994. 342 p.
 19. Kuznetsov G.V., Malyshev D.Y., Syrodoy S.V. et al. // Combust. Sci. Technol. 2022. V. 194. P. 1003.
 20. Wiwik S Watanabe, Dong-Ke Zhang. // Fuel Process. Technol. 2001. V. 74. P. 145
 21. Wang Y., Wang J., Chen H., Yao M., Li Y. // Chem. Eng. Sci. 2015. V. 135. P. 294.
 22. Richardson H.W. Copper Compounds in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry 2002. 30 p.
 23. Yanguang Ch., Guo Zh., Wang Zhi. // Fuel Proc. Technol. 2009. V. 90. № 7–8. P. 933.
 24. Larionov K.B., Gromov A.A. // Intern. J. Coal Science & Technology. 2019. V. 6. № 1. P. 37.
 25. Sun J., Zhao B., Su Y. // Energy. 2019. V. 185. P. 229.
 26. Müller C.R., Bohn C.D., Song Q., Scott S.A, and Dennis J.S. // Chem. Engng J. 2011. V. 166. № 3. P. 1052.
 27. Yang N., Yu J., Dou J., Tahmasebi A. et al. // Fuel Process. Technol. 2016. V. 152. P. 102.
 28. Fennell P.S., Dennis J.S., Hayhurst A.N. // Energy & Fuels. 2011. V. 25. № 4. P. 1510.

Activation of the Process of Layer Combustion of Bitter Coal with Iron Nitrate and Waste of Metal Rolling Production

M. K. Shuataev^{1,*}, A. Zh. Kaltaev^{1,}, K. B. Larionov^{1,2,***}**

¹National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050 Russia

²Gorbachev Kuzbass State Technical University, Kemerovo, 650000 Russia

*e-mail: mks11@tpu.ru

**e-mail: azk2@tpu.ru

***e-mail: laryk070@gmail.com

The influence of metal-rolling production waste and iron nitrate on the characteristics of the process of layer combustion of coal is investigated. As a solid fuel, coal of the T grade was used. Metal scale and iron nitrate were introduced into the fuel by mechanical mixing. According to XRD data, phases of iron oxides Fe_3O_4 and manganese Mn_3O_4 were identified in the metal scale. The characteristics of the combustion process of the studied samples were studied using high-speed video with the use of a combustion chamber at a heating medium temperature of 700°C. Combustion Also, the process of activated layer combustion coal was scaled using a solid fuel boiler unit. It has been experimentally established that the use of metal scale and iron nitrate leads to an increase in the reactivity of the fuel, as evidenced by a decrease in the ignition delay time. Due to the intensification of the combustion process, the fuel underburning and the concentration of CO formed in the composition of gas-phase combustion products were reduced.

Keywords: coal, metal scale, iron nitrate, ignition and combustion, activation, reactivity, fuel underburning, gas-phase compound