УДК 662.739

ОБОСНОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ ВЫХОДА ОКСИДОВ СЕРЫ ПРИ ПИРОЛИЗЕ УГЛЕЙ С ДОБАВКОЙ ОТХОДОВ ЛЕСОПИЛЕНИЯ

© 2022 г. С. А. Янковский^{1,*}, Г. В. Кузнецов^{1,**}, А. Д. Мисюкова^{1,***}

¹ ФГАОУ ВО НИ ТПУ Инженерная школа энергетики, 634050 Томск, Россия *e-mail: jankovsky@tpu.ru **e-mail: kuznetsovgv@tpu.ru ***e-mail: adm14@tpu.ru Поступила в редакцию 27.07.2021 г. После доработки 11.09.2021 г. Принята к публикации 13.10.2021 г.

Проведены экспериментальные исследования газообразных продуктов совместного пиролиза достаточно типичных и широко используемых в России и во многих других государствах энергетических углей и древесины (опил сосновых пород древесины). Установлено, что в газообразных продуктах пиролиза всех исследованных древесно-угольных смесей значительно (на 95% при высокой доле древесной биомассы) снижается выделение оксидов серы. Предложено использование древесины в составе смесевых топлив на основе типичных энергетических углей разных марок в качестве добавки, обеспечивающей существенное снижение выхода оксидов серы в газообразных продуктах сжигания таких топлив в топках паровых и водогрейных котлов.

Ключевые слова: уголь, древесина, пиролиз, газообразные продукты, десульфация **DOI:** 10.31857/S0023117722010108

ВВЕДЕНИЕ

Установлено [1, 2], что пиролиз и горение углей с добавками различной биомассы приводят к снижению выхода оксидов серы в дымовых газах котельных установок различного назначения.

В Дании на энергоблоке электростанции Amager 3 мощностью 250 MBr, работающей на угле, в 1994 г. проводились экспериментальные исследования по сжиганию смесевых топлив из угля и соломы [3], целью которых являлось достижение стабильности горения такого топлива. В ходе эксперимента солома смешивалась с углем в соотношении 10/90, с последующим увеличением ее доли до 20%. Тепловая мощность электростанции составляла 330 МДж, температура пара – 545°С при давлении 25 МПа. Котел энергоблока был оснащен 16 горелками с односторонним расположением в шахматном порядке. При проведении испытаний были выявлены серьезные проблемы поддержания стабильного горения. При этом наблюдалось постепенное и стабильное снижение выбросов SO_x, NO_x при увеличении концентрации соломы до 20%. Совместное сжигание соломы и угля на одном энергоблоке, в целом, не оказало существенного влияния на характеристики станции. Авторы работ [3, 4] сделали вывод о том, что при правильной подготовке соломы совместное сжигание с углем на электростанции возможно без реконструкции основного оборудования.

В настоящее время успешно эксплуатируются три газификатора на псевдосжиженном слое: в *Lahti* (Финляндия), *Warkau* (Финляндия) и *Ruene* (Бельгия). В эксплуатируемых котельных установках 15% угля заменено соломой, что позволило снизить выбросы CO₂, NO_x, SO₂ на 6% [5].

В [6] проведен анализ влияния уровня выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при слоевом сжигании в энергетическом котлоагрегате дров, брикетов и пеллет, приготовленных из сосны. Сочетание режима верхового горения (присущего слоевым котлам) с сосновыми поленьями позволило достичь снижения выхода диоксида углерода (CO₂) и диоксида серы (SO₂) на 6%. Загрузку топлива осуществляли массой не менее 3 кг, но комбинация режимов зажигания (верхнее) с пеллетами и брикетами приводила к тому, что в эксплуатационных условиях концентрации СО₂ и SO₂ соответственно возрастали в несколько раз по сравнению с нижним зажиганием. Во время испытаний (в основном при верхнем воспламенении) были зарегистрированы значительные выбросы NO (до 400 см³/м³ при концентрации кислорода 10%). Авторы [6] утверждают, что по результатам экспериментальных исследований нет достаточных обоснований влияния температуры в топке котла на концентрацию выбросов оксидов углерода и серы в дымовых газах при сжигании древесной биомассы.

В работе [7] были исследованы газообразные продукты и характеристики горения отдельных гранул смеси бурого угля с отходами первичной обработки оливкового дерева, торрефицированной первичной обработки оливкового дерева, отходами жизнедеятельности домашней птицы (ОЖДП) и торрефицированными отходами жизнедеятельности домашней птицы. Результаты анализа состава продуктов горения сравнивали с результатами, полученными при сжигании однородного бурого угля. Показано, что выделение SO₂ после первичной обработки оливкового дерева практически не зависело от температуры в диапазоне 900-1100°С. В то же время для всех других видов топлива установлено увеличение выхода SO₂ с ростом температуры. В торрефицированной биомассе содержание серы установлено выше, а выбросы SO₂ после сгорания торрефицированной биомассы ниже, чем у биомассы первичной обработки оливкового дерева. Совместное сжигание бурого угля и торрефицированной биомассы показало снижение концентрации SO₂ в дымовых газах. В то же время снижения NO_x не обнаружено для смесей топлив на основе торрефицированной биомассы с бурым углем. Несмотря на то что содержание связанного азота в отходах жизнедеятельности домашней птицы, подвергнутых торрефикации, было ниже, чем в не торрефицированных ОЖДП, выбросы NO_x в результате сжигания помета птицы, подвергнутого термической обработке, были заметно выше.

В [8] был проведен анализ выхода антропогенных газов SO_x , NO_x , O_2 и летучей золы по результатам экспериментальных исследований угольной ТЭС Jaworzno III Tauron Wytwarzanie (Польша) при совместном сжигании биомассы с углем. В экспериментальных исследованиях [8] использовали каменный уголь, а в качестве биомассы — отходы древесины и сельскохозяйственных культур в массовой концентрации биомассы от 5 до 10%. Результаты исследований показали значительное увеличение скорости процесса десульфации дымовых газов при снижении доли кислорода. Установлено снижение концентрации кислорода почти в 2 раза по сравнению с сжиганием однородного угля и снижение концентрации оксидов серы при совместном сжигании угля и биомассы. Эти результаты дают возможность снизить стоимость устанавливаемых на ТЭС очистных фильтров.

Авторы [9] исследовали процессы секвестирования диоксида углерода и оксида серы с применением моноэтаноламина (МЭА) при сжигании каменных углей. Установлено, что при содержании SO₂, равном 3000 (см $^3/M^3$), система МЭА позволяет улавливать 95%. При этом скорость образования сульфатов термостабильна. но концентрации солей в растворе МЭА не приведены. Представление данных имеет значение для оценки возможности секвестирования CO₂, SO₂ дымовых газов. Несмотря на то что типичные параметры систем очистки таких газов достаточно просты, пока нет описания скорости реакции термостабильного образования сульфатов при взаимодействии кислых газообразных продуктов с МЭА, в результате которого происходит снижение концентрации SO₂ до 10 см³/м³. Вопрос об эффективной десульфации загрязняющих атмосферу газов достаточно актуален, так как хранение СО₂, например в подземных бункерах с высоким содержанием примесей, таких как SO₂, SO₃, NO₂, HCl, приводит к загрязнению грунтовых вод [9].

В [10] проведены исследования процессов совместного сжигания каменного угля с торрефицированной биомассой (сосна, черный тополь и щепа каштана). Смешение проводили в соотношении компонент уголь/биомасса (до 40% биомассы в смеси). Установлено, что увеличение доли торрефицированной биомассы до 10% не привело к снижению концентрации SO₂ в газообразных продуктах сгорания таких топлив. Увеличение же доли биомассы в смеси до 40% привело к значительному (на 44.4%) снижению выхода SO₂ в продуктах сгорания таких топливных смесей.

В [11] показано, что частичная замена каменного угля биомассой (отходы деревопереработки) приводит к снижению концентрации в газообразных продуктах сгорания оксидов серы и хлороводорода за счет низкого содержания исходных элементов в биомассе. Установлено, что разные распределения частиц угля и биомассы по размерам существенно не влияют на технические характеристики топливных смесей. Увеличение доли древесной биомассы в топливной смеси до 13% не приводит к коррозии поверхностей топливной горелки, так как при формировании потока топливной смеси происходит истирание мягких древесных частиц более твердыми угольными частицами, что приводит к равномерному распределению по размерам частиц топливной смеси.

В [12] исследованы процессы воспламенения, проведен газовый анализ и определены характеристики золы биомассы и топливных смесей на основе бурого угля и биомассы (древесные опилки). Показано, что в результате добавления биомассы в низкосортный уголь увеличивается скорость воспламенения смеси. Но концентрации NO_x и N₂O в дымовых газах при совместном сжигании угля и биомассы не изменяются по сравнению с однородным углем. Установлено, что при сжигании биомассы образуются частицы золы размером менее 2 мкм. Сжигание биомассы с углем смещает распределение частиц по размерам от мелких к крупным, которые могут задерживаться системами улавливания пыли.

В [13-17] выполнены исследования влияния добавок сточного ила и сахарного тростника на процессы шлакования при сжигании топлив на основе угля. Установлено, что эти компоненты увеличивают скорость отложения золы. Добавление в топливо древесины, проса, соломы снижает скорость отложений, что подтверждает положительный синергетический эффект. Однако результаты работ [18–22] пока не могут быть использованы для анализа закономерностей процессов термического разложения и горения смесевых топлив при разных соотношениях компонент древесины и угля, что обусловлено отсутствием экспериментально установленных закономерностей влияния многих факторов на физико-химические процессы при сжигании таких топлив.

Процессы слоевого сжигания смесевых топлив на основе каменного угля и биомассы (проса, щепы и др.) при разных концентрациях компонент исследованы в [18–22]. Методами термогравиметрического анализа определены кинетические характеристики процессов интенсивного тепловыделения, а также выполнен анализ возможности применения таких смесевых топлив в энергетических установках, сжигающих топливо в слое [18–22].

На основе анализа современного состояния проблемы сжигания смесей угля с биомассой в топках паровых и водогрейных котлов можно сделать вывод, что пока нет экспериментального или теоретического обоснования механизмов влияния добавок биомассы на происходящие физические и химические процессы, приводящие в результате к снижению концентрации оксидов серы в дымовых газах предприятий энергетики, сжигающих такие смеси. Получение таких результатов необходимо для разработки модели десульфации дымовых газов при сжигании угля совместно с диспергированной древесиной (наиболее перспективны отходы переработки деловой древесины).

Цель статьи — экспериментальное обоснование значительного снижения концентрации оксидов серы в газообразных продуктах высокотемпературного термического разложения энергетических смесевых топлив в результате совместного пиролиза смесей группы типичных углей (существенно отличающихся по своим свойствам) и древесины (отходы лесопиления и деревообработки).

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И МАТЕРИАЛЫ

Для формирования смесевых топлив исходными были выбраны типичные и широко используемые в энергетике угли марок бурый (2Б) (месторождение "Бородинское" Красноярск, Россия), бурый (3Б) (месторождение "Балахтинское" Красноярск, Россия), тощий (Т) (месторождение "Алардинское"), длиннопламенный (Д) (месторождение "Егозово-Красноярское" Кузбасс, Россия), использующиеся в качестве основного топлива на многих электростанциях (например, Березовская ГРЭС, Приморская ГРЭС, Хабаровская ТЭЦ-3,Комсомольская ТЭЦ-2). Добавкой к углю при подготовке смесевых топлив была мелкодисперсная древесина (сосновые опилки), остающаяся после лесопиления и обработки деловой древесины.

Эксперименты проводились в лабораторных условиях при влажности воздуха 75%, температуре окружающей среды 20°С и давлении 101.4 кПа [23].

Топливные смеси предварительно готовили по следующей схеме.

Исследуемые угли на первой стадии подготовки размалывались в шаровой барабанной мельнице до порошкообразного состояния. Угольная пыль после размола просеивалась через сита, соответствующие ГОСТ Р 51568-99 (средний, использующийся в экспериментах размер частиц менее 80 мкм).

Отходы лесопиления и деревообработки (сосновые опилки) в первую очередь проходили стадию предварительной очистки от древесной коры и веток. Для снижения рассеяния результатов экспериментов древесина использовалась одной смены лесопиления со средним размером частиц менее 200 мкм. Необходимость контроля однородности состава древесины (опилки одного дерева) была установлена экспериментально. Древесина деревьев разного времени роста отличается по своему составу достаточно существенно (по крайней мере эти отклонения по долям основных компонент могут составлять до 12%).

После измельчения и фракционного отбора угли разных марок и древесина смешивались в соотношении компонент уголь/древесина 90/10; 75/25; 50/50. Для этого подготовленные навески топлив помещались в оцинкованный барабан планетарной мельницы *Pulverisette 6* с шарообразными мелющими телами диаметром 5 мм. Смешение происходило при скорости вращения планетарной мельницы 500 об/мин в течение семи минут [23]. Для исходных углей был выполнен анализ элементного состава с применением элементного анализатора *Flash 2000 CHNS (Thermo Fisher Scientific, США)*. Распределение частиц по размерам выполнено с применением лазерного

Характеристика		Образец исследуемых углей						
	2Б	3Б	Д	Т				
Элементный состав, мас. %								
С	64.7	67.4	73.0	80.0				
Н	4.6	5.1	3.5	2.2				
Ν	1.5	1.8	2.0	2.5				
S	<1	<1	<1	<1				
О	28.2	24.7	20.5	14.3				
Распределение частиц по размерам, мкм								
X10	2.8	3.2	3.6	4.6				
X50	13.9	16.2	21.1	20.4				
X90	34.8	40.8	53.2	57.6				
Средний объемный диаметр	18.3 ± 0.07	19.3 ± 0.11	25.3 ± 0.13	26.5 ± 0.09				
Пористость								
Средний размер пор, нм	20.5	18.4	16.6	11.9				
Суммарный объем пор, см ³ /г	0.03	0.02	0.02	0.01				

Таблица 1. Элементный состав исходных образцов углей

дифракционного анализатора частиц *Analysette 22* (*Fritsch, Германия*). Пористость исследуемых частиц определяли методом низкотемпературной

Таблица 2. Теплота сгорания, влажность, зольность, выход летучих веществ

Топливо	Теплота	Технический анализ, %		
(древесина/ уголь_марка), %	сгорания, <i>Q</i> , МДж/кг	W^{a}	A^d	V ^{daf}
100/0	21.73	5.35	0.29	80.25
0/100_3Б	25.79	5.41	3.45	40.09
10/90_3Б	23.91	8.82	3.2	44.89
25/75_3Б	23.83	14.21	3.11	47.41
50/50_3Б	23.75	12.87	2.75	54.75
0/100_2Б	23.72	5.55	7.42	43.39
10/90_2Б	23.68	12.29	4.68	47.93
25/75_2Б	23.44	10.45	4.53	51.7
50/50_2Б	23.35	10.29	3.82	66.17
0/100_T	25.72	5.52	18.37	25.56
10/90_T	25.6	5.42	14.24	26.46
25/75_T	25.22	5.34	13.65	28.33
50/50_T	24.79	5.41	11.08	39.95
0/100_Д	26.20	5.83	15.76	12.36
10/90_Д	24.92	5.42	14.00	14.55
25/75_Д	24.31	5.23	11.91	38.89
50/50_Д	23.84	5.35	10.44	40.96

адсорбции/десорбции азота (метод БЭТ) на автоматическом газо-адсорбционном анализаторе *3Flex (Micromeritics, США)*.

В табл. 1 приведены элементный состав, распределение частиц по размерам и пористость исходных образцов углей.

После смешения топлив определялись технические характеристики полученных смесей (калорийность, зольность, влажность и выход летучих). Результаты приведены в табл. 2. Выполнены оценки систематических и случайных погрешностей определения этих характеристик, которые не превышали 3%. Установлена удовлетворительная повторяемость результатов экспериментов при использовании навесок идентичных по своему происхождению исследовавшихся смесевых топлив (отличающихся только концентрациями двух основных компонент).

Результаты выполненных исследований показали, что при малых по массе (от 1 до 3 г) навесках результаты экспериментов имеют достаточную повторяемость. Анализ случайных погрешностей показал стабильную повторяемость от опыта к опыту концентраций компонент газообразных продуктов пиролиза исследовавшихся смесей, что приемлемо в рассматриваемых диапазонах изменения основных значимых факторов эксперимента.



Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – топливная навеска, 2 – тигель с топливной навеской, 3 – камера с нагреваемой средой, 4 – камера с регулируемой температурой, 5 – термопары, 6 – преобразователь сигналов термопар, 7 – линия связи термопар с преобразователем сигналов от термопар, 8 – регистратор анализируемых параметров, 9 – линия связи преобразователя сигналов термопар с регистратором, 10 – отвод газов, 11 – газоанализатор, 12 – канал подачи газообразных продуктов в газоанализатор, 13 – линия связи газоанали, 15 – линия транспорта избытка летучих газов в вентиляцию, 16 – многофункциональный стол с полками.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Принципиальная схема экспериментальной установки, используемой при проведении исследования процессов термического разложения древесно-угольных топливных смесей в окислительной среде (Воздух), приведена на рис. 1. Навеску топливной смеси помещали в тигель, расположенный в специализированной камере. Тигель с навеской нагревали до температуры 600°С. Непрерывно в период проведения эксперимента проводили газовый анализ с целью контроля выделяемых при термическом разложении топлив газов. Контроль температурного поля в терморегулируемой камере осуществляли с помощью двух термопар (термоэлектрические преобразователи платинородий-платина, рабочий диапазон температур 0–1350°С) непрерывно в течение всего эксперимента с методической погрешностью не более $\pm 1\%$.

Газовый анализ проводили непрерывно до полного прекращения выхода летучих продуктов термического разложения исследуемых топливных смесей.

Целью проведенных экспериментов было обоснование устойчивого снижения концентрации оксидов серы в газообразных продуктах термического разложения группы разных по своим свойствам углей и древесины. Основной задачей анализа газов было определение концентрации оксидов серы при термическом разложении углей разных марок в смеси с биомассой при различных концентрациях последней. Можно отметить, что ранее [23] была сформулирована гипотеза о механизме взаимодействия газообразных и твердых продуктов пиролиза угля и древесины между собой в золе смеси, в результате которого растет концентрация серы, кальция и алюминия в твердых продуктах пиролиза по сравнению с продуктами пиролиза однородного угля и однородной древесины. Важным при этом является анализ исследуемых процессов при температуре интенсивного разложения угольной и древесной компонент.

Изменение концентрации оксидов серы при пиролизе смесевых топлив на основе угля марки 2Б и мелкодисперсной древесины с ростом концентрации последней в смеси приведены на рис. 2.



Рис. 2. Изменение концентрации оксидов серы при пиролизе смесевых топлив на основе угля марки 2Б и мелкодисперсной древесины с ростом концентрации последней в смеси: *1* – уголь 100%, *2* – уголь 90 + древесина 10%, *3* – уголь 75 + древесина 25%, *4* – уголь 50 + древесина 50%.

ХИМИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА № 1 2022



Рис. 3. Изменение концентрации оксидов серы при пиролизе смесевых топлив на основе угля марки 3Б и мелкодисперсной древесины с ростом концентрации последней в смеси: *1* – уголь 100%, *2* – уголь 90 + древесина 10%, *3* – уголь 75 + древесина 25%, *4* – уголь 50 + древесина 50%.



Рис. 4. Изменение концентрации оксидов серы при пиролизе смесевых топлив на основе угля марки Т и мелкодисперсной древесины с ростом концентрации последней в смеси: *1* – уголь 100%, *2* – уголь 90 + древесина 10%, *3* – уголь 75 + древесина 25%, *4* – уголь 50 + древесина 50%.

Хорошо видно (рис. 2), что увеличение доли древесины до 50% приводит к снижению концентрации оксидов серы в летучих продуктах пиролиза на 92.5%. Такое масштабное снижение не может быть следствием только замещения угля древесиной. Достаточно очевидно, что проявляется синергетический эффект — следствие взаимодействия газообразных и твердых продуктов термического разложения углей и древесины.

Также выполнен газовый анализ концентрации оксидов серы в продуктах пиролиза смесевых топлив на основе бурого угля марки 3Б и мелкодисперсной древесины. Из рис. 3 видно, что увеличение доли древесины до 50% в такой смеси приводит к снижению образования оксидов серы на 94.3%. Следует отметить, что эти два достаточно широко распространенных на многих территориях вида углей отличаются по своим составам (табл. 1) и свойствам. Но, как показали проведенные эксперименты, при их совместном пиролизе с древесиной достигается устойчивый эффект снижения концентрации оксидов серы в газообразных продуктах пиролиза.

На рис. 4 показаны результаты анализа изменения концентрации оксидов серы при пиролизе смесевых топлив на основе угля марки Т и мелкодисперсной древесины с ростом концентрации последней в смеси.

Аналогично анализ выполнен и для смеси на основе угля марки Д. Из рис. 5 видно, что секвестирование органической части летучей серы с увеличением доли древесины до 50% приводит к снижению образования оксидов серы на 94.7%.

Сравнение рис. 3–5 показывает, что эффект снижения доли оксидов серы в продуктах пиролиза смесей угля с древесиной достигается при использовании не только бурых углей, но и типичных для теплоэнергетики каменных.

Анализ рис. 5 позволяет сделать вывод, что секвестирование органической части летучей серы с увеличением доли древесины до 50% приводит к



Рис. 5. Изменение концентрации оксидов серы при пиролизе смесевых топлив на основе угля марки Д и мелкодисперсной древесины с ростом концентрации последней в смеси: *1* – уголь 100%, *2* – уголь 90 + древесина 10%, *3* – уголь 75 + древесина 25%, *4* – уголь 50 + древесина 50%.

снижению образования оксидов серы на 82.6%. В связи с тем, что в древесине сосны сера практически отсутствует, можно на основании результатов проведенных экспериментов утверждать, что термическое разложение смесевых топлив на основе углей различных марок приводит к существенной десульфации продуктов пиролиза смеси по сравнению с газами, образующимися при термическом разложении однородных углей.

Полученные результаты позволяют сформулировать еще один важный вывод.

Основная (по данным на 2019 г. [24]) доля электроэнергии вырабатывается на теплоэлектростанциях при сжигании твердого топлива – угля [25-33]. Основной задачей таких ТЭС является борьба с выбросами в окружающую среду, которые влекут за собой образование кислотных дождей [34]. Применение многокомпонентных топлив (в состав которых входит биомасса). сжигаемых в топках паровых котлов, приведет к существенному снижению выхода паров серной кислоты в продуктах сгорания и, соответственно, к снижению интенсивности антропогенного воздействия работающих на угле энергоустановок большой и малой энергетики не только на атмосферу окружающей среды, но и на растения, почву, водоемы.

Анализ результатов выполненных экспериментальных исследований позволяет также обосновать целесообразность теоретического анализа химических реакций между газообразными и твердыми продуктами термического разложения частиц измельченных углей различных марок (2Б, 3Б, Т, Д) и мелкодисперсной древесины. Экспериментальное изучение таких процессов достаточно затруднено в связи с их многофакторностью и распределением в реальных условиях топок котлоагрегатов частиц первой и второй компонент по всем трем координатным направлениям. Современное развитие вычислительной техники позволяет выполнять математическое моделирование тепломассопереноса в системе нескольких частиц угля и древесины при учете процессов изменения концентраций газообразных и твердых веществ и соединений в результате их химического взаимодействия между собой со скоростями, зависящими от температуры и концентраций реагирующих компонент.

Также необходимо отметить, что современной энергетике нужна достаточно серьезная перестройка в связи с тем, что угольные электростанции (от которых ведущие государства мирового сообщества – Китай, США, Индия – не могут отказаться в ближайшие десятилетия) являются основными источниками загрязнения окружающей среды, что может привести в будущем к масштабной экологической катастрофе. Рано или поздно энергетикам придется существенно менять подход к сжиганию углей, обеспечивающий существенное снижение концентрации антропогенных оксидов в дымовых газах ТЭС. Как показали приведенные в статье результаты экспериментов, наиболее эффективным из всех возможных вариантов композитных топлив являются смеси углей с отходами лесопиления и деревообработки. При этом даже небольшие потери в теплоте сгорания древесно-угольных смесей по сравнению с однородными углями будут компенсироваться очень низкой стоимостью древесных отходов. Стоимость 1 ГВт электроэнергии в этом случае может быть даже ниже по сравнению со стоимостью электроэнергии, вырабатываемой при сжигании однородного угля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью экспериментальных исследований установлено, что совместное сжигание смесей частиц четырех широко распространенных бурых и каменных углей марок 2Б, 3Б, Т, Д и древесины сосны приводит к существенному снижению оксидов серы в газообразных продуктах пиролиза таких смесей по отношению к однородным углям (более 80%). Такой значимый экологический эффект достигается стабильно и устойчиво для смесей отходов лесопиления и деревообработки с углями, существенно отличающимися по своим свойствам и химическому составу.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 18-29-24099\18).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Gold B.A., Tillman D.A. // Biomass and Bioenergy. 1996. V. 10. P. 71. https://doi.org/10.1016/0961-9534(95)00062-3
- Chao C.Y.H., Kwong P.C.W., Wang J.H., Cheung C.W., Kendall // Bioresource Technology. 2008. V. 99. P. 83. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.051
- Pedersen L.S., Nielsen H.P., Kiil W., Hansen L.A., Dam-Johansen K., Kildsig F., Christensen J., Jespersen P. // Fuel. 1996. V. 75. P. 1584.
- Growing Power Advanced solutions for bioenergy technology from Finland, Tekes & VTT Processes & Teonsana Oy. Lahti 2002. P. 34.
- Kraszkiewicz A., Przywara A., Sotirios A. // Energies. 2020. V. 13. P. 2664. https://doi.org/10.3390/en13112664
- Yanik J., Duman G., Karlström O., Brink A. // J. Environmental Management. 2018. V. 227 (1). P. 155. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.068
- Weizkol-Ryk A., Krzemien A., Smolinsky A., Lasheras F.S. // Sustainability (Switzerland), 2018. V. 10 (4). P. 923. https://doi.org/10.3390/su10040923
- Lee J. Y., Keener T.C., Yang Y.J. // Journal of the Air & Waste Management Association. 2014. V. 59 (6). P. 725. https://doi.org/10.3155/1047-3289.59.6.725
- Gil M.V., García R., Pevida C., Rubiera F. // Bioresource Technol. 2018. V. 191. P. 205. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.04.117
- Mylläri F., Karjalainen P., Taipale R., Aalto P., Häyrinen A., Rautiainen J., Rönkkö T. // Combustion and Flame. 2017. V. 176. P. 554. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2016.10.027
- Fouad A., Zuwala J. // Biomass and bioenergy. 2010.
 V. 5. P. 620. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2010.01.004
- Plis A., Kotyczka-Morańska M., Kopczyński M., Łabojko G. // Thermal Analysis and Calorimetry. 2016. V. 125. P. 1357. https://doi.org/10.1007/s10973-016-5611-7

- Van der Stelt M.J.C., Gerhauser H., Kiel J.H.A. // Biomass Bioenergy. 2011. V. 35. P. 3748. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.023
- Nunes L.J.R., Matias J.C.O., Catalo J.P.S. // Renew Sustain Energy Rev. 2014. V. 40. P. 153. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.181
- Robinson A.L., Junker H., Baxter L.L // Energy Fuels. 2002. V. 16. P. 343. https://doi.org/10.1021/ef010128h
- Annamalai K., Sweeten J., Freeman M., Mathur M., O'Dowd W., Walbert G., Jones S. // Fuel. 2003. V. 82. P. 1195. https://doi.org/10.1016/S0016-2361(03)00025-5
- Turn S.Q., Jenkins B.M., Jakeway L.A., Blevins L.G., Williams R.B., Rubenstein G., Kinoshita Ch.M. // Biomass Bioenergy. 2006. V. 30. P. 565. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2005.12.008
- Xiao H., Ma X., Lai Z. // Apply Energy. 2009. V. 86.
 P. 1741. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.11.016
- Aboulkas A., El harfi K., El bouadili A., Nadifiyine M., Benchanaa M., Mokhlisse A. // Fuel Process Technology. 2009. V. 90. P. 722. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.01.016
- 20. *Abreu P., Casaca C., Costa M.* // Fuel. 2010. V. 89. P. 4040. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.04.012
- Sonobe T., Worasuwannarak N., Pipatmanomai S. // Fuel Process Technology. 2008. V. 89. P. 1371. https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.06.006
- 22. *Kazagic A., Smajevic I.* // Energy. 2009. V. 34. P. 699. https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.10.007
- 23. Янковский С.А., Кузнецов Г.В. // ХТТ. 2019. № 1. C. 26. [Yankovsky S.A., Kuznetsov G.V. // Solid Fuel Chemistry, 2019. V. 53. № 1. Р. 22–28. https://doi.org/10.1134/S0023117719010080]. https://doi.org/10.1134/S0023117719010080
- 24. Jingjing L., Nechaev V.P., Shifeng D., Hongjian S., Nechaeva E.V., Jiang Y., Graham I.T., French D., Yang P., Hower J.C. // Intern. J. Coal Geology. 2020. V. 223. 103468. https://doi.org/10.1016/j.coal.2020.103468
- Zhuang X., Querol X., Zeng R., Xu W., Alastuey A., Lopez-Soler A., Plana F. // Intern. J. Coal Geology. 2000.
 V. 45. P. 21. https://doi.org/10.1016/S0166-5162(00)00019-7
- Zhuang X., Querol X., Alastuey A., Plana F., Moreno N., Andres J.M., Wang H.L. // Intern. J. Coal Geology. 2007. V. 71. P. 263. https://doi.org/10.1016/j.coal.2006.09.005
- Zhuang X., Su S., Xiao M.G., Li J., Alstuey A., Querol X. // Intern. J. Coal Geology. 2007. V. 94. P. 271. https://doi.org/10.1016/j.coal.2012.01.002
- 28. *Zou J., Tian H., Wang Z.* // Metals. 2017. V. 7. № 5. P. 174. https://doi.org/10.3390/met7050174

ХИМИЯ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА № 1 2022

64

 Mahidin, Saifullah, Erdiwansyah, Hamdani, Hisbullah, Hayati A.P., Zhafran M., Sidiq M.A., Rinaldi A., Fitria B., Tarisma R., Bindar Y. // Chemosphere. 2020. V. 253. P. 126714.

https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126714

- Wahid A., Saleh, S., Samad A. // Energy Procedia. 2017. V. 138. P. 307. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.102
- Archer S.A., Murphy R.J., Steinberger-Wilckens R. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018.
 V. 94. P. 694. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.066
- Adánez J., De Diego L.F., García-Labiano F., Gayán P., Abad A., Palacios J.M. // Energy and Fuels. 2004. V. 18. P. 371. https://doi.org/10.1021/ef0301452
- Fanni M., Panu K., Raili T., Pami A., Anna H., Jani R., Liisa P., Risto H., Jorma K., Topi R. // Combustion and Flame. 2017. V. 176. P. 554. https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2016.10.027
- Winstanley D., Robert T. // Environmental Science & Policy. 1998. V. 1. P. 51. https://doi.org/10.1016/S1462-9011(98)00006-9