

УДК 662.73

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА ОКИСЛЕНИЯ БУРОГО И КАМЕННОГО УГЛЕЙ АКТИВИРУЮЩЕЙ ДОБАВКОЙ $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$

© 2019 г. К. Б. Ларионов^{1,*}, И. В. Мишаков^{2,**}, К. В. Слюсарский^{1,***}, В. Е. Губин^{1,****},
А. А. Ведягин^{2,*****}

¹ Томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия

² ФГБУН Институт катализа имени Г.К. Борескова СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия

*e-mail: laryk070@gmail.com

**e-mail: mishakov@catalysis.ru

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

****e-mail: gubin@tpu.ru

*****e-mail: vedyagin@catalysis.ru

Поступила в редакцию 14.03.2019 г.

После доработки 28.03.2019 г.

Принята к публикации 03.06.2019 г.

Исследован процесс окисления бурого и каменного углей, модифицированных активирующей добавкой $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$ (5 мас. %). Нанесение нитрата железа осуществлялось методом пропитки по влагеомкости с предварительным растворением $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$ в водно-спиртовом растворе, с объемным соотношением $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} : \text{H}_2\text{O} = 50 : 50$. Реакционная способность образцов была изучена методом термогравиметрического анализа в режиме окисления при скорости нагрева $2.5^\circ\text{C}/\text{мин}$ в интервале температур $25\text{--}600^\circ\text{C}$ при атмосферном давлении. Установлено, что использование активирующей добавки способствовало снижению начальной температуры интенсивного окисления ($\Delta T_i = 77^\circ\text{C}$) и смещению процесса в низкотемпературную область в целом. Методом масс-спектрометрии выполнен качественный анализ газофазных продуктов окисления углей, и установлено, что снижение начальной температуры выхода летучих соединений сопряжено с разложением нитрата железа. По методу *Coats–Redfern*, вычислены значения энергии активации процесса окисления в присутствии нитрата железа. Максимальное снижение E_a (с 74.0 до 64.4 кДж/моль) наблюдалось для модифицированного образца каменного угля. Обсужден возможный механизм действия нитрата железа, приводящий к активации процесса окисления исследуемых углей.

Ключевые слова: бурый уголь, каменный уголь, температура начала окисления, активируемое окисление, нитрат железа, термогравиметрический анализ, масс-спектрометрический анализ

DOI: 10.1134/S0023117719050074

ВВЕДЕНИЕ

Одним из современных технических решений в области интенсификации процесса горения энергетических углей является его каталитическое сжигание в топливосжигающих аппаратах [1, 2]. Особенность данной технологии заключается в интенсификации процесса горения за счет активного взаимодействия топлива с катализатором [1], что позволяет обеспечить более высокую эффективность сгорания топлива, снизить тепловые потери и минимизировать выход вредных соединений (NO_x , SO_x , CO) в уходящих газах [2]. В качестве каталитических агентов, как правило, используют оксиды различных металлов, способные ускорять процесс окисления (полного сгорания) органического топлива [3–5].

Несмотря на ряд достоинств [1, 2], каталитическое сжигание имеет ограничение по организации процесса при слоевом сжигании угля ввиду проблем эффективного перемешивания угля и каталитических агентов. Вектор современных исследований в области слоевого каталитического сжигания угля указывает на необходимость поиска и разработки новых систем “уголь–катализатор”, основанных на использовании добавок солей [6–8], являющихся предшественниками оксидов металлов. В отличие от обширной библиографии по применению гетерогенных катализаторов на основе оксидов металлов, сведения по теории и экспериментальным исследованиям процессов совместного сжигания угля с активирующими солевыми добавками ограничены и требуют физико-химического обоснования.

Таблица 1. Характеристики исследуемых образцов углей*

Образец	W^r	A^r	V^r	C^r	C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S^{daf}	O^{daf}	Влаго- емкость, мл/г	Распределение частиц по размерам, мкм			
	мас. %				% на daf						X_{10}	X_{50}	X_{90}	X_{cp}
УБ	1.0	4.5	39.8	54.7	59.4	5.3	1.7	0.9	32.7	3.4	2.8	13.9	34.8	18.3
УК	0.3	16.5	13.1	70.1	80.0	2.8	2.5	0.4	14.3	2.6	4.6	20.4	57.6	26.5

* Порошки углей были предварительно высушены при температуре 105°C до постоянной массы.

Известно [9], что многие нитраты характеризуются сильными окислительными свойствами, низкой температурой плавления (разложения) и прекрасной растворимостью в воде. Последнее значительно упрощает их нанесение методом пропитки [10] на поверхность твердого топлива, например использование $Ni(NO_3)_2$ в качестве иницирующей добавки приводило к максимальному снижению температуры зажигания углей (около 50°C), по сравнению с добавками оксидов металлов [7].

Цель настоящей работы заключалась в экспериментальном определении параметров процесса окисления бурого и каменного углей (температуры, времени и скорости реакции, энергии активации) в присутствии нитрата железа, используемого в качестве активирующей добавки.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ И АНАЛИТИЧЕСКАЯ ЧАСТИ

В качестве исходных образцов были использованы следующие материалы: уголь бурый марки 2Б (УБ) и уголь каменный марки Т (УК) Бородинского и Алардинского месторождений соответственно. Крупнодисперсные образцы исходных углей (5–10 мм) измельчались в барабанной мельнице в течение 8 ч при равном соотношении массы мелющих тел и массы измельчаемого материала. После помола образцы фракционировались на ситах с размером ячеек 80 мкм. Результаты распределения размеров частиц образцов углей, которые были получены с помощью лазерного дифракционного анализатора частиц *Analysette 22 (Fritsch, Германия)* представлены в табл. 1.

Несмотря на однотипность процедуры подготовки образцов, средний диаметр частиц в их составе варьирует от 18.3 мкм (образец УБ) до 26.5 мкм (образец УК). Разница в размере частиц при подготовке проб прежде всего объясняется различной размоломоспособностью углей, которая определяется составом, строением и их свойствами [11].

В табл. 1 также представлены данные технического и элементного анализов исследуемых углей, выполненных с использованием стандартных методик [12]. Массовая доля основных элементов в составе образцов (С, Н, N, S, O) была

определена с помощью анализатора элементного состава *Euro EA 3000 (EuroVector, Италия)*. Исходные образцы бурого и каменного углей весьма различны по своим физико-химическим свойствам. Образец УБ характеризуется высоким значением выхода летучих веществ V^r (~40%). В то же время, бурый уголь, в отличие от каменного, имеет сравнительно небольшую концентрацию углерода C^{daf} (не более 65 мас. %) и почти в 4 раза меньшую величину зольного остатка A^r (не более 5 мас. %).

Отличие образцов УБ и УК также прослеживается и в морфологии частиц, что видно из микрофотографий, представленных на рис. 1. Снимки выполнены с использованием растрового электронного микроскопа *JSM-6460LV (JEOL, Япония)* с ионным сфокусированным пучком. Образец бурого угля, в отличие от каменного, характеризуется более аморфной структурой поверхности, со множеством углублений и трещин.

Активирующая добавка $Fe(NO_3)_2 \cdot 9H_2O$ вводилась в состав образцов методом пропитки по влагоемкости [10]. Для преодоления гидрофобности угольного порошка использовался водно-спиртовой раствор с объемным соотношением $C_2H_5OH/H_2O = 50/50$. Влагоемкость высушенных образцов углей (в мл/г) определялась непосредственно перед нанесением пропиточного раствора (табл. 1). Затем приготовленный раствор наносился на ранее подготовленные порошки угля с помощью механического дозатора. Пропитанные порошки угля выдерживались в сушильном шкафу при температуре 105°C в течение 20 ч. Массовая доля $Fe(NO_3)_2 \cdot 9H_2O$ в модифицированных образцах (в пересчете на сухую соль) составляла 5%. Для проведения сравнительного анализа также были приготовлены контрольные образцы (без добавок), подвергнутые в точности таким же процедурам обработки. Модифицированные образцы углей были обозначены следующим образом: УБ/Fe – бурый уголь, УК/Fe – каменный уголь.

Исследование процесса окисления модифицированных образцов углей проводилось с помощью синхронного термического анализатора *STA 449 C Jupiter (Netzsch, Германия)*. Эксперименты были проведены в одинаковых условиях при атмосферном давлении. Образец массой ~15 мг

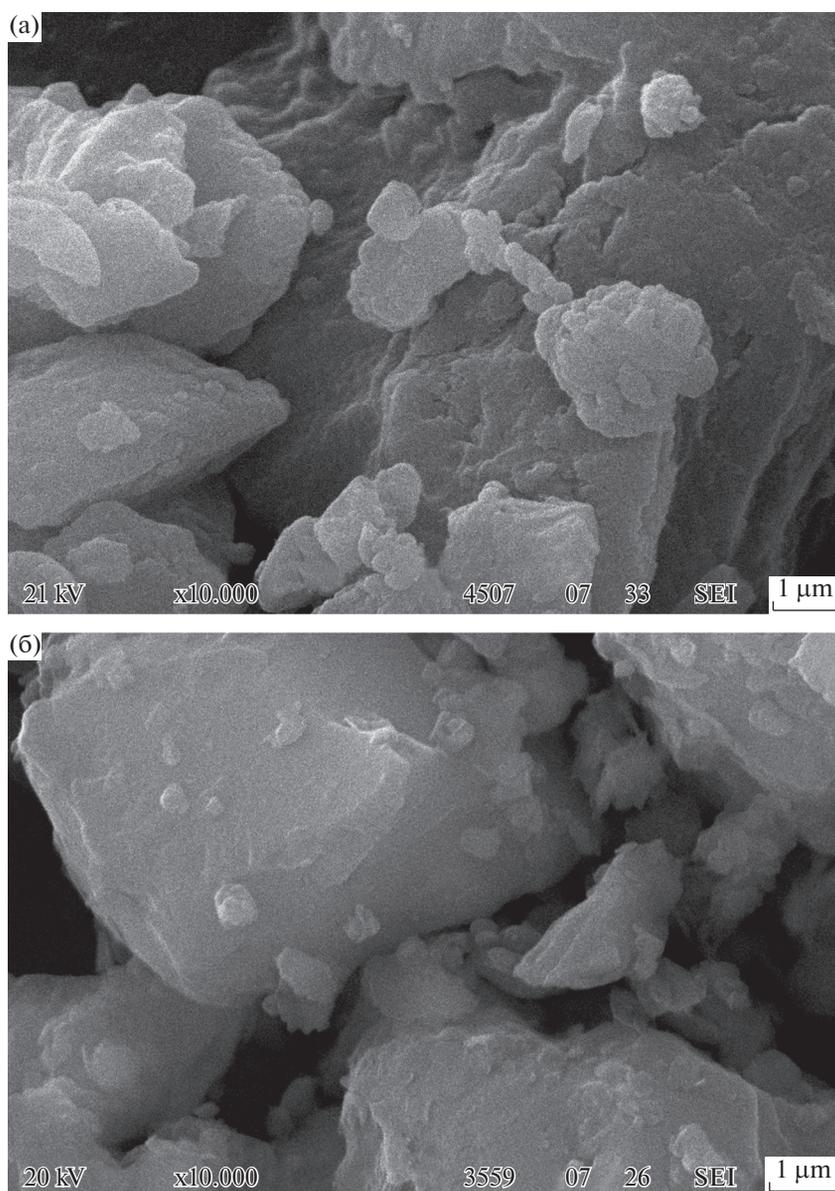


Рис. 1. Снимки РЭМ исследуемых образцов углей: а – образец УБ, б – образец УК. Данные РЭМ ($\times 10000$).

подвергался нагреванию в корундовом тигле с перфорированной крышкой в интервале температур 25–600°C при скорости нагрева 2.5°C/мин. В качестве окислительной среды использовали смесь воздуха (60 мл/мин) и азота (10 мл/мин). Азот использовался в качестве защитного газа для обеспечения надежной работы анализатора и корректной регистрации полученных данных.

Качественный анализ состава продуктов окисления углей (на выходе из термического анализатора) был выполнен с помощью квадрупольного масс-спектрометра *QMS 403 D Aeolos* (Netzsch, Германия).

В эксперименте определялись следующие характеристики процесса окисления углей: темпера-

тура начала (t_i) и окончания (t_f) интенсивного окисления; максимальная скорость реакции (w_{\max}) при соответствующей температуре (t_{\max}); время прогрева образца до начала окисления (T_e); общее время окисления (T); время достижения максимальной скорости реакции окисления (T_{\max}). Упомянутые параметры были рассчитаны из данных ТГА при помощи графического метода, подробное описание которого представлено в наших предыдущих работах [13, 14]. Также было проведено вычисление значений энергии активации E_a окисления образцов с использованием метода *Coats–Redfern* [15] на основании полученных данных термогравиметрического анализа.

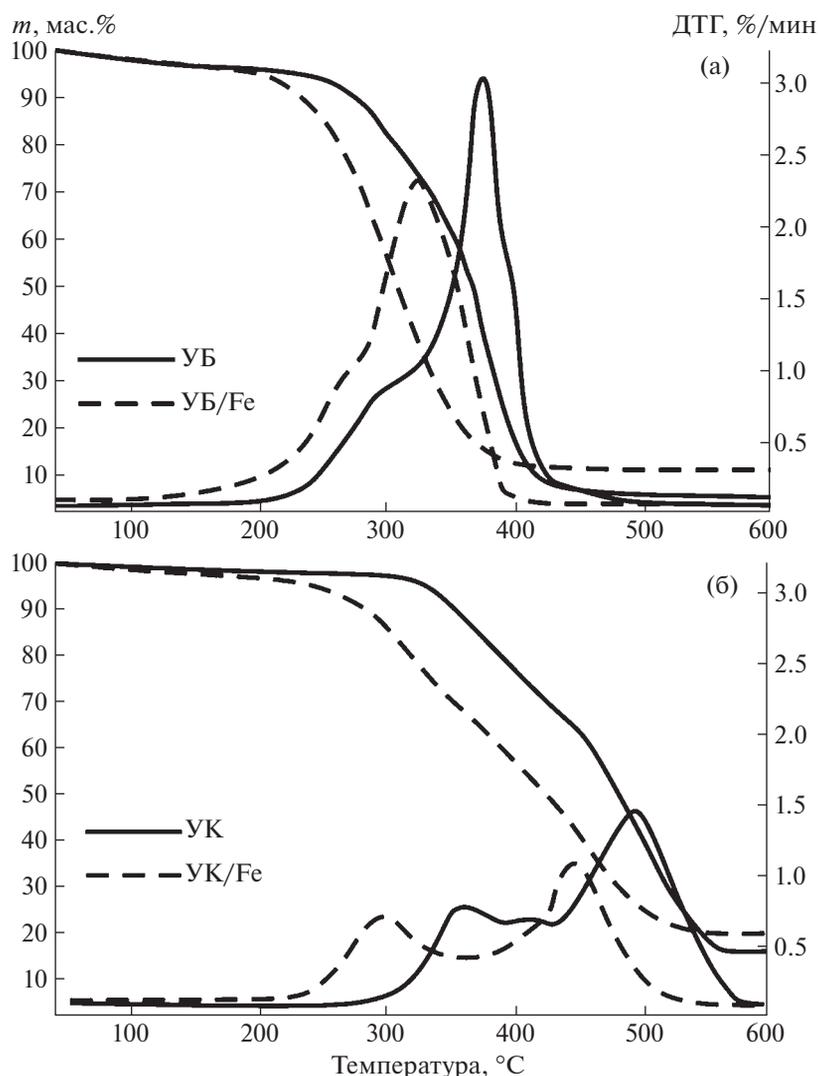


Рис. 2. Данные ТГ и ДТГ для процесса окисления образцов углей, модифицированных нитратом железа: образцы бурого угля (а); образцы каменного угля (б). Атмосфера – воздух (60 мл/мин), скорость нагрева 2.5 °С/мин.

В основе данного метода лежит следующее соотношение:

$$\ln \left[-\frac{\ln(1-\alpha)}{T^2} \right] = \ln \left[\frac{AR}{bE_a} \right] - \frac{E_a}{RT},$$

где α – степень конверсии угля; T – температура, К; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); A – предэкспоненциальный множитель, 1/мин; E_a – энергия активации, Дж/моль; β – скорость нагрева, К/мин. Решение данного уравнения и определение основных кинетических показателей осуществлялось путем аппроксимации экспериментальной зависимости в координатах $\ln(-\ln(1-\alpha)/T^2)$ от $1/T$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рис. 2 представлены результаты термического анализа (ТГ- и ДТГ-кривые) исследуемых образцов углей в атмосфере воздуха. Видно, что введение нитрата железа в состав образцов приводит к заметному изменению характера процесса, что выражается в снижении начальной температуры интенсивного окисления t_i .

Процесс окисления образцов сравнения можно разделить на три или четыре основных стадии (в зависимости от марки угля). На первой стадии происходит испарение физически адсорбированной влаги (до 100°C). Для второй стадии характерна термическая деструкция частиц угля, сопровождаемая возгонкой летучих соединений

(180–320°C для образца УБ и 300–420°C – для УК). На третьем и четвертом этапах наблюдается активное окисление высвобождаемых летучих соединений и образующегося коксового остатка (320–460°C для образца УБ, 420–580°C для образца УК). Отметим, что из ДТГ-кривых образцов бурого угля (в отличие от образцов серии УК, характеризующихся высокой степенью углефикации [16]) в данных экспериментальных условиях невозможно выделить переход между 3-й и 4-й стадиями, поскольку окисление образующегося коксового остатка для бурых углей происходит параллельно с высвобождающимися летучими компонентами.

Результаты термического анализа (рис. 2) показали, что наиболее значительное изменение характера окисления модифицированных образцов наблюдается в низкотемпературной области (для образца УБ/Fe до 360°C, для УК/Fe – 450°C), где происходит активное высвобождение летучих соединений. В результате интенсификации процесса для образцов с нанесенной добавкой Fe(NO₃)₂ происходит значительный сдвиг температуры начала интенсивного окисления t_i в низкотемпературную область. Так, для образца УБ/Fe Δt_i составило 40°C, для УК/Fe – 77°C. Большее значение температурного сдвига Δt_i для образца УК/Fe объясняется более высокой степенью углефикации данного вида топлива [5], которое имеет незначительное количество кислорода, связанного в гидроксильные группы [17].

В области более высоких температур (свыше 450°C) скорость потери массы модифицированных образцов замедляется, и характер ТГ-кривых становится аналогичным образцам сравнения. Таким образом, в результате интенсификации процесса окисления на стадии высвобождения летучих соединений происходит смещение в область более низких температур, в результате чего уменьшается температура окончания процесса окисления t_f (момент полного преобразования органической массы образца).

Аналогичная зависимость Δt_i проявляется также и в характерных точках ДТГ-кривых (t_{\max}), где скорость протекания реакции окисления имеет наибольшее значение w_{\max} . Максимальное изменение параметра t_{\max} (температура, соответствующая наибольшей скорости протекания реакции) составило 41°C (образец УК/Fe). Для образца УБ/Fe Δt_{\max} оказалось равным 20°C. При этом для серии образцов УК, имеющих бимодальное распределение ДТГ-кривых, разница значений $\Delta t_{\max 2}$ (стадия окисления коксового остатка) составила 22°C. Из анализа ДТГ-кривых для модифицированных образцов следует, что смещение температурных экстремумов (t_{\max}) в область меньших тем-

Таблица 2. Влияние активирующей добавки Fe(NO₃)₂ на характер образования газофазных продуктов при окислении каменного угля (данные МС-анализа)

Параметр	Образец			
	УБ	УБ/Fe	УК	УК/Fe
CO ₂ ($m/z = 44$)*				
t_{\max} (°C)	356/–	320/–	380/505	320/480
Δt_{\max} (°C)	–	36/–	–	60/25
NO _x ($m/z = 30$)				
$t_{\text{разл}}$ (°C)	–	206	–	200
t_{\max} (°C)	460	486	552	518
Δt_{\max} (°C)	–	26	–	34

*Значения для серии образцов каменного угля УК представлены для стадий высвобождения летучих веществ и окисления коксового остатка.

ператур сопровождается снижением максимальной скорости протекания реакции w_{\max} .

На рис. 3 представлены масс-спектрометрические профили выделения газофазных продуктов окисления (CO₂ и NO_x) исследуемых образцов углей.

Результаты анализа масс-спектрометрических данных (температура максимумов t_{\max} и их разница с образцом сравнения Δt_{\max} , а также температура экстремума, соответствующая разложению нитратов металлов $t_{\text{разл}}$) суммированы в табл. 2.

Форма МС-профиля для диоксида углерода ($m/z = 44$) – основного продукта окисления горючего вещества, фактически является зеркальным отражением соответствующей ДТГ-кривой исследуемых образцов. Для исходного образца каменного угля первый максимум (380°C) связан с окислением десорбирующихся летучих веществ, а второй (505°C) – с последующим окислением коксового остатка. Введение активирующей добавки Fe(NO₃)₂ приводит к снижению температуры возгонки и началу интенсивного окисления летучих веществ; концентрационные кривые для CO₂ в этом случае также характеризуются сдвигом экстремумов в низкотемпературную область. Наибольший сдвиг максимума наблюдается для образца УК/Fe $\Delta t_{\text{CO}_2} = 60^\circ\text{C}$ в области возгонки и окисления летучих веществ. Для образца УБ/Fe Δt_{CO_2} той же области составило 36°C.

Также на рис. 3 представлены масс-спектрометрические профили, соответствующие образованию оксидов азота NO_x ($m/z = 30$). Видно, что в случае использования активирующей добавки Fe(NO₃)₂ наблюдается существенное изменение МС-профиля для NO_x. В первую очередь стоит отметить образование широкого интенсивного

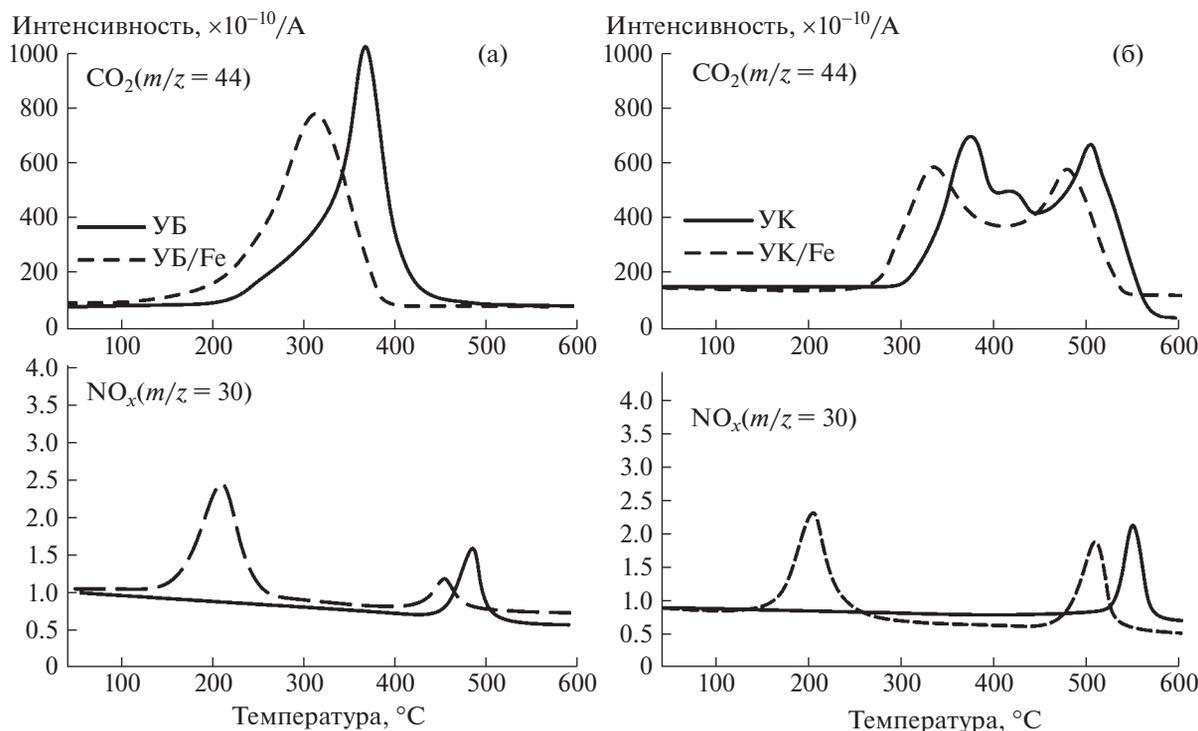


Рис. 3. Профили выделения газофазных продуктов окисления (CO_2 и NO_x): образцы бурого угля (а); образцы каменного угля (б). Атмосфера – воздух (60 мл/мин), скорость нагрева $2.5^\circ\text{C}/\text{мин}$.

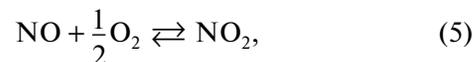
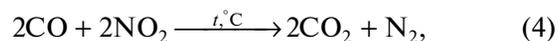
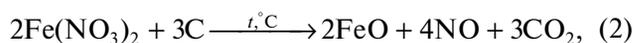
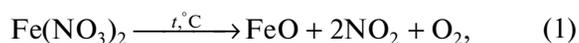
пики в низкотемпературной области ($180\text{--}240^\circ\text{C}$) для всех модифицированных образцов, что, вероятнее всего, связано с разложением нанесенного нитрата железа (рис. 3). Характер выделения NO_x свидетельствует о том, что разложение $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$ начинается уже при $\sim 165^\circ\text{C}$, что указывает на определенную степень участия носителя (угля) в данном процессе [18].

Вторая, менее интенсивная, волна выделения NO_x имеет отношение к образованию оксидов азота в режиме окисления коксового остатка за счет вовлечения молекулярного азота N_2 в процесс термического преобразования в воздушной среде (рис. 3). Следует подчеркнуть, что в данном случае также имеет место смещение второго пика Δt_{NO_2} в низкотемпературную область ($\Delta t_{\text{max}} = 34^\circ\text{C}$). Важно отметить, что данный процесс сопровождается заметным уменьшением интенсивности образования NO_x , что следует из сопоставления данных на рис. 3.

Таким образом, оксиды азота NO_x , образующиеся в результате разложения нанесенного нитрата железа, способствуют значительному ускорению процесса окисления углей [19], инициируя более раннее освобождение летучих соединений и их последующее окисление. Сопоставление результатов ДТГ- и МС-анализа (рис. 2 и 3) позволяет заключить, что сдвиг начальной температу-

ры интенсивного окисления Δt_i находится в прямой корреляции с температурой разложения $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$.

Рассматривая возможное действие активирующей добавки на процесс окисления углей, следует упомянуть ряд ключевых уравнений реакций:



Во-первых, нагревание нитрата железа (до 190°C и выше) приводит к его разложению по уравнению (1). В то же время, согласно данным МС-анализа, разложение нанесенной соли $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$ начинается при более низкой температуре (165°C), что свидетельствует об участии углерода в данном процессе в качестве восстановителя (2). В результате разложения нитрата образуются оксиды азота NO и NO_2 (NO_x) последний из которых выступает в роли сильного окислителя,

Таблица 3. Характеристики процесса окисления бурых и каменных углей, вычисленные по данным ДТА

Параметр	Образец			
	УБ	УБ/Fe	УК	УК/Fe
Температура начала интенсивного окисления, t_i , °C	260	220	340	263
Время прогрева образца до момента начала интенсивного окисления, T_e , мин	86	70	118	82.5
Температура окончания процесса окисления, t_f , °C	500	420	578	520
Время интенсивного окисления образца, T_f , мин	96	80	95.2	102.3
Температура при максимальной скорости реакции окисления*, $t_{\max 1}/t_{\max 2}$, °C	380/—	360/—	361/497	320/475
Максимальная скорость реакции окисления*, $w_{\max 1}/w_{\max 2}$, мас. %/мин	3.1/—	2.3/—	0.8/1.5	0.7/0.9
Время достижения максимальной скорости реакции окисления* $T_{\max 1}/T_{\max 2}$, мин	48/—	32	8.4/26	21.2/31.8
Энергия активации процесса окисления, E_a , кДж/моль	68.6	62.7	74.0	64.4

*Значения для серии образцов каменного угля УК представлены для стадий высвобождения летучих веществ и окисления коксового остатка

активирующего процесс горения углерода и летучих соединений (3) и (4). Взаимодействие угля с диоксидом азота сопровождается образованием NO, который далее легко окисляется кислородом воздуха в соответствии с обратимой газофазной реакцией (5). Таким образом, разложение нанесенной добавки способствует активации взаимодействия субстрата и окислительной средой в результате термической деструкции угля, которая выражается изменением внутренней и поверхностной структуры частиц.

Процесс разложения $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$ завершается образованием дисперсного нестехиометрического оксида железа Fe_xO_y , равномерно распределенного в структуре окисляемого образца. Известно [5], что нанесенный оксид железа обладает заметной каталитической активностью в реакциях полного окисления органических субстратов и топлива, что позволяет рассматривать дальнейшее участие образующихся частиц Fe_xO_y в качестве катализатора, ускоряющего процесс окисления углей (6). На поверхности дисперсных частиц оксида железа происходит активация дикислорода с последующей передачей активированного кислорода на углеродный носитель, что в конечном итоге способствует более быстрому окислению горючего субстрата.

В табл. 3 приведены характеристики процесса окисления исследуемых образцов углей, вычисленные по данным ДТА. Как уже отмечалось ранее, максимальный эффект, проявляющийся в снижении начальной температуры окисления угля, реализуется для модифицированного образца каменного угля ($\Delta t_i^{\text{УК/Fe}} = 77^\circ\text{C}$). Наблюдаемая разница в значениях Δt_i для исследуемых серий образцов УБ и УК, по-видимому, связана с различиями в физико-химических характеристиках углей. Для всех модифицированных образцов наблюдается смещение процесса окисления в

низкотемпературную область. Понижение температуры инициации окисления t_i приводит к сокращению времени прогрева образца до момента начала интенсивного окисления T_e (для бурого угля изменение T_e составило 16 мин, для каменного $\Delta T_e = 35.5$ мин). При этом сокращение времени протекания процесса интенсивного окисления T_f наблюдается только для образца УБ/Fe ($\Delta T_f^{\text{УБ/Fe}} = 16$ мин), что может быть связано с высоким выходом летучих веществ, содержащихся в составе бурого угля (табл. 1). Для образца УК/Fe основное воздействие активирующей добавки $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$ сосредоточено в области высвобождения и окисления летучих веществ. На стадии окисления коксового остатка, в условиях перехода процесса в низкотемпературную область, скорость реакции замедляется, о чем свидетельствует увеличение ширины пиков ДТГ-кривых (рис. 2).

Согласно данным табл. 3, также видно, что с переходом процесса в низкотемпературную область, снижается и значение температуры t_{\max} соответствующей максимальной скорости реакции. Вследствие бимодального характера ДТГ-кривой для модифицированного образца каменного угля параметр t_{\max} был определен для стадий высвобождения летучих веществ $t_{\max 1}$ (41°C) и окисления коксового остатка $t_{\max 2}$ (22°C).

Для образца УБ/Fe значение параметра Δt_{\max} составило 20°C . Сопоставляя вычисленные значения характеристик процесса окисления с ранее полученными результатами [13], можно заключить, что добавка в виде $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$ имеет более сильные активирующие свойства, что приводит к смещению процесса в область более низких температур.

Результаты расчетов энергии активации по методу *Coats–Redfern* показали, что активирование

образцов добавкой $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$ во всех случаях приводит к снижению E_a процесса окисления, причем максимальное снижение энергии активации, как и следовало ожидать, наблюдается для образца УК/Fe ($\Delta E_a \sim 9.6$ кДж/моль). Полученные значения энергии активации хорошо согласуются с литературными данными [13, 20].

ВЫВОДЫ

Результаты проведенного исследования показали, что введение активирующей добавки $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$ в состав образцов бурого и каменного углей в количестве 5 мас. % оказывает ускоряющее воздействие на процесс окисления в обоих случаях.

Показано, что присутствие активирующей добавки нитрата железа в составе образцов приводит к следующим эффектам: 1) снижение температуры, соответствующей началу высвобождения и окисления летучих соединений; 2) сокращение времени подготовительной стадии прогрева образцов до начала активного взаимодействия; 3) смещение процесса окисления в область более низких температур.

По результатам масс-спектрометрического и термогравиметрического анализа, для образцов модифицированных добавкой $\text{Fe}(\text{NO}_3)_2$, температурная область выхода летучих веществ находится в прямой корреляции с температурой начала разложения нитрата железа (ниже 200°C). Оксид железа, образующийся в результате разложения нитрата железа, катализирует дальнейший процесс полного окисления углей. Также установлено, что смещение процесса окисления угля в низкотемпературную область способствует заметному снижению концентрации оксидов азота NO_x , образующихся в результате горения углей в высокотемпературной области вследствие вовлечения молекулярного азота N_2 в процесс окисления топлива.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках реализации проектов № 0303-2016-0014 и № 13.7644.2017/8.9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Симонов А.Д., Федоров И.А., Дубинин Ю.В., Языков Н.А., Яковлев В.А., Пармон В.Н. // Катализ в промышленности. 2012. № 3. С. 50.
2. Пармон В.Н., Симонов А.Д., Садыков В.А., Тихов С.Ф. // Физика горения и взрыва. 2015. Т. 51. № 2. С. 5. Combustion, Explosion and Shock Waves, 2015, [vol. 51, Issue 2, p. 143.] <https://doi.org/10.1134/S001050821502001X>
3. Gong X., Guo Z., Wang Z. // Combust. Flame. 2010. V. 157. P. 351.
4. Gong X., Guo Z., Wang Z. // Energy. 2010. V. 35. P. 506.
5. Gong X., Guo X., Wang Z. // Energy Fuels. 2009. V. 23. P. 4547.
6. Abbasi-Atibeh E., Yozgatligil A. // Fuel. 2014. V. 115. P. 841.
7. Zhao G.W., Yu W.Q., Xiao Y.H. // Adv. Mater. Res. 2011. V. 236-238. P. 660.
8. Kim Y.K., Hao L.F., Park J.I., Miyawaki J., Mochida I., Yoon S.H. // Fuel. 2012. V. 94. P. 516.
9. Morozov I.V., Znamenkov K.O., Korenev Y.M., Shlyakh-tin O.A. // Thermochim. Acta. 2003. V. 403. P. 173.
10. Tokareva I.V., Mishakov I.V., Korneev D.V., Vedyagin A.A., Golokhvast K.S. // Nanotechnologies in Russia. 2015. V. 10. P. 158.
11. Энштейн С.А. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2009. № 9. С. 71.
12. Miroshnichenko D.V., Balaeva Y.S. // Coke and Chemistry. 2013. V. 56. P. 85.
13. Ларионов К.Б., Мишаков И.В., Ведягин А.А., Губин В.Е. // ХТТ. 2019. № 2. С. 63.
14. Larionov K.B., Gromov A.A. // Int. J. Coal Sci. Technol. 2019. V. 6. P. 37.
15. Kok M.V. // Energy Sources. 2002. V. 24. P. 899.
16. Русьянова Н.Д., Попов Б.К., Бутакова В.И. // Киев: Наук. думка, 1985. 132 с.
17. Мустафина Г.А. // Вестник Национальной академии наук Республики Казахстан. 2006. № 2. С. 40.
18. Ruiz M.L., Lick I.D., Ponzj M.I., Castellón E.R., Jiménez-López A., Ponzj E.N. // Thermochim. Acta. 2010. V. 499. P. 21.
19. Wang Y., Wang J., Chen H., Yao M., Li Y. // Chem. Eng. Sci. 2015. V. 135. P. 294.
20. Wang H., Li C., Peng Z., Zhang S. // Energy Sources. Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects. 2015. V. 37. P. 2323.