



Научная статья
УДК 662.739
<https://elibrary.ru/xchbhh>
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-310-321>

Актуальность применения твердотопливной смеси на основе бурого угля Большесырского разреза и отходов лесоперерабатывающей промышленности из березы в энергетических установках

А.В. Жуйков^{1✉}, А.И. Матюшенко², С.Г. Степанов³

^{1,2}Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

³АО «СУЭК-Красноярск», г. Красноярск, Россия

Резюме: Цель – определение возможности применения твердотопливной смеси на основе бурого угля Большесырского разреза и отходов лесоперерабатывающей промышленности из березы в энергетических установках с учетом наличия синергетических взаимодействий между компонентами смеси. Для определения основных характеристик процесса горения угля, биомассы и их смесей использовался синхронный термический анализ. Неизотермический нагрев проводился со скоростью 20°С/мин в диапазоне температур 25–800°С в потоке воздуха с расходом 50 мл/мин, масса навески составляла около 6 мг. Для угля и биомассы в соответствии со стандартными методиками были проведены технический анализ и элементный. В работе описаны преимущества и недостатки при переводе энергетических установок, сжигающих твердое ископаемое топливо, на твердотопливную смесь угля и биомассы. Определены основные характеристики горения угля, биомассы и их смесей. Температура, при которой происходит воспламенение коксового остатка угля, составляет 365°С, биомассы – 299°С. Температура, при которой завершается процесс горения угля – 551°С, а биомассы – 464°С. Показано, что горение биомассы проходит в области более низких температур по сравнению с углем за счет высокого содержания летучих веществ. Установлено, что добавление биомассы к углю снижает температуру, при которой происходит воспламенение коксового остатка и завершается процесс горения. При анализе процесса горения летучих веществ и коксового остатка обнаружены как положительные, так и отрицательные синергетические взаимодействия между частицами угля и биомассы, влияющие на максимальную скорость горения и реакционную способность смесей. Полученные результаты можно применять при проектировании энергетических установок, сжигающих твердотопливные смеси на основе угля и биомассы.

Ключевые слова: уголь, биомасса, березовые опилки, термический анализ, нагрев, совместное горение

Для цитирования: Жуйков А.В., Матюшенко А.И., Степанов С.Г. Актуальность применения твердотопливной смеси на основе бурого угля Большесырского разреза и отходов лесоперерабатывающей промышленности из березы в энергетических установках // iPolytech Journal. 2023. Т. 27. № 2. С. 310–321. EDN: XCHBHH, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-310-321>.

POWER ENGINEERING

Original article

Application a solid fuel mixture based on Bolshesyrsky lignite and birch wood waste in power plants

Andrey V. Zhuikov^{1✉}, Anatoly I. Matyushenko², Sergey G. Stepanov³

^{1,2}Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²JSC «SUEK-Krasnoyarsk», Krasnoyarsk, Russia

© Жуйков А.В., Матюшенко А.И., Степанов С.Г., 2023

Abstract. In this paper, we investigate the possibility of using a solid fuel mixture based on lignite from the Bolshesyrsky coal mine and birch wood waste in power plants, taking synergistic interactions between the mixture components into account. Simultaneous thermal analysis was used to determine the main combustion characteristics of lignite, biomass and their mixtures. Non-isothermal heating was performed at a rate of 20°C/min across the temperature range of 25–800°C under the air flow of 50 ml/min. The sample weight was about 6 mg. Proximate and elemental analyses of lignite and biomass samples were performed according to conventional methods. The advantages and disadvantages of converting power plants operated on solid fossil fuels to a solid fuel mixture of lignite and biomass are discussed. The main combustion characteristics of lignite, biomass and their mixtures were defined. The ignition temperature of the coke residue and biomass was found to comprise 365 and 299°C, respectively. The temperature of combustion completion for lignite and biomass was 551 and 464°C, respectively. In comparison with lignite, biomass burns at lower temperatures due to the high content of volatile substances. The addition of biomass to lignite was found to reduce both the ignition temperature of the coke residue and that of combustion completion. An analysis of the combustion process of volatile substances and coke residue established the presence of both positive and negative synergistic interactions between lignite and biomass particles, affecting the maximum combustion rate and the mixture reactivity. The results obtained can be applied when designing power plants operated on solid fuel mixtures of lignite and biomass.

Keywords: coal, biomass, birch sawdust, thermal analysis, heating, co-combustion

For citation: Zhuikov A.V., Matyushenko A.I., Stepanov S.G. Application of a solid fuel mixture based on Bolshesyrsky lignite and birch wood waste in power plants. *iPolytech Journal*. 2023;27(2):310-321. (In Russ.). EDN: XCHBHH, <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2023-2-310-321>.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие промышленности влияет на увеличение потребления тепловой и электрической энергии, выработка которой непосредственно связана с увеличением потребления твердых ископаемых топлив. Большинство объектов теплоэнергетики в качестве проектного топлива используют угли разной степени метаморфизма вследствие их низкой стоимости, апробированных десятилетиями технологий их сжигания, развитыми логистическими сетями поставок. Основным недостатком сжигания твердых ископаемых топлив является повышенное негативное воздействие на окружающую среду и здоровье человека [1, 2]. При горении угля в атмосферу, помимо мелкодисперсных частиц золы, выбрасываются оксиды азота, оксиды серы, оксид углерода, бенз(а)пирен и др. Промышленные отходы в виде золы складироваться на золоотвалах, занимая огромные территории, которые со временем только увеличиваются, а также загрязняют воздух и воду. Одним из ключевых направлений по снижению негативного воздействия на окружающую среду является переход к ресурсосберегающей и экологически безопасной теплоэнергетике.

Снижение потребления угля и улучшение экологических характеристик объектов теплоэнергетики возможно путем частичного вовлечения в топливно-энергетический комплекс лесной биомассы [3–5]. Основным ис-

точником биомассы являются лесозаготовительные, лесоперерабатывающие и деревообрабатывающие предприятия. Биомасса обладает рядом преимуществ по сравнению с твердым ископаемым топливом, которые заключаются в следующем [6–8]:

- низкая себестоимость, т.к. основные затраты связаны только с доставкой и подготовкой ее к сжиганию. В большинстве случаев лесная биомасса является бесплатным топливом, так как хранить ее в виде отходов небезопасно из-за высокой склонности к возгоранию и негативного воздействия на окружающую среду при длительном хранении на открытом воздухе;

- нулевые выбросы диоксида углерода вследствие того, что биомасса в процессе своего роста потребляет из окружающей среды ровно столько CO₂, сколько выделяется при ее сжигании;

- минимальное содержание серы;
- высокая реакционная способность за счет высокого содержания летучих веществ;
- низкая зольность;
- биомасса является возобновляемым источником энергии.

Из недостатков использования биомассы в качестве энергетического топлива можно отметить следующее [9]:

- себестоимость биомассы прямо пропорциональна расстоянию ее доставки до объектов теплоэнергетики;
- низкая теплота сгорания;

– повышенная гидрофильная способность поверхности частиц, влияющая на увеличение влажности при доставке и хранении;

– различная вариативность размеров и форм частиц, влияющая на процесс горения;

– волокнистая структура частиц биомассы негативно сказывается на ее размолоспособности;

– высокая склонность к загрязнению поверхностей нагрева энергетических установок и к агломерации слоя (при слоевом сжигании), обусловленная высоким содержанием щелочных и щелочно-земельных элементов в минеральной части, а также содержание хлора и фосфора [6];

– содержание хлора влияет на интенсификацию коррозии поверхностей нагрева [6];

– высокая склонность к самовоспламенению.

Перевод объектов теплоэнергетики на сжигание биомассы в чистом виде связан с рядом трудностей, обусловленных необходимостью существенной реконструкции энергетических установок, предназначенных для сжигания угля, а также отсутствием необходимых запасов биомассы для снабжения всех объектов теплоэнергетики, тем более таких крупных как ТЭЦ, ГРЭС и др., на которые проектное топливо доставляется железнодорожным транспортом в больших объемах. Учитывая все недостатки, связанные со сжиганием биомассы в энергетических установках, был реализован перспективный способ ее частичного сжигания в смеси с углем. Данный способ был успешно реализован на объектах теплоэнергетики разной мощности, как в России, так и за рубежом [10, 11]. Частичное добавление биомассы к углю имеет следующие преимущества [12, 13]:

1) снижение общей зольности смеси, влияющее на снижение выбросов мелкодисперсных минеральных веществ в окружающую среду и скорость заполнения золоотвалов;

2) снижение потребления твердого ископаемого топлива;

3) снижение выбросов газообразных вредных продуктов сгорания и CO₂;

4) повышение реакционной способности смеси за счет увеличения содержания лету-

чих веществ;

5) минимальная реконструкция теплоэнергетического оборудования, в основном связанная с хранением, смешением, топливоподачей и топливоподготовкой;

6) в случае отсутствия поставок биомассы быстрый возврат к сжиганию только проектного топлива;

7) утилизация органических отходов лесозаготовительной и лесоперерабатывающей промышленности.

В настоящее время особый научный интерес направлен на исследование синергетического взаимодействия между компонентами твердотопливной смеси, оказывающего влияние на характеристики их совместного горения [14, 15]. Для исследования склонности компонентов смеси к синергетическим эффектам, влияющим на характеристики горения, лучше всего применим синхронный термический анализ, проводимый в окислительной среде [16].

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Оценить возможность применения твердотопливной смеси в энергетических установках на основе бурого угля Большесырского разреза и отходов лесоперерабатывающей промышленности из березы с учетом присутствия синергетических взаимодействий между компонентами смеси, влияющих на реакционную способность топлив, а также определить наиболее энергоэффективную пропорцию компонентов в смеси.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве объектов исследования выбраны следующие топлива:

1. Большесырский бурый уголь марки ЗБ Канско-Ачинского угольного бассейна (далее – уголь). Данный уголь относится к углям низкой степени метаморфизма, но обладает отличительными свойствами по сравнению с другими бурыми углями данного угольного бассейна – низкой зольностью и высокой теплотой сгорания. Многие угольные котельные Красноярского края и других регионов используют этот уголь как основное энергетическое топливо при производстве тепловой энергии.

2. Биомасса в виде березовых опилок (далее – биомасса) – это распространенная разновидность отходов лесоперерабатывающей промышленности, например, на производстве столовых приборов для Восточной Азии, представляющих собой пару тонких березовых палочек.

Для удобства обозначения твердотопливных смесей применялись следующие сокращения: уголь – ЗБ, биомасса – БО. Для обозначения индивидуальных топлив и массовых концентраций компонентов в топливных смесях на их основе приняты следующие маркировки: ЗБ – 100%; ЗБ 75% + БО 25%; ЗБ 50% + БО 50%; ЗБ 25% + БО 75% и БО 100%.

Уголь и биомассу с начальным размером менее 10 мм по отдельности измельчали в дисковой мельнице Retsch DM 200 (Retsch GmbH, Germany). Для получения нужного гранулометрического состава 100–200 мкм использовалась аналитическая просеивающая машина Retsch AS 200 BASIC (Retsch GmbH, Germany), что соответствует размерам пылеугольного топлива, используемого при факельном сжигании в энергетических

котлах [17]. Теплоту сгорания топливных образцов определяли в калориметре ИКА С6000. Анализатор Vario MACRO cube (Elementar, Германия) использовался для определения углерода, водорода и азота. Содержание серы определялось по ГОСТ 8606-2015⁴, кислород рассчитывался по разности согласно ГОСТ Р 27313-2015⁵. Аналитическая влага после достижения топливом воздушно-сухого состояния определялась по ГОСТ Р 33503-2015⁶; зольность – по ГОСТ Р 55661-2013⁷; выход летучих компонентов – по ГОСТ Р 55660-2013⁸; теплота сгорания – по ГОСТ Р 147-2013⁹. Результаты технического и элементного анализа угля и биомассы приведены в табл. 1. В табл. 1 влажность (W^a , %) представлена в аналитическом состоянии; зольность (A^d , %) в сухом состоянии; содержание летучих веществ (V^{daf} , %) в сухом беззольном состоянии; содержание углерода (C^{daf} , %), водорода (H^{daf} , %), азота (N^{daf} , %), серы (S^{daf} , %) и кислорода (O^{daf} , %) представлены в сухом беззольном состоянии; низшая теплота сгорания (Q_{if} , МДж/кг) – в рабочем состоянии.



Рис. 1. Топлива: а – Большесырский бурый уголь; б – опилки березы
Fig. 1. Fuels: a – Bolshesyrsky lignite coal; b – birch sawdust

⁴ГОСТ 8606-2015. Топливо твердое минеральное. Определение общей серы. Метод Эшка. Введ. 01.04.2017. М.: Стандартинформ, 2019.

⁵ГОСТ Р 27313-2015. Топливо твердое минеральное. Обозначение показателей качества и формулы пересчета результатов анализа на различные состояния топлива. Введ. 12.11.2015. М.: Стандартинформ, 2016.

⁶ГОСТ Р 33503-2015. Топливо твердое минеральное. Методы определения влаги в аналитической пробе. Введ. 12.11.2015. М.: Стандартинформ, 2016.

⁷ГОСТ Р 55661-2013. Топливо твердое минеральное. Определение зольности. Введ. 28.10.2013. М.: Стандартинформ, 2014.

⁸ГОСТ Р 55660-2013. Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ. 28.10.2013. М.: Стандартинформ, 2014.

⁹ГОСТ Р 147-2013. Топливо твердое минеральное. Определение высшей теплоты сгорания и расчет низшей теплоты сгорания. 5.11.2013. М.: Стандартинформ, 2019.

Таблица 1. Технические характеристики и элементный состав образцов
Table 1. Specifications and elemental composition of samples

Топлива	W ^a , %	A ^d , %	V ^{daf} , %	Элементный состав					Q _r ^r
				C ^{daf}	H ^{daf}	N ^{daf}	S ^{daf}	O ^{daf}	
%									МДж/кг
Уголь	4,8	6,5	44,6	74,1	5,0	0,9	0,3	19,7	20,5
Биомасса	4,3	0,3	81,1	51,2	5,8	–	–	43,0	16,5

Термический анализ проводился с применением синхронного термоанализатора SDT Q600 (USA). Кривые термогравиметрии (ТГ), дифференциальной термогравиметрии (ДТГ) и дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК) получали в диапазоне температур 25–800 °С при нагреве навески топлива массой 6,0±0,25 мг в потоке воздуха с расходом 50 мл/мин и при скорости нагрева 20 °С/мин. Для обработки полученных термограмм применялась программа Universal Analysis 2000 (USA).

По кривым ТГ, ДТГ и ДСК определяли основные характеристики горения, такие как температура, при которой происходит воспламенение коксового остатка ($T_{вспл}$, °С); температура, при которой заканчивается горение топлива ($T_{вг}$, °С); максимальная скорость убыли массы или максимальная скорость горения ($ДТГ_{max}$, %/мин) и температура, соответствующая ей ($T_{ДТГ}$, °С); максимальная интенсивность теплового потока ($ДСК_{max}$, мВт/мг) и температура, соответствующая ей ($T_{ДСК}$, °С). $T_{вспл}$ и $T_{вг}$ определяли по методу пересечения кривых, визуализация которой была опубликована в нашей предыдущей работе [18].

Наличие синергетических эффектов между углем и биомассой, влияющих на основные характеристики горения смеси, определяли по известной методике [19, 20] путем сравнения на термограммах ДТГ профилей кривых, построенных по расчетным и экспериментальным значениям. Расчетные значения профилей кривых ДТГ получали по выражению:

$$ДТГ_{расч} = (\alpha_1 ДТГ_1) + (\alpha_2 ДТГ_2), \quad (1)$$

где α_1 и α_2 – массовые доли биомассы и угля в смеси, $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$; $ДТГ_1$ и $ДТГ_2$ – значения изменения массы для биомассы и угля (%/мин), соответственно.

Максимальная скорость горения ($ДТГ_{max}$) прямо пропорционально характеризует реакционную способность топлива, а температура $T_{ДТГ}$ характеризует реакционную способность топлива обратно пропорционально [20].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Процесс нагрева угля, биомассы и их смесей в диапазоне температур 25–800 °С представлен на рис. 2 кривыми ТГ, ДТГ и ДСК. Весь процесс нагрева топлив разделен на четыре условных стадии, обозначенных на рис. 2 цифрами I–IV. Температурный диапазон 25–100 °С стадии I для топлив и их смесей одинаков и характеризует испарение адсорбированной влаги. Данная стадия из-за низкой влажности топлив (см. табл. 1) сопровождается небольшими изменениями кривых ТГ, ДТГ и ДСК, связанных с убылью массы (рис. 2 а), увеличением скорости убыли массы (рис. 2 б) и небольшим эндотермическим эффектом за счет поглощения тепла при испарении влаги (рис. 2 с). При нагреве топлива после стадии I начинается стадия II, в которой никаких процессов не происходит, об этом свидетельствует почти горизонтальные кривые ТГ и ДТГ для всех исследуемых топлив.

Стадия III соответствует началу термического разложения топлив, в которой происходит отщепление от углеродной матрицы низкомолекулярных соединений в виде газообразных веществ. При дальнейшем нагреве газообразные вещества воспламеняются и горят на поверхности топливных частиц. Для данной стадии нагрева характерны изменения кривых ТГ, ДТГ и ДСК (см. рис. 2). При выделении летучих веществ начинается убыль массы навески, а также происходит увеличение скорости убыли массы. Горение

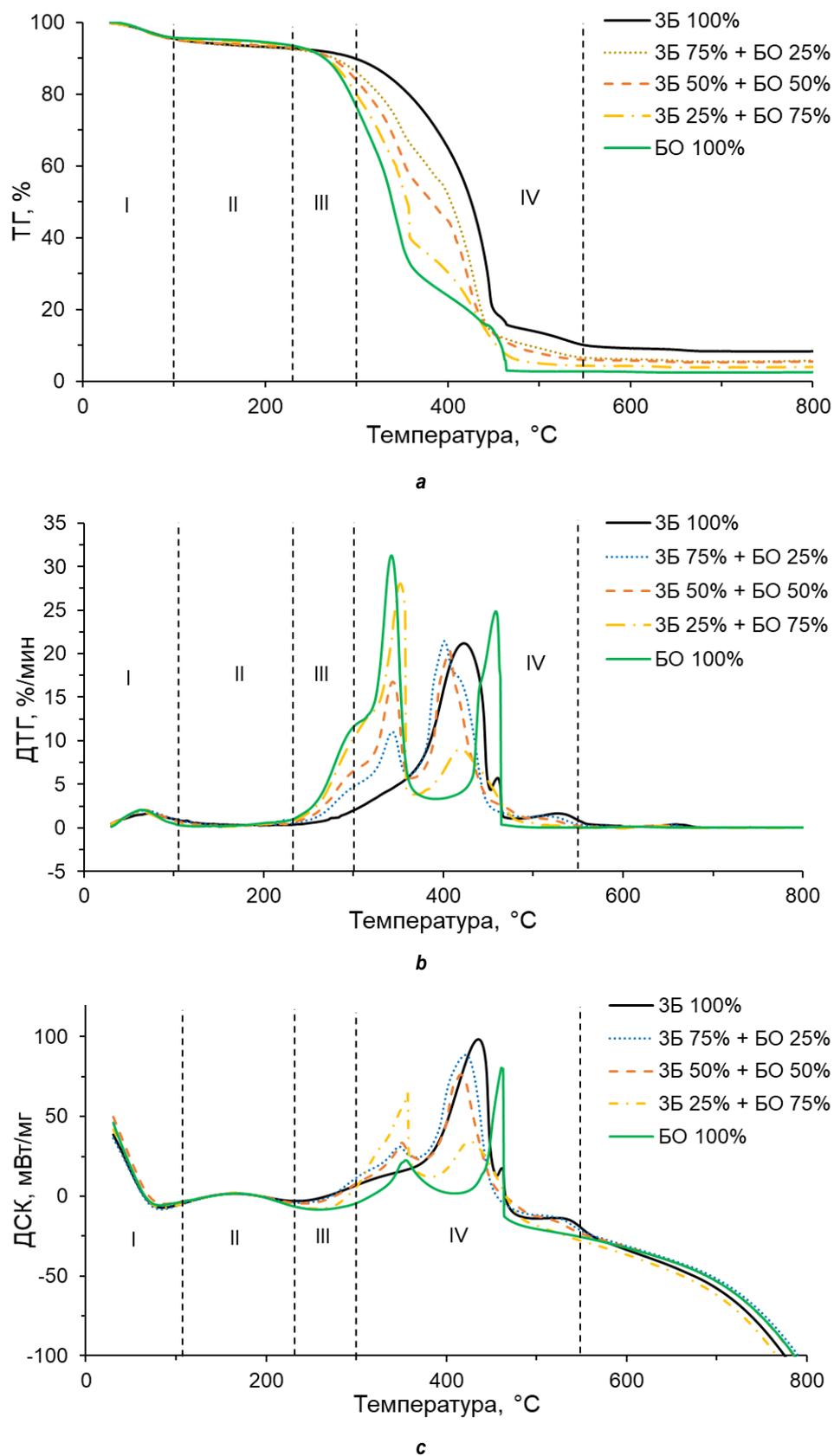


Рис. 2. Профили кривых нагрева угля, биомассы и их смесей (I-IV – условные стадии нагрева):
а – кривые термогравиметрии; б – кривые дифференциальной термогравиметрии; с – кривые
дифференциальной сканирующей калориметрии

Fig. 2. Heating curve profiles of coal, biomass and their mixtures (I-IV – conditional heating stages):
a – thermogravimetry curves; b – differential thermogravimetry curves; c – differential scanning calorimetry curves

Таблица 2. Диапазон температур основных стадий нагрева топлив
Table 2. Temperature range of the main stages of fuel heating

Топлива	Диапазон температур, °С			
	Стадия I	Стадия II	Стадия III	Стадия IV
ЗБ – 100%	25–120	120–300	300–365	365–551
ЗБ 75% + БО 25%	25–118	118–256	256–309	309–537
ЗБ 50% + БО 50%	25–112	112–250	250–307	307–532
ЗБ 25% + БО 75%	25–110	110–241	241–304	304–480
БО – 100%	25–105	105–233	233–299	299–464

летучих веществ сопровождается началом увеличения интенсивности теплового потока (см. рис. 2 с). Температурные диапазоны всех стадий нагрева представлены в табл. 2.

Далее рассмотрим для каждого топлива и смеси стадию IV, так как это основная стадия нагрева, сопровождающаяся воспламенением и горением коксового остатка, а также догоранием летучих веществ. Температурные диапазоны всех стадий имеют различные значения для всех топлив вследствие отличающихся теплотехнических характеристик и элементного состава угля, биомассы и их смесей. Характеристики процесса горения топлив представлены в табл. 3. Основная убыль массы навески для всех топлив происходит на четвертой стадии нагрева при сгорании коксового остатка и летучих веществ (рис. 2 а).

Температура, при которой происходит воспламенение коксового остатка угля, составляет 365°С и имеет самое высокое значение среди исследуемых топлив вследствие низкого содержания летучих веществ (см. табл. 1). При неизотермическом нагреве содержание летучих веществ имеет ключевое значение и пропорционально температуре, при которой происходит воспламенение коксового остатка, а при изотермическом нагреве высокое содержание летучих веществ может оказать обратный эффект. Стадия IV для

угля представлена на кривых ДТГ и ДСК одним выраженным пиком с широкими температурными диапазонами (рис. 2 b и 2 с). Максимальная скорость горения коксового остатка угля составила 21,2 %/мин и сопровождалась экзотермическим эффектом с максимальной интенсивностью теплового потока 98,3 мВт/мг. Температура, при которой заканчивается горение угля, составила 551°С.

Стадия IV при нагреве биомассы представлена на кривых ДТГ и ДСК двумя пиками с короткими температурными интервалами. В первом пике происходит горение летучих веществ и части коксового остатка, во втором пике происходит горение коксового остатка и догорание летучих веществ. Температура, при которой воспламеняется коксовый остаток биомассы, на 66°С ниже, чем у угля (см. табл. 3). Максимальная скорость горения достигается при окислении летучих веществ – 31,3%/мин при температуре 342°С и сопровождается экзотермическим эффектом с максимальной интенсивностью теплового потока 22,7 мВт/мг. Горение коксового остатка карбонизации лигнина согласно DTG_{max} составило 24,9%/мин при температуре 458°С (рис. 2 b и 2 с), при этом максимальная интенсивность теплового потока достигла 82,1 мВт/мг. При горении целлюлозы, гемицеллюлозы и части лигнина в виде летучих веществ тепла выделяется меньше, чем при

Таблица 3. Характеристики горения угля, биомассы и их смесей
Table 3. Combustion characteristics of coal, biomass and their mixtures

Топлива	$T_{вспл}, °C$	$T_{вр}, °C$	$DTG_{max}, \%/мин$	$T_{дтг}, °C$	$ДСК_{max}, мВт/мг$	$T_{дск}, °C$
ЗБ – 100%	365	551	21,2	422	98,3	436
ЗБ 75% + БО 25%	309	537	21,5	401	88,5	421
ЗБ 50% + БО 50%	307	532	20,3	407	76,1	417
ЗБ 25% + БО 75%	304	480	28,0	352	64,2	357
БО – 100%	299	464	31,3	342	82,1	463

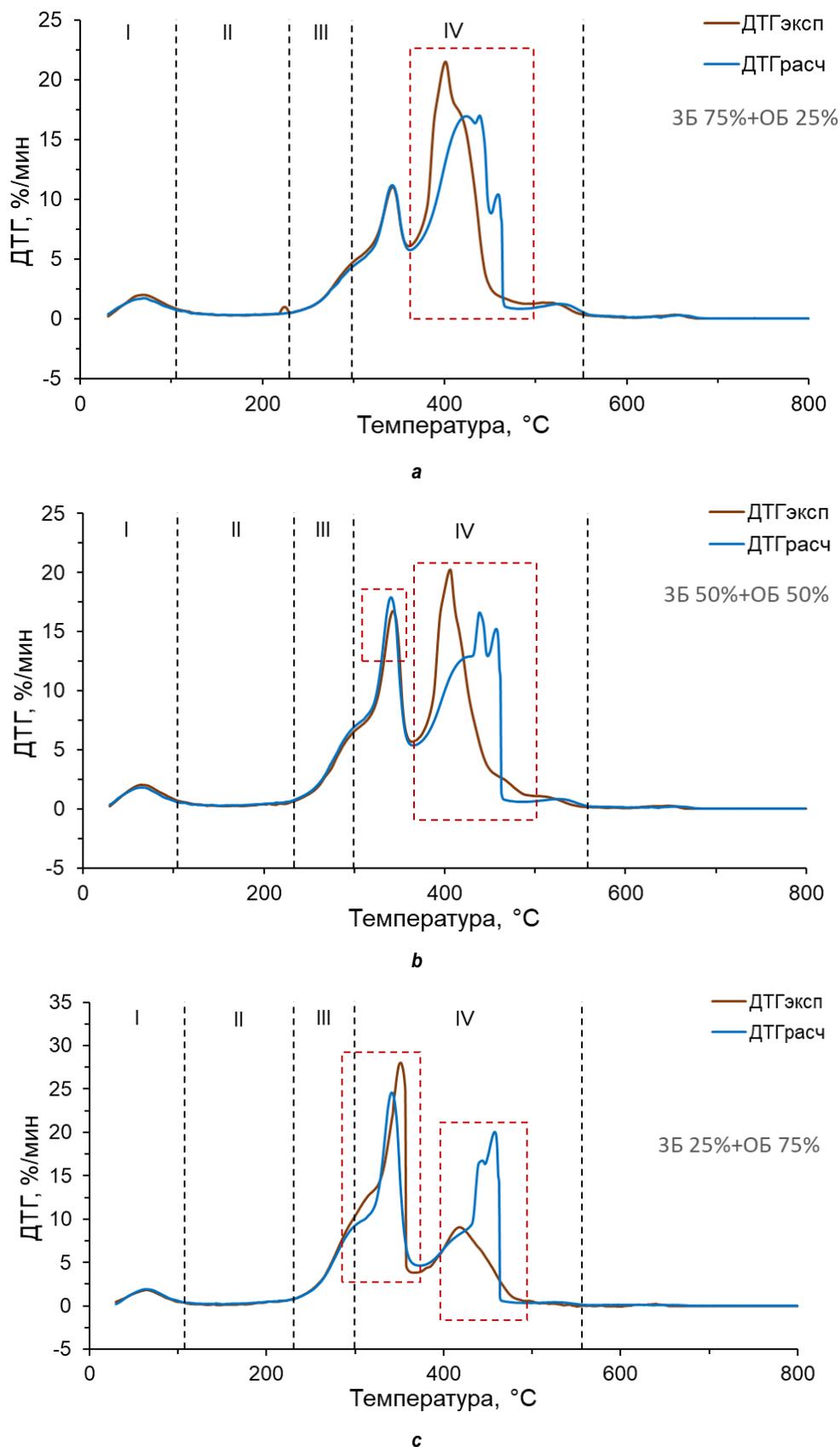


Рис. 3. Профили кривых дифференциальной термогравиметрии нагрева топливных смесей (I–IV – условные стадии нагрева): а – смесь ЗБ 75% + БО 25%; б – смесь ЗБ 50% + БО 50%; в – смесь ЗБ 25% + БО 75%
Fig. 3. Profiles of differential thermogravimetry curves for heating fuel mixtures (I–IV – conditional stages of heating): а – ЗБ 75% + БО 25% mixture; б – ЗБ 50% + БО 50% mixture; в – ЗБ 25% + БО 75% mixture

горении коксового остатка, но при этом скорость горения летучих веществ выше на 6%/мин. В целом теплотехнические характеристики опилок из березы имеют высокие значения, что доказывает правильность их выбора в качестве добавочного топлива к бурому углю.

Добавление 25% биомассы к углю влияет в первую очередь на снижение температуры, при которой происходит воспламенение коксового остатка, уменьшая ее на 56°C по сравнению с углем и увеличивает максимальную скорость горения коксового остатка на 0,3%/мин. Максимальная интенсивность теплового потока снижается на 9,8 мВт/мг. Температура, соответствующая завершению горения смеси по сравнению с углем, снижается на 4°C (см. табл. 3).

Увеличение массового содержания биомассы в смеси до 50 % влечет снижение температуры, при которой создаются условия для воспламенения коксового остатка по сравнению с углем на 54°C, но при этом происходит снижение максимальной скорости горения на 0,9%/мин. Максимальная интенсивность теплового потока снижается на 22,2 мВт/мг, а температура, при которой завершается процесс горения, смещается в область более низких температур на 19°C.

При добавлении 75% биомассы происходит увеличение пика ДТГ при температуре 352°C, характеризующее сгорание летучих веществ. Максимальная скорость горения при этом составила 28%/мин при экзотермическом эффекте с максимальной интенсивностью теплового потока 64,2 мВт/мг (см. рис. 2 б и 2 с). Максимальная скорость горения второго пика ДТГ, соответствующего горению коксового остатка угля и биомассы, снизилась до 9%/мин при температуре 418°C с максимальной интенсивностью теплового потока 34,3 мВт/мг. Температура, при которой происходит воспламенение коксового остатка, составила 304°C, а температура, при которой завершается горение – 464°C (см. табл. 3).

При сжигании смеси на основе двух разных по химическому составу топлив возможны синергетические взаимодействия, выра-

жающиеся в изменении характеристик горения. Далее рассмотрим каждую топливную смесь на предмет аддитивного и синергетического взаимодействия компонентов. На рис. 3 представлено сравнение профилей кривых ДТГ, полученных экспериментальным путем (ДТГ_{эксп}) и расчетным методом по формуле 1 (ДТГ_{расч}). Стадии I–III у всех трех смесей подчиняются принципам аддитивности, об этом свидетельствует схожесть профилей кривых, построенных по экспериментальным и расчетным значениям. Анализируя стадию IV, в которой происходит горение летучих веществ и коксового остатка, можно отметить расхождение профилей кривых ДТГ (рис. 3).

При добавлении 50% биомассы к углю на стадии нагрева IV наблюдается отрицательное синергетическое взаимодействие компонентов смеси при горении летучих веществ, снижающее максимальную скорость горения на 1%/мин. Этот эффект объясняется тем, что угольные частицы, находящиеся среди частиц биомассы, препятствуют интенсивному выделению летучих веществ. Это подтверждает и увеличение скорости горения на 4%/мин, которое обусловлено догоранием оставшихся летучих веществ, создающим благоприятные температурные условия для смещения горения коксового остатка смеси в область более низких температур по сравнению с расчетными значениями (рис. 3 б).

При добавлении 75% биомассы к углю происходит положительное синергетическое взаимодействие компонентов смеси – увеличение максимальной скорости горения на 3%/мин в диапазоне температур 250–380°C. В данном температурном интервале происходит горение летучих веществ и большей части коксового остатка, о чем свидетельствует отсутствие высокого пика ДТГ в температурном диапазоне 380–480°C, который получается при расчетных значениях (рис. 3 с).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный термический анализ большесырского угля, опилок березы и их смесей при скорости нагрева 20°C/мин показал, что увеличение массовой доли биомассы в сме-

си не влияет на интенсивное снижение температуры, при которой происходит воспламенение коксового остатка. Данная температура снижается однократно при добавлении 25% биомассы, снижение температуры воспламенения коксового остатка менее интенсивное. Увеличение массовой доли биомассы в смеси влияет на снижение температуры выгорания смесей вследствие того, что температура, при которой завершается процесс горения, у биомассы ниже, чем у угля. Помимо этого, увеличение массовой доли биомассы в смеси оказывает влияние на снижение интенсивности теплового потока, что связано со снижением теплоты сгорания смеси при увеличении массовой доли биомассы, так как теплота сгорания биомассы меньше на 4 Мдж/кг по сравнению с углем. Благоприятное синергетическое взаимодействие между компонентами смеси выражается в увеличении максимальной скорости горения и в улучше-

нии реакционных свойств смесей. В смеси на основе 75% угля и 25% биомассы благоприятное синергетическое взаимодействие наблюдается только при горении коксового остатка, в остальных случаях взаимодействие подчиняется принципам аддитивности. При добавлении 50% биомассы положительное синергетическое взаимодействие между компонентами смеси наблюдается только при горении коксового остатка, при горении же летучих веществ наблюдается отрицательное синергетическое взаимодействие. Добавление 75% биомассы усиливает синергетическое взаимодействие компонентов только при горении летучих веществ.

С точки зрения практического применения твердотопливных смесей в энергетических установках наилучшими характеристиками горения обладает смесь на основе 75% угля и 25% биомассы.

Список источников

1. Zhou Zhiyong, Lu Jianyi, Feng Qian, Liu Wenting. Review on occurrence, speciation, transition and fate of sulfur in typical ultra-low emission coal-fired power plants // *Journal of the Energy Institute*. 2022. Vol. 100. P. 259–276. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.12.004>.
2. Zhuikov A.V., Matyushenko A.I., Panfilov V.I. Nastevich O.E. Experience of using synthetic gas as the main fuel in an industrial heating boiler house // *Power Technology and Engineering*. 2021. Vol. 55. Iss. 1. P. 92–95. <https://doi.org/10.1007/s10749-021-01325-z>.
3. Merzic A., Turkovic N., Ikanovic N., Lapandic E., Kazagic A., Music M. Towards just transition of coal regions - Cultivation of short rotation coppice and dedicated energy crops for biomass co-firing vs photo voltaic power plants // *Energy Conversion and Management*: X. 2022. Vol. 15. P. 100267. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100267>.
4. Xiao Zhongzheng, Wang Shuzhong, Luo Ming, Cai Jianjun. Combustion characteristics and synergistic effects during co-combustion of lignite and lignocellulosic components under oxy-fuel condition // *Fuel*. 2022. Vol. 310. Part. B. P. 122399. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122399>.
5. Armakan S., Civan M., Yurdakul S. Determining co-combustion characteristics, kinetics and synergy behaviors of raw and torrefied forms of two distinct types of biomass and their blends with lignite // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022. Vol. 147. Iss. 22. P. 12855–12869. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11432-2>.
6. Рябов Г.А. Совместное сжигание биомассы и ископаемых топлив – путь к декарбонизации производства тепла и электроэнергии (Обзор) // *Теплоэнергетика*. 2022. № 6. С. 17–32. <https://doi.org/10.1134/S0040363622060054>.
7. Rahman A., Farrok O., Haque M.M. Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022. Vol. 161. P. 112279. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112279>.
8. Saidur R., Abdelaziz E.A., Demirbas A., Hossain M.S., Mekhilef S. A review on biomass as a fuel for boilers // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011. Vol. 15. Iss. 5. p. 2262–2289. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>.
9. Unchaisri T., Fukuda S. Investigation of ash formation and deposit characteristics in CFB co-combustion of coal with various biomass fuels // *Journal of the Energy Institute*. 2022. Vol. 105. P. 42–52. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2022.08.005>.
10. Сосин Д.В., Литун Д.С., Рыжий И.А., Штегман А.В., Шапошников Н.А. Опыт сжигания лузги подсолнечника в пылеугольных котлах Кумертауской ТЭЦ // *Теплоэнергетика*. 2020. № 1. С. 15–22. <https://doi.org/10.1134/S0040363619120099>.
11. Melikoglu M. Vision 2023: status quo and future of biomass and coal for sustainable energy generation in Turkey // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 74. P. 800–808. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.005>.
12. Ashraf A., Sattar H., Munir S. A comparative performance evaluation of co-combustion of coal and biomass in drop tube furnace // *Journal of the Energy Institute*. 2022. Vol. 100. P. 55–65. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.10.008>.
13. Allguren T., Andersson K., Fry A., Eddings E.G. NO formation during co-combustion of coal with two thermally treated biomasses // *Fuel Processing Technology*. 2022. Vol. 235. P. 107365. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107365>.
14. Wang Shusen, Zou Chun, Lou Chun, Yang Haiping, Pu Yang, Luo Jianghui, et al. Influence of the synergistic effects

between coal and hemicellulose/cellulose/lignin on the co-combustion of coal and lignocellulosic biomass // *Fuel*. 2022. Vol. 311. P. 122585. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122585>.

15. Cong Kunlin, Han Feng, Zhang Yanguo, Li Qinghai. The investigation of co-combustion characteristics of tobacco stalk and low rank coal using a macro-TGA // *Fuel*. 2019. Vol. 237. P. 126–132. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.149>.

16. Guo Feihong, He Yi, Hassanpour Ali, Gardy Jabbar, Zhong Zhaoping. Thermogravimetric analysis on the co-combustion of biomass pellets with lignite and bituminous coal // *Energy*. 2020. Vol. 197. P. 117147. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117147>.

17. Glushkov D.O., Matiushenko A.I., Nurpeiis A.E., Zhuikov A.V. An experimental investigation into the fuel oil-free start-up of a coal-fired boiler by the main solid fossil fuel with additives of brown coal, biomass and charcoal for ignition enhancement // *Fuel Processing Technology*. 2021. Vol. 223. P. 106986. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106986>.

18. Жуйков А.В., Логинов Д.А., Монгуш Г.Р., Чичерин С.В., Землянский Н.А. Термогравиметрический анализ горения каменных углей Республики Тыва до и после их карбонизации // *iPolytech Journal*. 2022. Т. 26. № 2. С. 270–283. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-270-2835>.

19. Larina O.M., Sinelshchikov V.A., Sytchev G.A. Thermogravimetric analysis of fuel blends of biomass and high-ash coal-containing Waste // *High Temperature*. 2020. Vol. 58. Iss. 5. P. 710–715. <https://doi.org/10.1134/S0018151X20050041>.

20. Chen Lichun, Wen Chang, Wang Wenyu, Liu Tianyu, Liu Enze, Liu Haowen, et al. Combustion behaviour of biochars thermally pretreated via torrefaction, slow pyrolysis, or hydrothermal carbonisation and co-fired with pulverised coal // *Renewable Energy*. 2020. Vol. 161. P. 867–877. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.148>.

References

1. Zhou Zhiyong, Lu Jianyi, Feng Qian, Liu Wenting. Review on occurrence, speciation, transition and fate of sulfur in typical ultra-low emission coal-fired power plants. *Journal of the Energy Institute*. 2022;100:259-276. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.12.004>.

2. Zhuikov A.V., Matyushenko A.I., Panfilov V.I. Nastevich O.E. Experience of using synthetic gas as the main fuel in an industrial heating boiler house. *Power Technology and Engineering*. 2021;55(1):92-95. <https://doi.org/10.1007/s10749-021-01325-z>.

3. Merzic A., Turkovic N., Ikanovic N., Lapandic E., Kazagic A., Music M. Towards just transition of coal regions – cultivation of short rotation crops and dedicated energy crops for biomass co-firing vs photo voltaic power plants. *Energy Conversion and Management: X*. 2022;15:100267. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100267>.

4. Xiao Zhongzheng, Wang Shuzhong, Luo Ming, Cai Jianjun. Combustion characteristics and synergistic effects during co-combustion of lignite and lignocellulosic components under oxy-fuel condition. *Fuel*. 2022;310(B):122399. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122399>.

5. Armakan S., Civan M., Yurdakul S. Determining co-combustion characteristics, kinetics and synergy behaviors of raw and torrefied forms of two distinct types of biomass and their blends with lignite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022;147(22):12855-12869. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11432-2>.

6. Ryabov G.A. Cofiring of coal and fossil fuels is a way to decarbonization of heat and electricity generation (review). *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2022;6:17-32. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0040363622060054>.

7. Rahman A., Farrok O., Haque M.M. Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022;161:112279. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112279>.

8. Saidur R., Abdelaziz E.A., Demirbas A., Hossain M.S., Mekhilef S. A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011;15(5):2262-2289. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.02.015>.

9. Unchaisri T., Fukuda S. Investigation of ash formation and deposit characteristics in CFB co-combustion of coal with various biomass fuels. *Journal of the Energy Institute*. 2022;105:42-52. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2022.08.005>.

10. Sosin D.V., Litun D.S., Ryzhii I.A., Shtegman A.V., Shaposhnikov N.A. Experience of burning sunflower husks in the Kumertau CHP pulverized coal-fired boilers. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2020;1:15-22. (In Russ.). <https://doi.org/10.1134/S0040363619120099>.

11. Melikoglu M. Vision 2023: status quo and future of biomass and coal for sustainable energy generation in Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017;74:800-808. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.005>.

12. Ashraf A., Sattar H., Munir S. A comparative performance evaluation of co-combustion of coal and biomass in drop tube furnace. *Journal of the Energy Institute*. 2022;100:55-65. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2021.10.008>.

13. Allguren T., Andersson K., Fry A., Eddings E.G. NO formation during co-combustion of coal with two thermally treated biomasses. *Fuel Processing Technology*. 2022;235:107365. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2022.107365>.

14. Wang Shusen, Zou Chun, Lou Chun, Yang Haiping, Pu Yang, Luo Jianghui, et al. Influence of the synergistic effects between coal and hemicellulose/cellulose/lignin on the co-combustion of coal and lignocellulosic biomass. *Fuel*. 2022;311:122585. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122585>.

15. Cong Kunlin, Han Feng, Zhang Yanguo, Li Qinghai. The investigation of co-combustion characteristics of tobacco stalk and low rank coal using a macro-TGA. *Fuel*. 2019;237:126-132. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.09.149>.

16. Guo Feihong, He Yi, Hassanpour Ali, Gardy Jabbar, Zhong Zhaoping. Thermogravimetric analysis on the co-combustion of biomass pellets with lignite and bituminous coal. *Energy*. 2020;197:117147. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117147>.

17. Glushkov D.O., Matiushenko A.I., Nurpeiis A.E., Zhuikov A.V. An experimental investigation into the fuel oil-free start-

up of a coal-fired boiler by the main solid fossil fuel with additives of brown coal, biomass and charcoal for ignition enhancement. *Fuel Processing Technology*. 2021;223:106986. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106986>.

18. Zhuikov A.V., Loginov D.A., Mongush G.R., Chicherin S.V., Zemlyansky N.A. Thermogravimetric analysis of the combustion of Tuva coals before and after their carbonization. *iPolytech Journal*. 2022;26(2):270-283. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-270-283>.

19. Larina O.M., Sinelshchikov V.A., Sytchev G.A. Thermogravimetric analysis of fuel blends of biomass and high-ash coal-containing waste. *High Temperature*. 2020;58(5):710-715. <https://doi.org/10.1134/S0018151X20050041>.

20. Chen Lichun, Wen Chang, Wang Wenyu, Liu Tianyu, Liu Enze, Liu Haowen, et al. Combustion behaviour of biochars thermally pretreated via torrefaction, slow pyrolysis, or hydrothermal carbonisation and co-fired with pulverised coal. *Renewable Energy*. 2020;161:867-877. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.148>.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Жуйков Андрей Владимирович,

к.т.н.,
заведующий лабораторией
кафедры теплотехники и гидрогазодинамики,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия
✉ azhuikov@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9809-8285>

Матюшенко Анатолий Иванович,

д.т.н., доцент,
заведующий кафедрой инженерных систем зданий
и сооружений,
Сибирский федеральный университет,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79, Россия
amatyushenko@sfu-kras.ru

Степанов Сергей Григорьевич,

д.т.н.,
начальник управления инновационных
технологий переработки угля
АО «СУЭК-Красноярск»,
660049, Красноярск, ул. Ленина 35/2, Россия
stepanovsg@suek.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 20.02.2023; одобрена после рецензирования 27.03.2023; принята к публикации 25.04.2023.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrey V. Zhuikov,

Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Laboratory of
the Department of Heat Engineering and Fluid Gas
Dynamics,
Siberian Federal University,
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia
✉ azhuikov@sfu-kras.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9809-8285>

Anatoly I. Matyushenko,

Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,
Head of the Department of Engineering
Systems of Buildings and Structures,
Siberian Federal University,
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia
amatyushenko@sfu-kras.ru

Sergey G. Stepanov,

Dr. Sci. (Eng.),
Head of the Department of Innovative Technologies of
Coal Processing,
JSC «SUEK-Krasnoyarsk»,
35/2, Lenin St., Krasnoyarsk 660049, Russia
stepanovsg@suek.ru

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Information about the article

The article was submitted 20.02.2023; approved after reviewing 27.03.2023; accepted for publication 25.04.2023.