

УДК 662.611

ТЕРМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ БУРОГО УГЛЯ, СОСНОВЫХ ОПИЛОК, КАРТОНА И ИХ СМЕСЕЙ

© 2022 г. А. В. Жуйков^{1,2,*}, О. Ю. Фетисова^{2,**}, Д. О. Глушков^{3,***}

¹ Сибирский федеральный университет, 660041 Красноярск, Россия

² ФГБУН Институт химии и химической технологии СО РАН, 660036 Красноярск, Россия

³ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634050 Томск, Россия

*e-mail: azhuikov@sfu-kras.ru

**e-mail: fou1978@mail.ru

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

Поступила в редакцию 15.02.2022 г.

После доработки 02.03.2022 г.

Принята к публикации 30.03.2022 г.

В рамках синхронного термического анализа исследован процесс горения бурого угля, лесной биомассы, картона и их смесей в окислительной среде со скоростью нагрева 20 °С/мин. Получены кривые убыли массы и дифференциальной сканирующей калориметрии, описывающие процесс горения индивидуальных топлив и твердотопливных смесей в массовой пропорции 50:50. С использованием аналитических и численных методов определены основные параметры процесса горения, такие как температуры воспламенения и выгорания, а также максимальная скорость реакции. Установлены индексы горения топлив и их смесей, вычислены кинетические параметры исследуемого процесса. По данным дифференциальной убыли массы определен характер взаимодействия компонентов топливной смеси. Высокое содержание летучих компонентов в опилках и картоне повлияло на снижение температуры воспламенения смесей на 15–18% по сравнению с бурым углем. Температура выгорания смеси при добавлении опилок снизилась на 6.5%, а добавление картона повлияло на увеличение температуры выгорания смеси на 27%.

Ключевые слова: уголь, лесная биомасса, картон, твердотопливные смеси, горение, термогравиметрический анализ

DOI: 10.31857/S0023117722040119

1. ВВЕДЕНИЕ

Необходимость сокращения потребления ископаемого топлива при выработке тепловой и электрической энергии на угольных теплоэлектростанциях и промышленно-отопительными котельными обусловлено высокими выбросами парниковых газов и мелкодисперсных золых частиц. Одним из самых доступных способов для перехода на ресурсосберегающее и экологически безопасное производство тепловой и электрической энергии с минимальными капитальными затратами на реконструкцию существующего теплоэнергетического оборудования является совместное сжигание ископаемого топлива и биомассы (в виде отходов). Помимо экологических преимуществ переход на твердотопливные смеси повлечет за собой технические и экономические выгоды. США лидер в производстве тепловой и электрической энергии из биомассы, за ними следуют Китай, Германия, Бразилия, Швеция, Латвия, Финляндия и Эстония [1]. В настоя-

щее время при совместном сжигании угля на теплогенерирующих установках доля биомассы в твердотопливной смеси составляет от 5 до 10% по массе, хотя технически осуществимо увеличение доли биомассы в смеси до 50%. Высокая доля биомассы в твердотопливной смеси влияет на снижение выбросов парниковых газов, так как биомасса относится к углеродно-нейтральным топливам с точки зрения выбросов CO₂ [2, 3]. Совместное сжигание биомассы и угля так же влияет на снижение оксидов серы и золы из-за того, что содержание серы в биомассе намного меньше, чем в ископаемом топливе, а зольность минимальная. На снижение оксидов азота добавление биомассы влияет меньше, так как выход оксидов азота, образующихся при сжигании топлива, зависит в большей степени не от состава твердого топлива, а от конструкции теплоэнергетического оборудования и режимов его работы [4]. Помимо достоинств совместного сжигания угля и биомассы существует и ряд проблем:

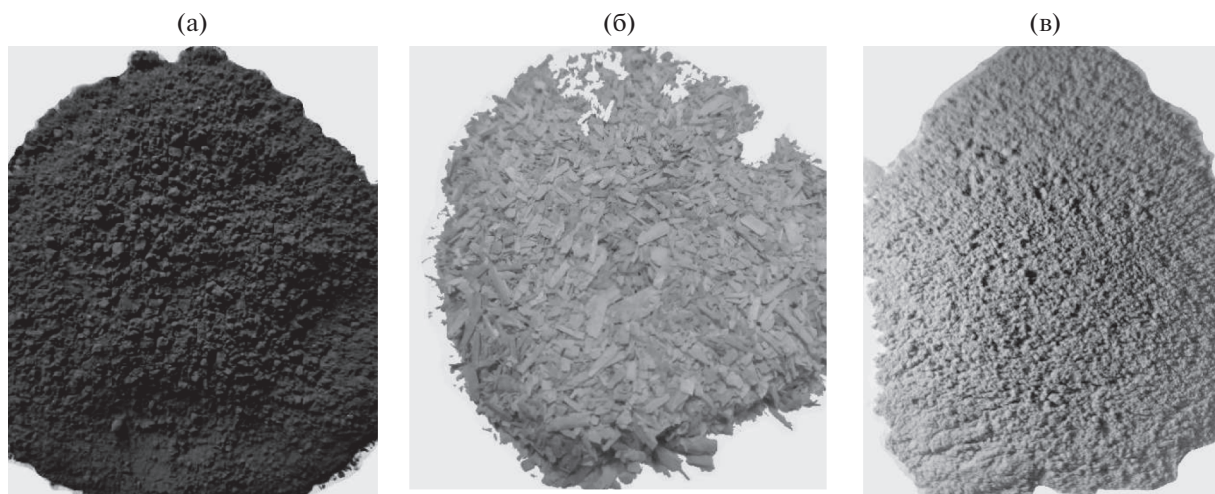


Рис. 1. Внешний вид твердых топлив: бородинский бурый уголь (а); сосновые опилки (б); упаковочный картон (в).

вследствие высокой влажности биомассы возникают трудности в ее хранении и транспортировке, склонности к шлакованию и коррозии поверхностей нагрева котлоагрегатов, большая вариативность форм частиц, влияние синергетического эффекта на совместное горение и многие другие [5]. К настоящему времени пока не разработана общая теоретическая и экспериментальная база по совместному сжиганию угля и биомассы вследствие широкой номенклатуры топливных компонентов.

Для исследования совместного горения ископаемого топлива и биомассы применяются различные методы анализа: экспериментальный, аналитический и другие [6]. Один из наиболее распространенных — термогравиметрический анализ, основанный на регистрации изменения массы исследуемого образца при его нагреве. Условия проведения данного анализа отличаются от реальных топочных, но позволяют быстро и качественно определять основные характеристики горения, оценить тепловые реакции и кинетику процесса, а также определить характер взаимодействия компонентов твердотопливных смесей, что дает существенный вклад в развитие теории их горения.

Вoшманчаг и др. [7], исследовав совместное горение угля, биомассы и картона в рамках термического анализа, установили, что при горении синергетический эффект характерен для всех смесей. При исследовании совместного сжигания угля и биомассы синергетический эффект проявляется в снижении на 10% температуры максимальной скорости убыли массы и снижении энергии активации на 17% [8]. Определение таких параметров, как температура зажигания и выгорания, реакционная способность, установление влияния одного компонента на другой при горе-

нии топливных смесей, является основой для прогноза оптимальных условий их практического применения [9, 10]. Древесная биомасса благодаря своей структуре и высокому содержанию летучих, которые характеризуют ее относительно высокую реакционную способность, имеет низкую температуру зажигания [11].

Проведенный анализ литературных данных показал отсутствие единого подхода к прогнозированию эффективности использования твердотопливных смесей различной природы, в связи с этим необходимо развивать исследования для расширения теоретической и экспериментальной базы процессов совместного сжигания углей, биомассы и прочих твердых горючих отходов.

Цель работы — установление характеристик горения бурого угля, опилок и картона как отдельно, так и в смеси в рамках термогравиметрического анализа.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

2.1. Топлива. В качестве объектов исследования выбраны следующие топлива (рис. 1):

- 1) бородинский бурый уголь марки 2Б (УГ), Канско-Ачинский угольный разрез, Россия;
- 2) сосновые опилки (ОП), Красноярский край, Россия;
- 3) упаковочный картон (К), Россия.

В обозначениях индивидуальных топлив и двухкомпонентных топливных смесей использованы сочетания численного значения символического обозначения и массовой концентрации соответствующего компонента (%): УГ 100; ОП 100; К 100; УГ50 + ОП50; УГ50 + К 50.

Бородинский бурый уголь используется как основное проектное топливо на теплоэлектро-

Таблица 1. Технические характеристики и элементный состав топлив

Топливо	W_t^a	A^d	V^{daf}	Элементный состав, мас. % на daf					Q_s^{daf} , МДж/кг
				С	Н	Н	С	О	
				%					
УГ	13.6	9.2	47.3	73.5	5.1	1.0	0.3	20.1	24.19
ОП	2.8	—	80.2	55.6	5.5	0.3	—	38.6	25.77
К	2.5	10.5	85.1	46.4	5.7	—	0.2	47.7	17.68

станциях и промышленно-отопительных котельных в г. Красноярске. Древесные опилки – основной вид отходов на лесобработывающих предприятиях Красноярского края, а упаковочный картон – один из самых распространенных видов горючих твердых коммунальных отходов.

Характеристики образцов изучены после достижения ими состояния аналитической пробы, влажность которой доведена до состояния равновесия с влажностью воздуха в лабораторном помещении. Образцы бурого угля, опилок и картона с начальным размером менее 20 мм по отдельности измельчали в дисковой мельнице *Retsch DM 200* (*Retsch GmbH*, Германия). Ее основные характеристики: максимальный начальный размер частиц менее 20 мм; максимальное число оборотов 528 об/мин, гарантированная тонина помола менее 100 мкм. Для подготовки экспериментальных образцов использовалась аналитическая просеивающая машина *RETSCH AS 200 BASIC* (*Retsch GmbH*, Германия) с двумя ситами, размер ячеек которых составлял 53 и 200 мкм. Образцы угля, сосновых опилок и картона получались с размером частиц 53–200 мкм, что соответствовало размерам пылеугольного топлива, используемого при факельном сжигании в энергетических котлах [12]. Калорийность топливных образцов определяли в калориметре *C6000* (ИКА, Германия). Влажность – по ГОСТ 8.649-2015, зольность – по ГОСТ 55661-2013, выход летучих компонентов – по ГОСТ R 55660-2013, содержание серы – по ГОСТ 32979-2014, высшая теплота сгорания – по ГОСТ 147-2013, содержание углерода, водорода, азота, серы – по ГОСТ 32979-2014, содержание кислорода – по ГОСТ 27313-2015. Смеси топлив были получены с помощью аналитических весов *MS105du* (*Mettler-Toledo*, Швейцария). Основные характеристики топливных образцов приведены в табл. 1.

Низкая влажность, минимальное содержание золы, высокое содержание летучих компонентов делают сосновые опилки перспективным добавочным компонентом к основному твердому топливу. По характеристикам в качестве топлива картон отличается от сосновых опилок более низкой влажностью и относительно высоким содержанием летучих компонентов. Вместе с тем высокое содержание золы и низкая теплота сгорания

(табл. 1) могут негативно сказываться при совместном сжигании картона с углем. Уголь имеет высокую влажность, высокую зольность, а содержание летучих компонентов почти в 2 раза меньше, чем у картона и опилок.

Термический анализ образцов проводился с применением синхронного термоанализатора *SDT Q600* (*TA Instruments-Waters LLC, NewCastle, DE, США*). Кривые убыли массы (ТГ), скорости реакции (ДТГ), дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) снимали для навесок топлив массой 6.0 ± 0.25 мг в потоке воздуха с расходом 50 мл/мин при скорости нагрева $20^\circ\text{C}/\text{мин}$. Основные характеристики процессов горения определяли путем анализа термогравиметрических кривых, полученных из ПО *UniversalAnalysis 2000* (*TA Instruments-Waters LLC, NewCastle, DE, США*).

2.2. Обработка экспериментальных данных термического анализа. По данным термогравиметрического анализа определялся индекс горения топлива (S) [13–15], который применяется для сравнения горючести разных топлив и включает в себя зажигание, скорость горения и температуру выгорания [16]. Высокое значение индекса горения характерно для топлив с низкой температурой зажигания, низкой температурой выгорания и высокой скоростью реакции. Для таких топлив характерны низкая влажность, низкая зольность, высокое содержание летучих компонентов и, как правило, низкая калорийность [17]. Для вычисления значений S по кривым ТГ и ДТГ определялись температура зажигания (T_i) и температура выгорания (T_b) по типичному методу пересечения кривых, визуализация которого представлена на рис. 2 [18, 19]. Значение T_{\max} соответствовало максимальной скорости реакции топлива при горении R_{\max} .

Индекс горения [21, 22]:

$$S = \frac{R_{\max} \cdot R_{\text{mean}}}{T_i^2 \cdot T_b}, \quad (1)$$

где R_{\max} – максимальная скорость реакции, %/мин; R_{mean} – средняя скорость реакции (от воспламенения до выгорания углеродного остат-

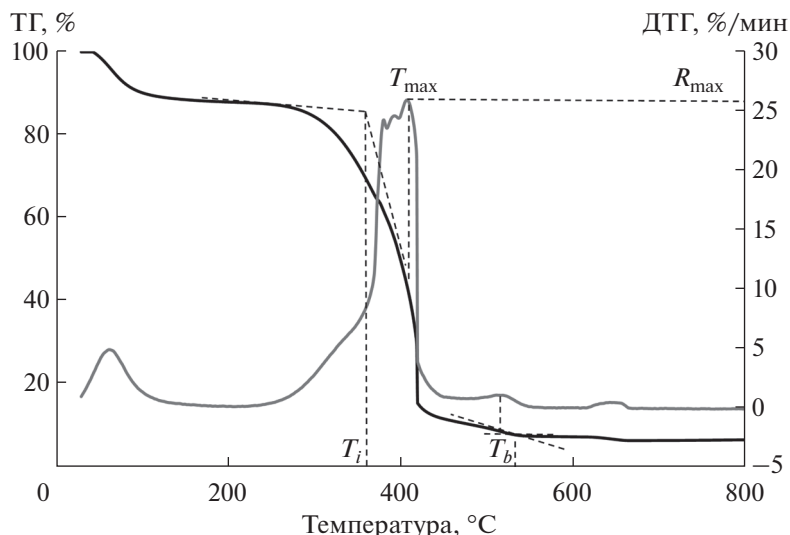


Рис. 2. Определение температуры зажигания методом пересечения кривых.

ка), %/мин; T_i и T_b – температуры воспламенения и выгорания углеродного остатка, °С.

2.3. Кинетический анализ. Расчет основных кинетических параметров (энергии активации и предэкспоненциального множителя) основан на обобщенном аррениусовском выражении скорости реакции при неизотермических условиях:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} e^{\frac{-E_a}{RT}} f(\alpha), \quad (2)$$

где A – предэкспоненциальный множитель, s^{-1} , β – скорость нагрева, $град \cdot мин^{-1}$, E_a – энергия активации, $Дж \cdot моль^{-1}$, R – универсальная газовая постоянная, $Дж \cdot моль^{-1} K^{-1}$, T – температура, K , $f(\alpha)$ – математическая модель безразмерной кинетической функции и зависит от типа и механизма реакции. Степень превращения вещества $\alpha = \frac{m_0 - m}{m_0 - m_f}$, где m_0 и m_f – исходная и конечная масса вещества, m – масса вещества в точке измерения.

Вычисления проводились с использованием метода Коутса-Редферна, основное уравнение которого:

$$\ln \left[\frac{g(\alpha)}{T^2} \right] = \ln \left(\frac{AR}{\beta E_a} \right) - \frac{E_a}{RT}, \quad (3)$$

где $g(\alpha)$ – интегральная форма функции $f(\alpha)$ (см. уравнение (2)).

Графическая интерпретация уравнения (3) для определения кинетических параметров термогравиметрических кривых реакции первого порядка использует следующее уравнение:

$$\ln \left[-\frac{\ln(1 - \alpha)}{T^2} \right] = \ln \left(\frac{AR}{\beta E} \right) - \frac{E}{RT}. \quad (4)$$

Зависимость $\ln \left[-\frac{\ln(1 - \alpha)}{T^2} \right]$ от $1/T$ аппроксимируется линейной функцией. Применимость выбранной модели оценивается квадратом коэффициента корреляции (R^2), который характеризует степень линейной связи выбранных величин. При совпадении экспериментальных и теоретических данных квадрат коэффициента корреляции равен единице.

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

3.1. Горение индивидуальных топлив. Профили кривых горения индивидуальных топлив и их смесей представлены на рис. 3. На начальном этапе нагрева бурого угля происходит убыль массы за счет удаления адсорбированной влаги в интервалах температур от 50 до 120°C (кривая ТГ). На кривой ДСК удаление влаги характеризуется эндотермическим эффектом в этой же температурной области. При нагреве угля выше 300°C интенсифицируется его термическое разложение с выделением и воспламенением летучих. Этот процесс сопровождается интенсивной убылью массы образца (наклон кривой ТГ), увеличением скорости реакции (выраженный пик на кривой ДТГ) и экзотермическим эффектом ДСК (рис. 3, в). Воспламенение и горение летучих компонентов являются вторым этапом всего процесса горения топлив. Горящие газообразные продукты повышают температуру поверхности топливной частицы и приводят к зажиганию коксового остатка при температуре 355°C (табл. 2).

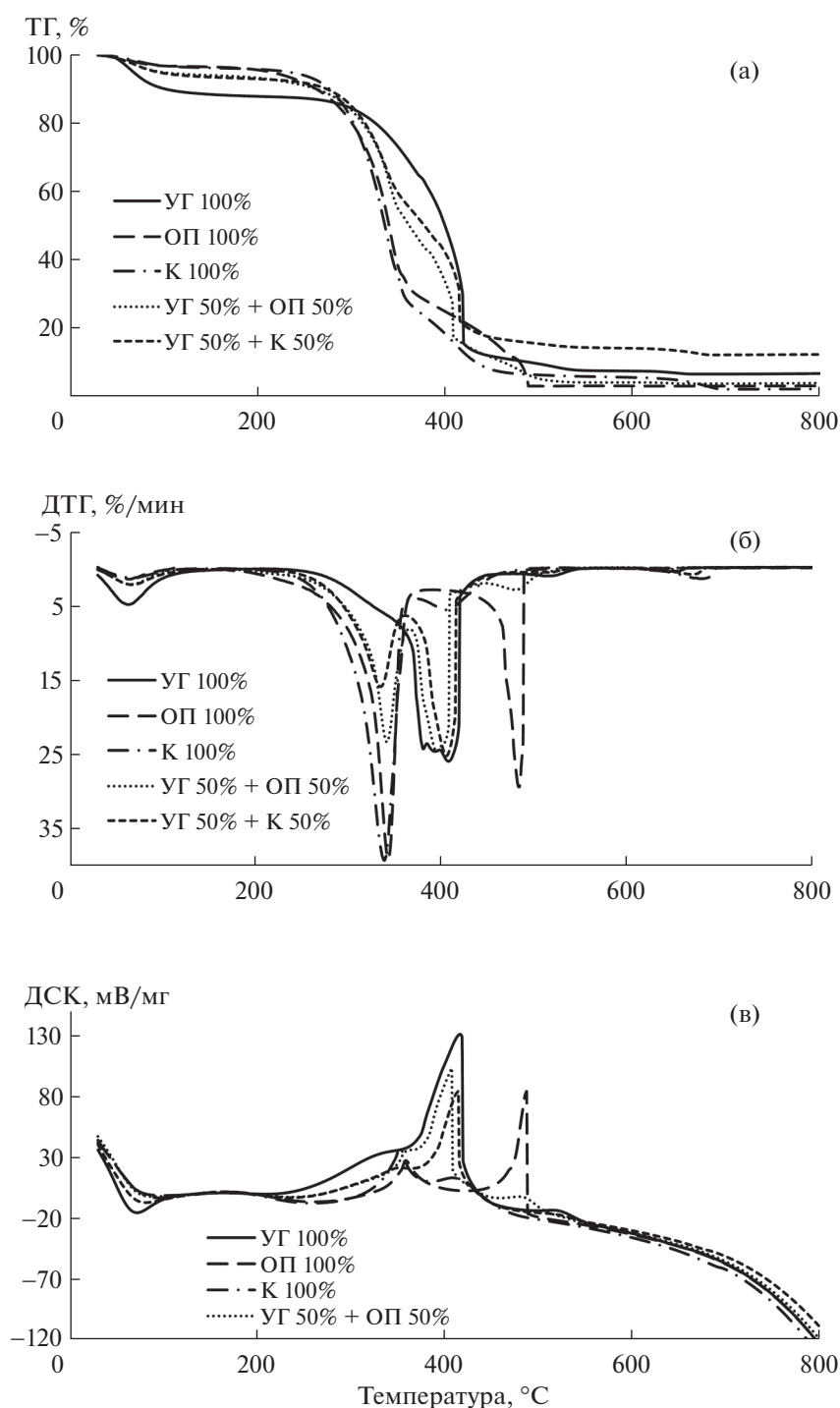


Рис. 3. Профили кривых горения бурого угля, сосновых опилок, картона и их смесей: кривые ТГ (а); кривые ДТГ (б); кривые ДСК (в).

Зажигание и горение коксового остатка бурого угля являются третьим этапом процесса горения топлив и выражаются один пиком ДТГ с максимальной температурой 408°C, соответствующей максимальной скорости реакции 26 %/мин, до температуры выгорания коксового остатка 536°C.

Интенсивность теплового потока (рис. 3, в) при горении бурого угля составила 130 мВ/мг.

Первый этап горения опилок сопровождается убылью массы в интервале температур от 40 до 100°C (рис. 3, а) и небольшим эндотермическим эффектом (рис. 3, в) из-за низкого содержания

Таблица 2. Характеристики горения топливных образцов

Топливо	T_i	T_{max}	T_b	R_{max} , %/мин	$S \times 10^{-6}$
	°C				
УГ 100%	355	408	536	26	1.5
УГ 50% + ОП 50%	309	389	503	27	2.4
ОП 100%	308	343	490	39	4.4
УГ 50% + К 50%	300	405	679	25	1.6
К 100%	300	339	691	39	4.0

влаги. Второй этап горения начинается в интервале температур 185–270°C воспламенением и горением целлюлозы, гемицеллюлозы и части лигнина. Стоит отметить, что гемицеллюлоза в древесном биотопливе начинает разлагаться при температуре 185°C, а при температуре 270°C процесс ее термического разложения завершается. Этот этап выражен плавной нисходящей линией ТГ и началом экзотермического процесса ДСК. Основной, третий этап горения происходит в температурном интервале 300–490°C и выражен на ДТГ двумя узкими пиками, характерными при горении биомассы [21]. T_{max} самого высокого пика составляет 343°C и является обратной величиной реакционной способности топлива, т.е. чем выше максимальная скорость реакции, тем топливо имеет меньшую реакционную способность. Третий этап горения сосновых опилок сопровождается двумя основными пиками ДСК с интенсивностью теплового потока 27 и 86 мВ/мг. Второй экзотермический эффект с большим тепловым потоком соответствует горению лигнина.

Процесс сушки картона при его нагреве схож с характером нагрева сосновых опилок из-за низкого содержания влаги. Второй этап начинается с температуры 175°C и характеризуется плавной убылью массы (рис. 3, а), сопровождающейся экзотермическим эффектом (рис. 3, в) за счет воспламенения и горения целлюлозы, гемицеллюлозы и части лигнина, причем аналогично древесному биотопливу гемицеллюлоза начинает разлагаться при температуре 175°C, а при температуре 265°C процесс ее термического разложения завершается. Основной этап горения картона выражен тремя пиками ДТГ с максимальными температурами (T_{max}) 339, 399 и 678°C, отвечающими за сгорание основных летучих компонентов и части коксового остатка, оставшейся части лигнина и догоранию наиболее плотному углеродистому остатку, который образовался при химической и механической обработке древесины в процессе изготовления картона соответственно. Кривые ДСК основной стадии горения картона демонстрируют два экзо-эффекта (рис. 3, в), с величинами тепловых эффектов 38 и 13 мВ/мг. Ос-

новное тепловыделение приходится на горение летучих компонентов и малую часть коксового остатка.

3.2. Горение смесей. При добавлении по массе 50% сосновых опилок к бурому углю третий этап горения разделяется на три пика ДТГ (рис. 3, б). Первый пик ДТГ демонстрирует горение летучих компонентов и части коксового остатка, второй пик ДТГ демонстрирует горение коксового остатка бурого угля, а третий пик ДТГ характерен догоранию остатков лигнина. Все три пика ДТГ совпадают с пиками при горении бурого угля и опилок по отдельности. Температура зажигания смеси снизилась на 15% по сравнению с температурой зажигания бурого угля, температура выгорания уменьшилась на 6.5% (табл. 2). Индекс горения смеси угля и опилок увеличился на 60%, по сравнению с индексом горения бурого угля демонстрируя улучшение всех характеристик горения.

Горение смеси по массе, состоящей из 50% картона и 50% бурого угля, представлено на рис. 3. Температура зажигания смеси равна 300°C, соответствующей температуре зажигания картона (табл. 2). Кривая потери массы ТГ смеси при горении смещается в область более низких температур по сравнению с кривой ТГ бурого угля (рис. 3, а). Профили кривых ДТГ демонстрируют процесс горения смеси тремя пиками, в первом пике происходит горение целлюлозы, гемицеллюлозы и части лигнина, второй пик соответствует горению коксового остатка бурого угля, а третий пик демонстрирует догорание наиболее плотного коксового остатка угля и картона. Температура зажигания смеси по сравнению с бурым углем снизилась на 18%, а температура выгорания смеси повысилась на 27% (табл. 2). Высокая температура выгорания смеси повлияла на снижение индекса горения на 6.7%, это означает, что добавление по массе 50% картона к 50% бурого угля может ухудшить процесс горения.

Снижение максимальной скорости реакции на стадии выгорания смесей может быть связано с увеличением реакционной способности полукокса из-за выделения и сжигания летучих веществ, введенных с опилками или картоном на первой стадии реакции, или из-за его взаимодействия с более реакционноспособным полукоксом биомассы.

Влияние компонентов друг на друга в смеси при совместном горении представлено на рис. 4. Сравниваются экспериментальные данные и расчетные значения, полученные по формуле 2 [3]:

$$ДТГ_{расч} = x_1 ДТГ_1 + x_2 ДТГ_2, \quad (5)$$

где $ДТГ_1$ и $ДТГ_2$ – дифференциальные термогравиметрические зависимости для компонентов

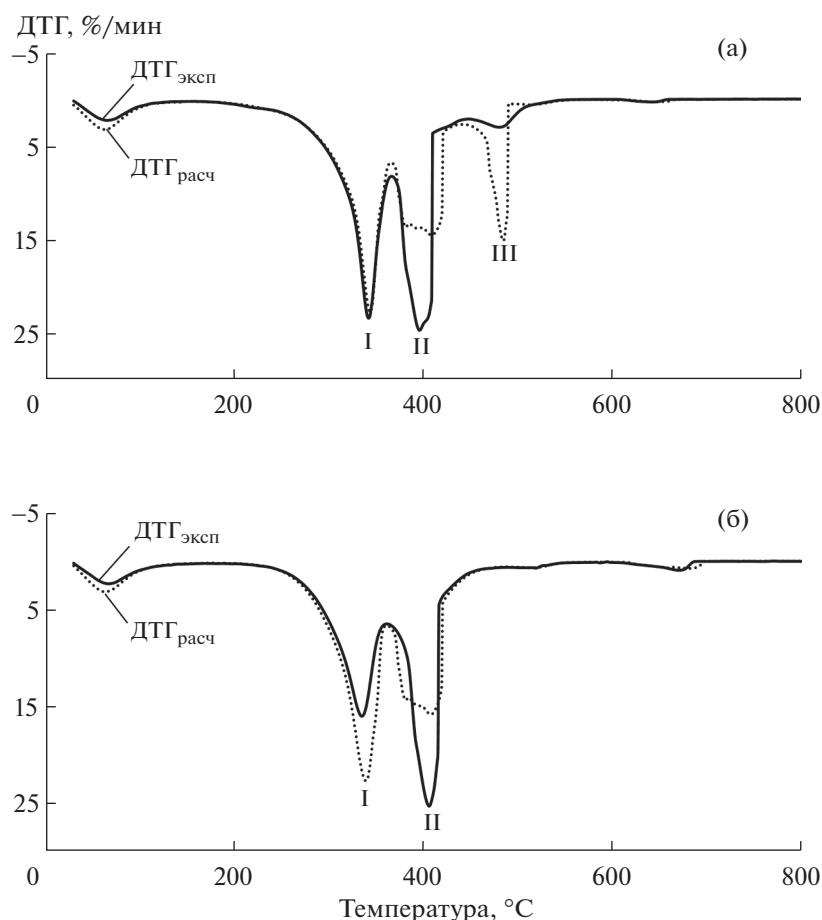


Рис. 4. Сравнение экспериментальных и расчетных кривых ДТГ для смесей: УГ 50% + ОП 50% (а); УГ 50% + К 50% (б).

смеси; x_1 и x_2 — массовые доли компонентов в смеси, сумма которых равна единице.

При горении смеси угля и опилок экспериментальные и расчетные значения пика ДТГ (рис. 4, а) полностью совпали, что говорит о принципе аддитивности при горении целлюлозы и гемицеллюлозы. Пик ДТГ II, в котором происходит горение лигнина и угля, расчетные значения не совпали с экспериментальными. При расчетных данных возникает пик ДТГ III, а при экспериментальных значениях третьего пика нет (рис. 4, а). Второй пик ДТГ при экспериментальных значениях выше, чем при расчетных, это говорит о том, что в пике ДТГ II происходит реагирование между углем и лигнином выраженное высоким значением R_{\max} .

Расчетные и экспериментальные значения двух пиков ДТГ при горении смеси угля и картона не совпадают (рис. 4, б), хотя и находятся в одних и тех же температурных областях. Происходит перераспределение максимальной скорости реакции, при расчетных значениях в первом пике (I) $R_{\max} = 22.6$ %/мин, во втором пике (II) $R_{\max} = 15.7$ %/мин, а при экспериментальных значе-

ниях в пике (I) $R_{\max} = 16.9$ %/мин, в пике (II) $R_{\max} = 25.2$ %/мин. При экспериментальных значениях происходит реагирование между углем и компонентами картона, влияющее на увеличение скорости реакции во втором пике.

3.3. Кинетические параметры индивидуальных топлив и их смесей. Кинетическое исследование включает анализ основной стадии горения топлив и их смесей. Основные кинетические характеристики (энергия активации и предэкспоненциальный множитель — приведены в табл. 3), из которых можно видеть, что горение опилок характеризуется самой высокой энергией активации 118 кДж/моль, характеризуется горение опилок. Это можно объяснить более низкой реакционной способностью лигнина. Наименьшая энергия активации была получена для стадии горения кокса картона 100% (27 кДж/моль).

Добавка 50% опилок к углю снизила энергию активации на стадии горения кокса почти в 2 раза (98 кДж/моль для угля 100% и 50 кДж/моль для смеси с массовой долей 50% опилок). В случае добавки картона к углю наблюдается совершенно иная картина: энергия активации смеси оказа-

Таблица 3. Кинетический анализ горения топлив и их смесей

Топливо	E , кДж/моль	A , с ⁻¹	R^2
УГ 100%	98	$8 \cdot 10^6$	0.9839
УГ50% + ОП50%	50	$2.8 \cdot 10^6$	0.9912
ОП 100%	118	$1.01 \cdot 10^8$	0.8487
УГ 50% + К 50%	64	$3.4 \cdot 10^5$	0.9632
К 100%	27	$7 \cdot 10^7$	0.9953

лась ниже (64 кДж/моль), чем у чистого угля (98 кДж/моль), но гораздо выше, чем у исходного картона (27 кДж/моль).

Снижение энергии активации топливных смесей может быть связано с тенденцией связей С–Н и С–О биомассы (во время улетучивания) взаимодействовать с С=С-связями кокса и способствовать их разрушению, тем самым ускоряя окисление угля и уменьшая энергию активации [23, 24].

Предэкспоненциальный множитель зависит от скорости столкновения молекул топлива во время тепловой реакции [25, 26]. Коэффициент частоты, полученный для основной стадии горения топливных смесей, уменьшается по сравнению с чистыми компонентами. Поскольку этот фактор в основном зависит от концентрации реагентов, снижение коэффициента частоты в топливных смесях является логичным из-за более низкой концентрации угля.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный термический анализ бурого угля, опилок, картона и их смесей в потоке воздуха показал, что при совместном сжигании опилок с углем существует положительный синергетический эффект со снижением пиковой температуры на 5%, а при сжигании смеси угля с картоном это значение не превышало 0.7%. С помощью кинетического анализа установлено, что добавление опилок к углю снижает энергию активации горения топлива на 49%; при добавлении картона энергия активации снизилась только на 35%. При совместном горении смесей аддитивного принципа взаимодействия топлив не наблюдается. Добавление опилок к углю увеличивает индекс горения на 60% по сравнению с углем, в смеси бурый уголь и картон увеличение индекса горения составило всего 7%.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института химии и химической технологии СО РАН (проект 0287-2021-0017) с использованием оборудова-

ования Красноярского регионального центра коллективного пользования ФИЦ КНЦ СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Rodrigues A., Gonçalves A.B., Casquilho M., Gomes A.A.* // Biomass & bioenergy. 2020. V. 137. P. 105554.
2. *Sahu S.G., Chakraborty N., Sarkar P.* // Renew. Sust. Energ. Rev. 2014. V. 39. P. 575.
3. *Larina O.M., Sinelshchikov V.A., Sytchev G.A.* // High Temperature. 2020. V. 58 (5). P. 710.
4. *Bhuiyan A.A., Blicblau A.S., Islam A.K.M.S., Naser J.* // J. Energy Inst. 2018. V. 91(1). P. 1.
5. *Ashraf A., Sattar H., Munir S.* // J. Energy Inst. 2022. V. 100. P. 55.
6. *Rago Y.P., Collard F.-X., Görgens J.F., Surroop D., Mohee R.* // Energy. 2022. V. 239. P. 121859.
7. *Boumanchar I., Chhiti Y., M'hamdiAlaoui F.E., Elkhouakhi M., Sahibed-dine A., Bentiss F., Jama C., Bensitel M.* // Waste Manage. 2019. V. 97. P. 10.
8. *Oladejo J., Adegbite S., Gao X., Liu H., Wu T.* // Appl. Energy. 2018. V. 211. P. 334.
9. *Vamvuka D., Loukakou E., Avgoustidis C., Stratakis A., Pavloudakis F., Sfakiotakis S.* // ENERG SOURCE PART A. 2019.
10. *Glushkov D.O., Matiushenko A.I., Nurpeis A.E., Zhurkov A.V.* // Fuel Proces. Technol. 2021. V. 223. P. 106986.
11. *Ahn S., Choi G., Kim D.* // Biomass & bioenergy. 2014. V. 71. P. 144.
12. *Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Chebochakova D.A., Lyakhovskaya O.E., Shlegel N.E., Anufriev I.S., Shadrin E.Y.* // Appl. Therm. Eng. 2018. V. 142. P. 371.
13. *Oladejo J.M., Adegbite S., Pang C.H., Liu H., Parvez A.M., Wu T.* // Appl. Energy. 2017. V. 188. P. 215.
14. *Moon C., Sung Y., Ahn S., Kim T., Choi G., Kim D.* // Exp. Therm. Fluid Sci. 2013. V. 47. P. 232.
15. *Liu H., Gong S., Jia C., Wang Q.* // J. Therm Anal. Calorim. 2017. V. 127. P. 2531.
16. *Ding G., He B., Yao H., Cao Y., Su L., Duan Z.* // J. Therm. Anal. Calorim. 2021. V. 143. P. 619.
17. *Liu Z., Quek A., Kent Hoekman S., Srinivasan M.P., Balasubramanian R.* // Bioresour. Technol. 2013. V. 133. P. 639.
18. *Wang C., Wang F., Yang Q., Liang R.* // Biomass & bioenergy. 2009. V. 33. P. 50.
19. *Bala-Litwiniak A., Zajemska M.* // Renew. Energy. 2020. V. 162. P. 151.
20. *Vhathvarothai N., Ness J., Yu J.* // Int. J. Energy Res. 2014. V. 38 (6). P. 804.
21. *Maryandyshev P.A., Chernov A.A., Popova E.I., Lyubov V.K.* // Solid Fuel Chem. 2016. V. 50 (3). P. 167.
22. *Vamvuka D., Sfakiotakis S.* // Thermochim. Acta. 2011. V. 526 (1-2). P. 192.
23. *Gil M.V., Casal D., Pevida C., Pis J.J., Rubiera F.* // Biores. Technol. 2010. V. 101 (14). P. 5601.
24. *Fetisova O.Y., Kuznetsov P.N., Purevsuren B., Avid B.* // Solid Fuel Chem. 2021. V. 55 (1). P. 1.
25. *Yorulmaz S.Y., Atimtay A.T.* // Fuel Process. Technol. 2009. V. 90. P. 939.
26. *Fetisova O.Y., Mikova N.M., Taran O.P.* // Kinet. Catal. 2020. V. 61 (6). P. 846.