

УДК 662.739

ОСОБЕННОСТИ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ СМЕСЕВЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ ТИПИЧНЫХ КАМЕННЫХ УГЛЕЙ И ДРЕВЕСИНЫ ПРИ НАГРЕВЕ¹

© 2019 г. С. А. Янковский^{1,*}, Г. В. Кузнецов^{1,**}

¹ *Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия*

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

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

Поступила в редакцию 03.05.2018 г.

После доработки 03.07.2018 г.

Принята к публикации 24.10.2018 г.

Выполнены экспериментальные исследования процессов термического разложения смесей диспергированных каменных углей двух видов и измельченной древесины в диапазоне температур до полного завершения процессов пиролиза органической части обоих компонентов при разных концентрациях последних с целью оценки перспективности использования таких топлив в качестве смесевых топлив в большой и малой теплоэнергетике (сжигание в топках паровых и водогрейных котлов). Установлено, что совместное термическое разложение смеси частиц углей и древесины приводит к существенному изменению диапазона температур пиролиза и выхода антропогенных газов (оксидов серы и азота) в случае высокотемпературного нагрева такой смеси на основе тощего угля. Аналогичный эффект, но существенно меньших масштабов, зарегистрирован для смеси на основе длиннопламенного угля. Сформулирована гипотеза о механизме секвестрования окислов серы и азота при термическом разложении смеси частиц тощего угля и древесины в результате взаимодействия промежуточных газообразных и твердых продуктов пиролиза угля и древесины в диапазоне температур до 1000°C. Обоснована возможность использования в качестве топлива паровых и водогрейных котлов смесей измельченных каменных углей и древесины. При некотором снижении энергетических характеристик таких топлив по сравнению с однородными углями достигается существенное улучшение экологических и экономических характеристик процессов топливосжигания. Показано, что значительный синергетический эффект совместного сжигания частиц угля и древесины достигается только у определенных углей.

Ключевые слова: *уголь, древесная биомасса, смесевое топливо, термическое разложение, горение, элементный состав, термический и масс-спектрометрический анализы*

DOI: 10.1134/S0023117719010080

ВВЕДЕНИЕ

Около трети электроэнергии в мире вырабатывается на тепловых электростанциях, использующих уголь в качестве основного топлива [1] (в Китае более 70% [2]). Несмотря на то, что при сжигании этого твердого топлива в атмосферу выбрасываются продукты сгорания с большим содержанием оксидов серы и азота [3, 4], пока, если ориентироваться на тенденции последнего десятилетия [5, 6], ему нет замены как основного топлива не только многих работающих в настоящее время, но и проектируемых тепловых электростанций [7–9]. В этой связи в последние годы ученые и инженеры многих развитых государств (Китай, Индия, США, Япония, Германия, Дания, Финляндия и др.) предпринимают попытки

разработки технологий сжигания угля в топках паровых и водогрейных котлов в сочетании с другими горючими веществами и негорючими компонентами (разного рода смесевыми топливами на основе углей) [9–13]. К таким относятся водоугольные [9–11], органоводоугольные [12–15] и смеси углей с биомассой [16, 17]. Последние, на первый взгляд, представляют собой наиболее простые для сжигания в топках композиции. Но, несмотря на многочисленные (более 230) попытки создания технологий сжигания на ТЭС смесевых топлив на основе углей разных сортов и биомассы разного вида, только на шестнадцать станциях такие композиции являются основным топливом. Эти станции приведены в табл. 1 [18].

Примеров использования водоугольных и органоводоугольных топлив в большой энергетике значительно меньше. Такое состояние дел во многом обусловлено недостаточной проработкой

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации проекта № 13.7644.2017/8.9.

Таблица 1. Тепловые электрические станции, на которых смесевые композиции – основной вид топлива [18]

Компания, внедрившая проект	Страна	Топливо	Мощность установки (электрическая), МВт
Lowa Electric Light and Power	США	Уголь, сельскохозяйственные отходы	45
SEPCO	США	Уголь, древесные отходы	54
Stockholm Energy	Швеция	Уголь, древесина, отходы олив	54
Ames Municipal Electric	США	Уголь, топливо из бытовых отходов	75
Saabergwerke AG	Германия	Уголь, бытовые отходы	75
Georgia Power	США	Уголь, древесные отходы	100
GPU GENCO	США	Уголь, древесные отходы	130
Tennessee Valley Authority	США	Уголь, древесные отходы	150
Midkraft Energy	Дания	Уголь, солома	150
Vasthamnsvert CHP	Швеция	Уголь, древесина	180
Elsam	Дания	Уголь, солома	250
Baoji	Китай	Уголь, солома	300
Uppsala Energy AB	Швеция	Уголь, торф, древесина	320
Lakeland Electric and Water	США	Уголь, топливо из бытовых отходов	350
VEAG	Германия	Уголь, древесина	350
EPON	Голландия	Уголь, древесные отходы	602

(как экспериментальной так и теоретической) процессов горения и особенно зажигания смесевых топлив разного вида. Так, например, выполненные теоретические исследования процессов зажигания водоугольных топлив в условиях, соответствующих топкам ТЭС [10, 11], показали, что протекающие в индукционный период процессы тепломассопереноса и физико-химических превращений в капле водоугольной суспензии много сложнее аналогичных процессов в твердых, жидких или газообразных топливах, сжигаемых в топках тепловых электростанций. Для смесей диспергированного угля с измельченной биомассой экспериментальных данных также недостаточно для разработки технологий их сжигания, а математические модели уровня [19], описывающие комплекс физико-химических и тепломассообменных процессов при зажигании и горении существенно структурно неоднородных сред и материалов с учетом возможного изменения большой совокупности значимых факторов, пока не разработаны. Поэтому экспериментальные исследования основных закономерностей физико-химических превращений в смесях диспергированного угля с биомассой в условиях высоких температур внешней среды являются актуальными.

Выполненные ранее эксперименты с такими топливными композициями, например [16, 17], были ориентированы в основном на оценку возможности использования на практике таких композиционных топлив на основе угля и биомассы.

Основное преимущество совместного сжигания угля и биомассы, по данным [16, 17], заключается в большем или меньшем снижении выхода антропогенных газовых оксидов, образующихся при их горении, по сравнению с однородным углем.

В известных исследованиях [16, 17] не был выявлен механизм такого снижения выбросов в атмосферу оксидов серы и азота (не установлены химические или физические процессы их подавления).

По этим причинам задачами настоящей работы являются: экспериментальное изучение процессов совместного термического разложения диспергированных каменных углей двух видов и измельченной древесной биомассы в диапазоне температур до превышающих температуры конца термического разложения органической части углей, оценка масштабов снижения выбросов антропогенных оксидов при пиролизе таких смесей по сравнению с однородным углем и формирование гипотезы о механизме (комплексе физико-химических процессов) такого снижения выбросов.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И КОМПОНЕНТЫ ИССЛЕДОВАВШИХСЯ СМЕСЕЙ

В качестве базовых компонент для исследовавшихся в дальнейшем смесевых твердых топлив были выбраны длиннопламенный уголь

Таблица 2. Результаты экспериментальных исследований по определению теплоты сгорания, влажности, зольности и выхода летучих веществ

Топливо	W^a	A^d	V^{daf}	C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S^{daf}	O^{daf}	Теплота сгорания, Q , МДж/кг
	мас. %			%, на daf					
Уголь марки Д	5.8	15.8	12.4	74.2	3.6	1.6	0.1	20.5	26.2
Уголь марки Т	5.5	18.4	25.6	84.3	6.4	2.9	0.4	6.0	25.7
Древесина сосны	5.4	0.3	80.3	58.9	6.9	—	—	34.2	21.7

“Листвяжного” месторождения и тощий (месторождение “Алардинское”) достаточно типичные для большой и малой энергетики. Второй компонентой исследовавшихся смесевых топлив была измельченная древесина сосны (ООО Дзержинский ЛПК г. Томск). Сосновые опилки являются основным видом отходов процессов лесопиления и деревообработки на территории РФ, а также многих других государств. Такие отходы лесопиления очень дешевы и их использование в качестве второй компоненты смесевых топлив экономически эффективно. При анализе процессов термического разложения твердых топлив на основе диспергированных углей и древесины необходимы, как правило, данные по элементному составу всех используемых компонент. Для этого проведены экспериментальные исследования по определению технического и элементного состава использовавшихся углей и древесины, результаты которых представлены в табл. 2.

Проведение экспериментальных исследований начиналось с подготовки топлива. Эксперименты проводились в лабораторных условиях при температуре окружающей среды 20°C, давлении 101.4 кПа и влажности 75%.

При подготовке экспериментов навески углей размалывались в шаровой барабанной мельнице до мелкодисперсного состояния. В состав мельницы входили пятилитровый керамический барабан, мелющие шары из того же материала и специализированные валки. После измельчения при помощи сит (ГОСТ Р 51568-99) выполнялся рассев и приготовление навесок со средним размером частиц менее 80 мкм.

Отходы лесопиления предварительно очищались от разнородных примесей (кора, сучки, ветки), образующихся при пилении. Подготовка смесевых топлив проходила с использованием древесины одного происхождения (отходы одной смены лесопиления). Подготовка навесок смесевых топлив проводилась с помощью отбора опила пилотматериалов с последующим просеиванием через сито размером 200 мкм.

Навески из частиц, прошедших через сита, формировались в смесевые топлива при разных объемных концентрациях древесины в смеси с углями марок Д, Т в компонентном соотношении

(%): 10/90; 25/75; 50/50. Готовая смесь помещалась в оцинкованный барабан планетарной мельницы *Pulverisette 6* с шарообразными мелющими телами диаметром 5 мм в массовом соотношении 1 : 1. Процесс смешения осуществлялся при скорости вращения 500 об/мин в течение 7 мин [20].

Анализ элементного состава, формы и структуры смесевых топлив проводился методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) с использованием сканирующего электронного микроскопа (РЭМ) *JSM 6000C* (JEOL, Япония) [20]. Прибор позволяет исследовать структуру поверхности смесевых топлив с увеличением от 10 до 60 000 крат.

Микроскоп *JSM 6000C* обеспечивал возможность сканирования поверхности образца максимально сфокусированным электронным пучком с одновременной регистрацией возбужденного этим пучком излучения [20]. В качестве такого излучения используются низкоэнергетические (до 50 эВ) вторичные электроны, которые генерируются материалом образца при релаксации и возбуждении внешних электронных оболочек, вызванные облучением, что позволяет отображать рельеф поверхности исследуемого образца. Для повышения качества изображения частиц они покрываются тонким слоем золота (0.02 мкм), а ускоряющее напряжение устанавливается в диапазоне излучений от 10 до 15 кВ.

Технические характеристики топлив (калорийность, зольность, влажность и выход летучих) используются традиционно для обоснования возможности их эффективного применения при сжигании в топках энергетического оборудования. Для численной оценки этих характеристик исследовавшихся топлив проведены экспериментальные исследования в соответствии с методиками, описанными в ГОСТ 147-2013 (*ISO 1928-2009*), ГОСТ 11022-95, ГОСТ 27314-91 (*ISO 589-81*), ГОСТ 6382-2001 [21–24].

Численные значения скорости термического разложения смесевых топлив, температур начала термического разложения и полного завершения термического разложения обеспечивают возможность оценки степени влияния древесины в смесевых твердых топливах на основе углей двух марок Д и Т на характеристики горения. Экспери-

ментальные исследования проведены на установке *Netzsch STA 449 F3 Jupiter (Netzsch, Germany)* [25]. Это оборудование позволяет выполнять исследования в интервалах температур 25–1300°C. Рост температур варьируется в диапазоне скоростей нагревания от 0.1 до 100°C/мин или от 0.1 до 10°C/мин [25]. Анализатор работает при продувке через реакционную камеру инертного или реакционного газа. Термический анализ каждой навески массой 20 мг выполнялся при скорости роста температуры 10°C/мин (максимальная достигнутая температура 1100°C) [25].

Для определения скорости термического разложения смесевых топлив использована методика [26]. Температура начала термического разложения определялась методом [27, 28]. Индекс начала термического разложения топлив (D_i) рассчитывался по формуле [26]

$$D_i = \frac{v_{\max}}{t_p \cdot t_e}$$

Здесь $v_{\max} = (d_w/d_t)_{\max}$ – максимальная скорость термического разложения, t_p – время достижения максимальной скорости термического разложения, t_e – время начала термического разложения.

Индекс (D_f) использовался для оценки степени полного термического разложения, которая описывается формулой [28, 29]

$$D_f = \frac{v_{\max}}{\Delta t_{1/2} \cdot t_p \cdot t_f},$$

где $\Delta t_{1/2}$ – полупериод в момент достижения максимальной скорости термического разложения, t_f – время полного термического разложения топлива.

Анализ степени реактивности исследовавшихся смесевых топлив позволил определить изменения их характеристик при варьировании долей компонентов.

Оценка влияния доли древесины в смесевых твердых топливах с углями разных марок на выход летучих веществ выполнена при исследовании термического разложения этих топлив с применением квадрупольного масс-спектрометра *QMS 403 C Aeolos* [28, 29].

Масс-спектрометр предназначен для комплексного анализа многокомпонентных газов и позволяет осуществлять динамический контроль состава различных смесей. При проведении анализа дополнительное оборудование было непосредственно связано с термоанализатором *Netzsch STA 449 F3 Jupiter (Netzsch, Germany)*, и регистрация масс-спектров осуществлялась совместно с термоанализом [25].

Результаты анализа представлены в виде масс-спектрометрических кривых, соответствующих основным антропогенным газам (CO_2 , SO_2 и

NO_x), и сопоставлены с термогравиметрическими и дифференциально термическими кривыми. Полученные масс-спектры выделяющихся при термическом разложении исследуемых смесевых топлив газов сравнивались с масс-спектрами образующихся при пиролизе навесок однородных углей. По результатам сравнений проводилась оценка массы выделяемых антропогенных газов при термическом разложении смесевых топлив на основе углей и древесины.

Вследствие определенной неоднородности структуры двух исследовавшихся углей в малых по массе навесках (вследствие возможных небольших отклонений содержания органической и минеральной частей топлива) проводилась оценка случайных погрешностей определения характеристик исследовавшихся смесевых твердых топлив. Для этого все эксперименты при фиксированных значениях основных значимых факторов проводились 3–4 раза, результаты усреднялись и рассчитывались среднеквадратические отклонения, относительные значения которых не превышали 4–5%. На этом этапе обработки результатов экспериментов проводилась также оценка систематических ошибок средств измерений основных определяемых характеристик. Значения этих погрешностей (вследствие высокого уровня систем регистрации параметров, использовавшегося аналитического и измерительного оборудования) не превышали 1.5%.

Результаты исследования термического разложения навесок основных компонент топлив, а также смесевых топлив в соотношении уголь/древесина от 10 до 50% представлены на рис. 1–3.

Приведенные на рис. 1 термограммы позволяют оценить температуры начала и полного термического разложения основных компонент, используемых при формировании смесевых топлив на их основе. Непосредственно термическое разложение древесины начинается при температурах от 175°C, угля марки Д – от 220°C и угля марки Т – от 240°C. Полное термическое разложение у древесины завершается при температуре 550°C, у угля марки Д – при 750°C и угля марки Т – при 1020°C. Первый пик на термограммах (рис. 1) соответствует испарению воды у всех топлив. Древесина при термическом разложении имеет два наиболее выраженных пика. В диапазоне от 175 до 400°C завершается разложение гемицеллюлозы. С ростом температур от 400 до 570°C происходит разложение целлюлозы и лигнина.

На рис. 2 представлены результаты термогравиметрии смесевых топлив на основе угля марки Д и древесины. Приведенные термограммы позволяют сделать вывод, что увеличение концентрации древесины в смесевом топливе до 50% приводит к снижению времени полного термического разложения до 8.3% по отношению к углю.

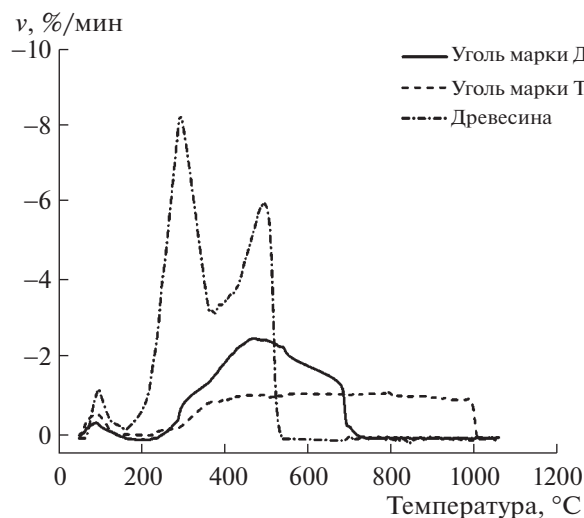


Рис. 1. Зависимость скорости термического разложения углей марок Д, Т и древесины от температуры.

Процесс разложения топлива завершается при температуре $\approx 690^\circ\text{C}$. Последнее обусловлено увеличением массы летучих веществ (по сравнению с углем) при нагреве в смесевых топливах и более низкими температурами начала термического разложения древесины.

На рис. 3 представлены результаты термогравиметрии смесевых топлив на основе угля марки Т и древесины. По аналогии с длиннопламенным углем процесс термической конверсии смесевых топлив из угля марки Т можно условно разделить на четыре стадии (рис. 3). На первой стадии происходит удаление влаги, на второй — разложение гемицеллюлозы, целлюлозы, на третьей — разложение лигнина и частично угля, а на четвертой стадии заканчивается разложение угля.

На рис. 2 и 3 хорошо видны отличия термогравиметрических кривых топлив на основе длиннопламенного и тощего углей. Для последнего характерно существенное уменьшение интервала температур, в котором происходит пиролиз смесевоего топлива, с ростом доли древесины. Процесс термического разложения однородного угля марки Т заканчивается при температуре $T \approx 1020^\circ\text{C}$. При доле древесины 10% в смесевом топливе процесс полного термического разложения смесевоего топлива завершается при температуре $T \approx 950^\circ\text{C}$. С увеличением доли древесины до 25% процесс термического разложения смесевоего топлива завершается при температуре менее 700°C . В этом случае биомасса выступает в роли своеобразного интенсификатора пиролиза тощего угля. Установленные закономерности дают основания для вывода о высокой степени взаимодействия смесевых топлив на основе угля марки Т и древесной биомассы при их термическом разложении. Важ-

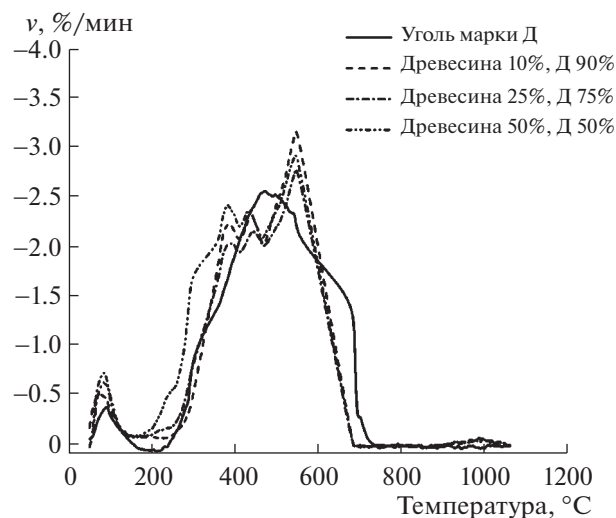


Рис. 2. Зависимость скорости термического разложения смесевых топлив на основе угля марки Д и древесины от температуры.

ным при этом является то, что у смесевых топлив на основе длиннопламенного угля такой эффект незначителен, т.е. древесина является инициирующей добавкой селективно (избирательно). Соответственно, термический анализ, аналогичный описанному выше, необходимо проводить при оценке возможности использования любого угля как базовой компоненты в смесевых топливах такого рода.

В табл. 3 представлены результаты термогравиметрического анализа смесевых топлив на основе углей марок Д, Т и древесины, позволяющие сделать вывод о том, что увеличение доли древе-

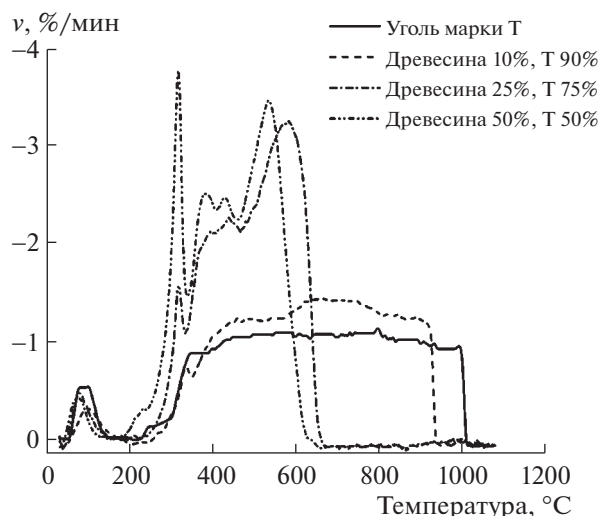


Рис. 3. Зависимость скорости термического разложения смесевых топлив на основе угля марки Т и древесины от температуры.

Таблица 3. Результаты термогравиметрического анализа смесевых топлив на основе углей марок Д, Т и древесины

Топливо (древесина/уголь), %	* v_{\max} , %/мин	T_p	T_e	T_f	$\Delta T_{1/2}$	D_i , мас. %/Т ²	D_f , мас. %/Т ³
		°С					
100/0	8.4	304	175	550	267	$15.78 \cdot 10^{-5}$	$18.82 \cdot 10^{-8}$
0/100 Д	2.58	482	220	753	343	$2.43 \cdot 10^{-5}$	$2.07 \cdot 10^{-8}$
10/90	3.39	580	229	689	274	$2.54 \cdot 10^{-5}$	$3.09 \cdot 10^{-8}$
25/75	3.07	585	184	691	334	$2.85 \cdot 10^{-5}$	$2.27 \cdot 10^{-8}$
50/50	4.49	330	174	691	284	$7.79 \cdot 10^{-5}$	$6.93 \cdot 10^{-8}$
0/100 Т	1.2	807	237	1019	789	$0.63 \cdot 10^{-5}$	$0.18 \cdot 10^{-8}$
10/90	1.5	730	213	950	602	$0.97 \cdot 10^{-5}$	$0.36 \cdot 10^{-8}$
25/75	3.3	595	194	685	324	$2.86 \cdot 10^{-5}$	$2.50 \cdot 10^{-8}$
50/50	3.94	325	160	670	276	$7.50 \cdot 10^{-5}$	$6.55 \cdot 10^{-8}$

Примечание: v_{\max} – максимальная скорость термического разложения; T_p – температура максимальной скорости термического разложения; T_e – температура начала термического разложения; T_f – температура полного термического разложения; $\Delta T_{1/2}$ – температура в полупериод достижения максимальной скорости термического разложения; D_i – индекс начала термического разложения топлив; D_f – индекс полного термического разложения топлив.

сины до 50% приводит к снижению температуры начала термического разложения смесевого топлива на основе углей марки Д до 20.9% и увеличению максимальной скорости реакции термического разложения в 1.7 раза. Такое же соотношение компонент для смесевых топлив на основе угля марки Т приводит к снижению начальной температуры термического разложения до 32.5%. Рост максимальной скорости реакции термического разложения топлив составил до 70% (рис. 3). Период полного термического разложения снижается до 34.2%. Индекс же зажигания связан с температурой начала термического разложения смесевых топлив (чем ниже температура начала термического разложения топлив, тем выше значение D_i).

Результаты проведенных экспериментов позволяют сделать вывод, что увеличение массовой доли древесины в смесевых топливах из каменных углей исследовавшихся марок способствует снижению начальных температур термического разложения, увеличению максимальной скорости реакции этого процесса, “смещению” “температурного” пика, соответствующего максимуму скорости пиролиза углей, в область более низких температур.

Результаты экспериментального анализа концентраций антропогенных газов в продуктах термического разложения смесевых топлив на основе углей марок Д и Т представлены на рис. 4.

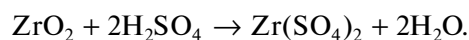
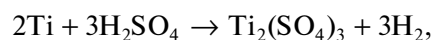
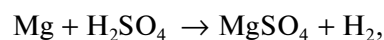
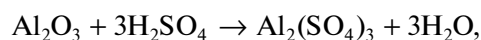
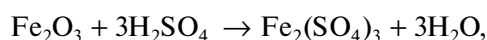
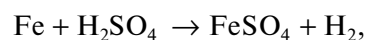
Из рис. 4 видно, что увеличение доли древесины до 50% в смесевом топливе приводит к снижению выделения основных антропогенных оксидов: на основе угля марки Д – NO_x на 23.8%, CO_2

на 17.1%, SO_2 на 38.7%; на основе угля марки Т – NO_x на 60.2%, CO_2 на 85.1%, SO_2 на 89.0%.

Полученные результаты показывают возможность существенного (до 90%) снижения негативного воздействия такими газами тепловых электрических станций на окружающую среду при использовании смесевых топлив на основе углей и древесины. На основании полученных результатов сформулирована гипотеза по механизму снижения доли антропогенных газов в продуктах сгорания смесевых твердых топлив.

Снижение концентрации оксидов углерода происходит за счет того, что древесина является углерод-нейтральной компонентой. Биомасса выделяет столько же углерода, сколько было поглощено при росте древесины.

Снижение выхода оксидов серы происходит за счет их взаимодействия с парами воды (в результате образуется серная кислота) и последующих реакций металлов и их оксидов, содержащихся в углях, при высоких температурах с серной кислотой:



При этом образуются соли (сульфаты), которые являются частью золы, пары воды (которые могут участвовать в дальнейшем в реакциях окис-

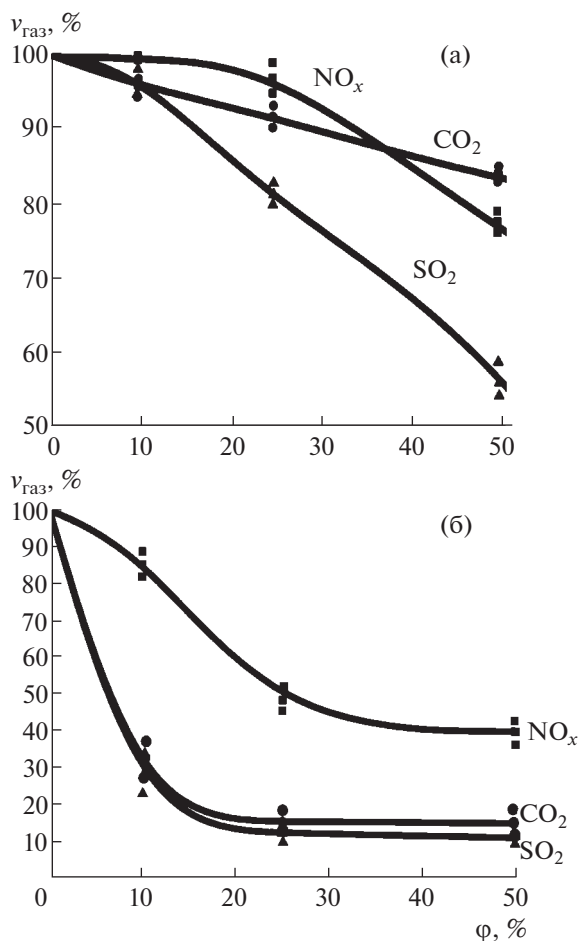
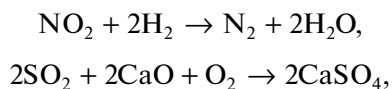


Рис. 4. Концентрации основных выделяемых вредных выбросов при термическом разложении смесевых топлив на основе углей марок Д (а), Т (б); ϕ – доля древесины в топливе.

ления углерода с образованием водорода) и водород. Водород же, в свою очередь, может взаимодействовать с оксидами серы с образованием серной кислоты и т.д.

В последние годы зарубежными исследователями установлена возможность протекания (при температурах более 900°C) реакций



приводящих к секвестированию оксидов серы и азота при их взаимодействии с водородом или кислородом.

Установленные в проведенных экспериментах закономерности иллюстрируют синергетический эффект сжигания смесевых топлив и необходимость детального исследования на стадии их формирования не только углей, являющихся основой таких топлив, но непосредственно самого смесевых топлива. В этом случае может быть достигнут

максимальный положительный эффект применения топлив на основе углей и древесины.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено, что при совместном термическом разложении частиц тощего угля и древесины происходит смещение процесса пиролиза угля в область более низких температур, а также, существенное (до 90%) снижение (по сравнению с однородным углем) выбросов оксидов серы и азота при совместном пиролизе угля и древесины. Сформулирована гипотеза по механизму секвестирования оксидов при совместном термическом разложении угля и древесины в результате термохимического взаимодействия промежуточных продуктов пиролиза (оксидов серы, паров воды, окислов металлов) с образованием солей металлов в твердых продуктах. Показано, что выделенный эффект проявляется и при пиролизе смеси длиннопламенного угля и древесины, но в существенно меньшем объеме. Полученные результаты иллюстрируют целесообразность экспериментального изучения процессов совместного термического разложения диспергированного угля и измельченной древесины на стадии отработки составов композитных топлив. Результаты экспериментов являются основой для развития математических моделей процессов горения смеси углей и древесной биомассы в части описания термических процессов, протекающих на стадии термического разложения смеси этих двух топлив.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Key World energy statistics / Dr. Fatih Birol // International Energy Agency (IEA), 2017. URL: <http://www.iea.org/statistics> (дата обращения: 25.10.2017)
2. China Electricity Council // Current Status of Desulphurization and Denitration of Five National Power Generating Groups in China, 2015. <http://www.ccc.org.cn/yaowenkuaidi/2015-03-09/134906.html> (дата обращения: 9.03.2015)
3. Bale V. // Sustainability. 2012, V. 4. P. 462.
4. Mohammad S. // Pak. J. Anal. Environ. Chem. 2016. V. 17. № 1. P. 18.
5. Gilbert M. // DSD. 2015. P. 241.
6. Dzung D., Berganza I., Sendin A. // IEEE International Symposium. 2011. P. 474.
7. Denholm P., Ela E., Kirby B., Milligan M. // Technical Report TP-6A2-47187. 2010.
8. Rune R.E. // Operational Research. May 2018. V. 266. P. 1153.
9. Siir Kilkis // Cleaner Production. July 2017. V. 155. № 1. P. 72.
10. Syrodoy S.V., Kuznetsov G.V., Salomatov V.V. // Thermal Eng. 2015. V. 62. P. 703.

11. *Kuznetsov G.V., Salomatov V.V., Syrodoy S.V.* // Combustion, Explosion and Shock Waves. 2015. V. 51. P. 409.
12. *Захаревич А.В.* // ХТТ. 2017. № 3. С. 25.
13. *Vershinina K.Y.* // Solid Fuel Chem. 2016. V. 50. P. 88.
14. *Вершинина К.Ю., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А.* // ХТТ. 2017. № 2. С. 30.
15. *Няшина Г.С., Шлегель Н.С., Стрижак П.А.* // Кокс и химия: научно-технический и производственный журнал. 2017. № 4. С. 40.
16. *Xuebin W.* // Proc. Combustion Inst. 2011. V. 33. P. 2725.
17. *Mohapatra S.K.* // Sadhana. June 2015. V. 40. P. 1283.
18. *Al-Mansour F.* // Biomass and Bioenergy. 2010. V. 34. P. 620.
19. *Strakhov V.L., Garashchenko A.N., Kuznetsov G.V., Rudzinskii V.P.* // Combustion, Explosion, and Shock Waves. 2001. V. 37. P. 178.
20. *Zenkov A., Yankovsky S., Matveeva A., Lavrinenko S., Gromov A.* // MATEC Web of Conferences Cep. 2016. V.110. С. 01131.
21. ГОСТ 147-2013 – Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет
низшей теплоты сгорания (с Поправкой). М.: Стандартинформ, 2014. 43 с.
22. ГОСТ 11022-95 – Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности. М.: Стандартинформ, 2006. 8 с.
23. ГОСТ 27314-91 – Топливо твердое минеральное. Методы определения влаги. М.: Стандартинформ, 2007. 11 с.
24. ГОСТ 6382-2001 – Топливо твердое минеральное. Методы определения выхода летучих веществ. М.: Стандартинформ, 2008. 11 с.
25. *Yankovsky S.A., Slyusarsky K.V., Korotkikh A.G., Sorokin I.V.* // AIP Conference Proceedings. 2017. V. 1800. № 020014.
26. *Haykiri-Acma H., Yaman S.* // Waste Manage. 2008. V. 28. P. 2077.
27. *Medic D., Darr M., Shah A., Potter B., Zimmerman J.* // Fuel. 2012. V. 91. P. 147.
28. *Wannapeera J., Fungtammasan B., Worasuwannarak N.* // J. Anal. Appl. Pyrol. 2011. V. 92. P. 99.
29. *Niu Z., Liu G., Yin H., Wu D., Zhou C.* // Fuel. 2016. V. 172. P. 1.