



Научная статья

УДК 662.739

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2022-2-270-283>

Термогравиметрический анализ горения каменных углей Республики Тыва до и после их карбонизации

Андрей Владимирович Жуйков^{1✉}, Дмитрий Александрович Логинов²,
Григорий Романович Монгуш³, Станислав Викторович Чичерин⁴,
Николай Алексеевич Землянский⁵

^{1,5} Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

² Сибирский научно-исследовательский институт углеобогащения, г. Красноярск, Россия

³ ФГБУН Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов, г. Кызыл, Россия

⁴ Омский государственный университет путей сообщения, г. Омск, Россия

¹ azhuikov@sfu-kras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9809-8285>

² 2901496@gmail.com

³ mongush983@mail.ru

⁴ man_csv@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9359-9678>

⁵ nikzemln@mail.ru

Резюме. Целью данной работы является определение основных характеристик горения каменных углей Республики Тыва до и после их карбонизации. При решении поставленных задач применялся термогравиметрический метод и метод электронной микроскопии. Для объектов исследования был проведен теплотехнический и элементный анализ. Теплотехнический и элементный анализ показал, что содержание летучих в Каа-Хемском угле достаточно высокое – 47,5%, а в исследуемом Чаданском ниже на 10%; после карбонизации произошло снижение летучих до 11,5% и 9,3%, соответственно. По результатам термогравиметрического анализа установлено следующее: температура воспламенения коксового остатка после карбонизации у Каа-Хемского угля увеличилась на 76°C, у Чаданского угля – на 90°C; температура выгорания коксового остатка после карбонизации (723°C) у Каа-Хемского угля практически не изменилась, у Чаданского угля температура выгорания увеличилась с 704°C до 727°C. Определено, что карбонизация углей повлияла на снижение максимальной скорости реакции: у Каа-Хемского угля данный показатель снизился с 19%/мин до 10%/мин, у Чаданского – с 26%/мин до 11%/мин. Установлено, что процесс горения коксового остатка после карбонизации углей сдвинулся в область более высоких температур: с интервала температур 448–723°C сместился до 524–724°C (для Каа-Хемского угля), с 436–704°C до 526–727°C (для Чаданского угля). Проведенный морфологический анализ поверхностей угольных частиц до и после карбонизации показал, что на поверхности карбонизатов появились поры и трещины более крупного размера по сравнению с углем до карбонизации. Таким образом, термогравиметрическим методом анализа установлено, что основной параметр, влияющий на улучшение основных характеристик горения в условиях неизотермического нагрева изученных углей Республики Тыва до и после их карбонизации, является содержание летучих веществ, а не развитая пористая структура частиц.

Ключевые слова: уголь, карбонизат, степень метаморфизма, термогравиметрический анализ, горение, воспламенение

Финансирование: Исследование выполнено при финансовой поддержке Правительства Красноярского края, Красноярского краевого фонда поддержки научной и научно-технической деятельности (проект № 2022031008477).

Для цитирования: 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/10.21285/1814-3520-2022-2-270-283>.

Thermogravimetric analysis of the combustion of Tuva coals before and after their carbonization

Andrei V. Zhuikov^{1✉}, Dmitry A. Loginov², Grigory R. Mongush³,
Stanislav V. Chicherin⁴, Nikolai A. Zemlyansky⁵

^{1,5}Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

²Siberian Research Institute of Coal Concentration, Krasnoyarsk, Russia

³Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Kyzyl, Russia

⁴Omsk State Transport University, Omsk, Russia

¹azhuikov@sfu-kras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9809-8285>

²2901496@gmail.com

³mongush983@mail.ru

⁴man_csv@hotmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9359-9678>

⁵nikzemln@mail.ru

Abstract. The process of combusting Tuva coals before and after their carbonization was studied using the methods of thermogravimetric analysis and electron microscopy. Coal samples were subjected to thermomechanical and elemental analysis, which revealed a higher content of volatile substances in Kaa-Khem coal (47.5%) compared to Chadana coal (10%). Following carbonization, a decrease in volatile substances to 11.5% and 9.3%, respectively, was observed. The conducted thermogravimetric analysis showed the ignition temperature of the coke residue of the Kaa-Khem and Chadana coal samples to increase by 76°C and 90°C, respectively, after carbonization. The burnup temperature of the coke residue after carbonizing (723°C) Kaa-Khem coal samples remained effectively the same, while the Chadana coal showed an increase from 704°C to 727°C. The carbonization of coals was established to decrease the maximum reaction rate from 19% per min to 10% per min for Kaa-Khem coal and from 26% per min to 11% per min for Chadana coal. The process of combusting the coke residue after coal carbonization was found to shift into the region of higher temperatures: from 448–723°C to 524–724°C for Kaa-Khem coal and from 436–704°C to 526–727°C for Chadana coal. A morphological analysis of the surface of coal particles after carbonization showed the appearance of larger-size pores and cracks on the surface of carbonates compared to coal before carbonization. The conclusion is made that the content of volatile substances, rather than the developed pore structure, comprises the main factor in improving the combustion characteristics of Tuva coals under the conditions of non-isothermal heating before and after their carbonization.

Keywords: coal, carbonize, metamorphism degree, thermal gravimetric analysis, combustion, ignition

Funding: The study was funded by the Government of the Krasnoyarsk Territory, the Krasnoyarsk Regional Fund for Support of Scientific and Scientific and Technological Activities (Project No. 2022031008477).

For citation: 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>.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из крупных угольных месторождений Республики Тыва является Улуг-Хемский угольный бассейн, общая площадь которого охватывает несколько кожуунов: Кызылский, Тандинский, Чеди-Хольский и Пий-Хемский. Улуг-Хемский угольный бассейн включает в себя несколько месторождений: Каа-Хемское, Межегейское, Эзрбекское, Элегестское, Чихачевское и Юго-Восточную угленосную площадь. В ходе исследования запасы и

ресурсы угля, как всего Улуг-Хемского угольного бассейна в целом, так и отдельных его частей, неоднократно оценивались различными исследователями с использованием различных методов и принципов расчета. Месторождение Каа-Хемское расположено на территории Кызыл-кожууна. С 1976 г. на месторождении Каа-Хемское ведется добыча угля открытым способом в объеме 500–600 тыс. т в год. История освоения месторождения Каа-Хем, включая его начальные этапы,

неотделима от истории освоения Улуг-Хемского бассейна в целом [1, 2].

Чаданская угленосная площадь расположена на территории кожууна Дзун-Хемчикский с административным центром Чадан. Это месторождение включает в себя Чаданское и Чангыс-Хадынское месторождения. Рядом с угленосным районом проходит дорога А-162 Кызыл-Ак-Довурак с твердым асфальтовым покрытием. Юрские породы в этом районе были впервые отмечены М. В. Заниным в 1946 г. В 1964 г. Чаданский угольный разрез был введен в эксплуатацию угледобывающими предприятиями местной промышленности. По промышленной классификации и степени метаморфизма каменные угли Чаданского пласта находятся на границе между газообразными и жирными и применяются при производстве тепловой энергии [1, 2].

Обладая большим потенциалом запасов высококачественного угля, республика не получила достаточного развития угольной промышленности, основной проблемой которой является отсутствие железной дороги и высокая стоимость транспортировки крупнотоннажных грузов за пределы республики автомобильным транспортом. Основными потребителями угля с Каа-Хемского месторождения являются Кызыльская ТЭЦ, котельные и частные дома города Кызыл, а также бюджетные предприятия и частные дома кожуунов в Восточной части республики, а уголь с Чаданского месторождения снабжает социальные объекты в Западной части региона [2].

Согласно «Программе развития угольной промышленности России на период до 2035 года», утвержденной Распоряжением Правительства Российской Федерации от 13 июня 2020 г. № 1582-р⁶, предполагается дальнейшее освоение Каа-Хемского и Чаданского угольных месторождений Республики Тыва и продолжением строительства железнодорожной линии Элегест–Кызыл–Курагино, начатой в 2018 г.

Совершенствование развития угольной промышленности подразумевает поиск новых способов переработки ископаемого топ-

лива с целью получения высокопотенциальных продуктов [3, 4]. Одним из способов получения высокорекреационного топлива из угля является его газификация. Газификация – это процесс, представляющий собой термохимическую деструкцию топлива при температурах от 800 до 1200°C при подводе окислителя в виде воздуха, пара или кислорода в чистом виде [5]. На качество получаемого продукта (высокая механическая прочность, повышенная теплота сгорания, низкое водопоглощение, высокая реакционная способность, повышенное удельное электросопротивление) при газификации угля также влияет давление внутри реактора и время нагрева. Высокое давление внутри реактора позволяет получать карбонизированный уголь при более высокой скорости нагрева, что снижает время производства продукта газификации [6]. Продуктом частичной газификации является карбонизированный уголь, который используется в большей мере как углеродный восстановитель в металлургической промышленности и других производствах, требующих высококалорийного топлива. В теплоэнергетике карбонизированный уголь как основное энергетическое топливо не используется из-за экономической нецелесообразности, так как его производство достаточно затратное. В теплоэнергетике используется генераторный газ с низкой теплотой сгорания, который получается как второстепенный продукт процесса газификации угля. Генераторный газ сжигается в котлах-утилизаторах для подогрева сетевой воды [7]. При производстве тепловой и электрической энергии на теплоэлектростанциях в ряде случаев целесообразно использовать карбонизированный уголь как добавочное топливо с целью увеличения теплоты сгорания твердотопливной смеси, тем самым снижая общий расход топлива на ТЭЦ [8].

Одним из самых распространенных методов исследования процесса горения топлив является синхронный термический анализ [9–12]. Сущность данного метода заключается в изменении массы топлива при его мед-

⁶Распоряжение Правительства Российской Федерации № 1582-р. от 13.06.2020. Электронный ресурс. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202006180009> (15.06.2021).

ленном нагреве. Данный метод позволяет определять основные параметры горения топлива. Шаовэй Чжан и др. исследовали [13] характеристики воспламенения и выгорания полукокса, получаемого из бурого угля, при помощи синхронного термического анализа, и установили, что полукокс является низко-реакционным топливом, имеющим более высокую температуру воспламенения по сравнению с бурым углем. Использование полукокса как индивидуального топлива для производства тепловой и электрической энергии на ТЭЦ связано с некоторыми сложностями при его сжигании [14, 15] из-за низкого содержания летучих. Поэтому авторами предложено использовать полукокс, полученный из каменных углей, как добавочное топливо, сжигаемое вместе с каменными углями.

Анализ литературных источников показал, что на сегодняшний день существует необходимость в проведении дополнительных исследований горения карбонизированных углей с целью расширения теоретических знаний и получения дополнительных экспериментальных данных. Полученные результаты можно будет применять при проектировании теплотехнических устройств, работающих на новых видах топлива.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектами исследований в данной работе стали следующие:

1. Каа-Хемский каменный уголь, Каа-Хемский угольный разрез (КХ_{уголь}), Республика Тыва (рис. 1 а);

2. Чаданский каменный уголь, Чаданский угольный разрез (ЧД_{уголь}), Республика Тыва (рис. 1 б);

3. Карбонизат из Каа-Хемского угля, Красноярский край (КХ_{кокс}) (рис. 1 с);

4. Карбонизат из Чаданского угля, Красноярский край (ЧД_{кокс}) (рис. 1 д).

Карбонизат был получен путем нагрева

угля в закрытой реторте до температуры 600°C с последующим охлаждением без доступа воздуха во избежание окисления. Частичная газификация этих углей в известных процессах является затруднительной ввиду эффекта размягчения и последующего спекания, характерного для углей марки ГЖ (газовый-жирный). Поэтому разработка высокопроизводительного процесса карбонизации этих углей является предметом отдельных исследований.

Характеристики углей и карбонизатов изучены после достижения ими состояния аналитической пробы, влажность которой доведена до состояния равновесия с влажностью воздуха в лабораторном помещении. Образцы углей с начальным размером менее 10 мм по отдельности измельчали в дисковой мельнице Retsch DM 200 (Retsch GmbH, Germany). Для подготовки экспериментальных образцов использовалась аналитическая просеивающая машина Retsch AS 200 BASIC (Retsch GmbH, Germany) с двумя ситами, размер ячеек которых составлял 53 и 200 мкм. Таким образом, получались образцы углей с размерами частиц 53–200 мкм, что соответствует размерам пылеугольного топлива, используемого при факельном сжигании в энергетических котлах. Теплоту сгорания топливных образцов определяли в калориметре IKA C6000. Элементный состав топлива определяли в анализаторе Vario MACRO cube (Elementar, Германия). Влажность определялась по ГОСТ 8.649-2015⁷, зольность – по ГОСТ 55661-2013⁸, выход летучих веществ – по ГОСТ R 55660-2013, содержание серы – по ГОСТ 32979-2014⁹, высшая теплота сгорания – по ГОСТ 147-2013¹⁰, содержание углерода, водорода, азота – по ГОСТ 32979-2014⁹, серы – по ГОСТ 8606-2015, содержание кислорода – по ГОСТ 27313-2015¹¹.

⁷ГОСТ 8.649-2015. Угли бурые, каменные и антрацит. Инфракрасный термогравиметрический метод определения общей влаги. Введ. 01.01.2017. М.: Изд-во «Стандартинформ», 2019.

⁸ГОСТ 55661-2013. Топливо твердое минеральное. Определение зольности. Введ. 01.01.2015. М.: Изд-во «Стандартинформ», 2019.

*a**b**c**d*

Рис. 1. Виды топлива: а – Каа-Хемский каменный уголь; б – Чаданский каменный уголь; с – карбонизат из Каа-Хемского угля; d – карбонизат из Чаданского угля
Fig. 1. Types of fuel: a – Kaa-Khemska coal; b – Chadansky coal; c – Kaa-Khemska coal carbonizate; d – Chadansky coal carbonizate

⁹ГОСТ 32979-2014. Топливо твердое минеральное. Инструментальный метод определения углерода, водорода и азота. Введ. 01.04.2016. М.: Изд-во «Стандартинформ», 2019.

¹⁰ГОСТ R 55660-2013. Топливо твердое минеральное. Определение выхода летучих веществ. Введ. 01.01.2015. М.: АО «Кодекс», 2015.

¹¹ГОСТ 27313-2015. Топливо твердое минеральное. Обозначение показателей качества и формулы пересчета результатов анализа на различные состояния топлива. Введ. 01.04.2017. М.: Изд-во «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} , %	C^{daf} , %	H^{daf} , %	N^{daf} , %	S^{daf} , %	O^{daf} , %	Q_i^r , МДж/кг
КХ _{уголь}	1,3	6,8	47,5	82,0	5,8	1,5	0,3	10,4	29,5
ЧД _{уголь}	0,6	5,1	37,5	85,7	5,6	1,3	0,3	7,1	30,8
КХ _{кокс}	0,7	16,2	11,5	93,3	1,6	1,2	0,4	3,5	27,6
ЧД _{кокс}	0,42	12,7	9,3	97,5	0,8	0,9	0,3	0,5	29,4

Примечание: W^a – содержание влаги в аналитическом состоянии; A^d – содержание золы в сухом состоянии; V^{daf} – содержание летучих веществ в сухом-беззольном состоянии. Элементный состав в сухом беззольном состоянии (daf): C – содержание углерода; H – содержание водорода; N – содержание азота; S – содержание общей серы; O – содержание кислорода; Q_i^r – низшая теплота сгорания в рабочем состоянии.

Термический анализ образцов проводился с применением синхронного термоанализатора SDT Q600. Термогравиметрический (ТГ) и дифференциально-термогравиметрический анализы (ДТГ), а также дифференциальную сканирующую калориметрию (ДСК) снимали для навесок топлив массой $6,0 \pm 0,25$ 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 Universal Analysis 2000 (США).

Морфологический анализ проводили на сканирующем электронном микроскопе ТМ4000 (Япония), оборудованном энергодисперсионным спектрометром и системой рентгеновского микроанализа Quantax150 (Германия) в режиме низкого вакуума (без напыления платины).

По кривым ТГ и ДТГ определяются основные параметры горения, такие как максимальная температура ($T_{\max}$) основного пика ДТГ, при которой достигаются максимальная скорость реакции ($DTG_{\max}$), температура воспламенения ($T_{\text{воспл}}$) и выгорания ($T_{\text{вг}}$) коксового остатка [17–21]. $T_{\text{воспл}}$ и $T_{\text{вг}}$ определяются известным методом [8, 16] основанным на пересечении кривых, визуализация которого представлена на рис. 2. Данный метод заключается в следующем: из $T_{\max}$ опускается перпендикуляр до кривой ТГ до пересечения в точке А, из точки А проводится прямая по наклонной кривой ТГ вверх, до пересечения с прямой проходящей через точку В в верхней части кривой ТГ до пересечения этих прямых в точке С. Затем из точки С опускается перпендикуляр до температурной шкалы, определяя тем самым температуру, соответствующую

ующую $T_{\text{воспл}}$ (см. рис. 2). Температура выгорания коксового остатка определяется по такому же методу, только $T_{\max}$ принимается за значение последнего пика ДТГ. Принято, что $T_{\max}$ обратно пропорционально реакционной способности топлива.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 3 и 4 показан процесс горения углей и полученного из них карбонизата. Нагрев топлива начинался с 25°C и продолжался до 800°C со скоростью нагрева $20^\circ\text{C}/\text{мин}$.

Профили кривых ТГ за счет низкого содержания влаги у КХ_{уголь} и КХ_{кокс} демонстрируют длительное снижение в интервале температур $25\text{--}300^\circ\text{C}$. После 300°C у КХ_{уголь} происходит воспламенение и горение летучих веществ в интервале температур $320\text{--}440^\circ\text{C}$, выраженное интенсивной убылью массы (рис. 3 а), увеличением скорости реакции (рис. 3 б) и тепловыделением с максимальной интенсивностью теплового потока 32 мВт/мг (рис. 3 с). Выход летучих веществ Каа-Хемского угля достаточно высок – $47,5\%$ (табл. 1). Горение летучих на поверхности угольной частицы прогревает ее за счет теплообмена и инициирует воспламенение и горение коксового остатка до температуры его полного выгорания около 723°C . Основная стадия горения Каа-Хемского угля представлена тремя пиками ДТГ. Первый (основной) пик ДТГ (см. рис. 3 б) с максимальной скоростью реакции $19\%/ \text{мин}$ и температуре 473°C (табл. 2) соответствует горению летучих веществ и части коксового остатка. Второй пик ДТГ (см. рис. 3 б) с максимальной скоростью реакции $12\%/ \text{мин}$ и температуре 545°C отображает горение коксового остатка, при этом

максимальная интенсивность теплового потока составила 65 мВт/мг (см. рис. 3 с). Третий пик ДТГ (рис. 3 б) с максимальной скоростью изменения массы 1,2%/мин при температуре 700°C отображает догорание особо плотного углеродного остатка.

Температура воспламенения $KX_{\text{кокс}}$ на 76°C выше, чем у $KX_{\text{уголь}}$, за счет низкого содержания летучих. Температуры выгорания обоих топлив почти одинаковы. При горении $KX_{\text{кокс}}$ кривые ДТГ отображают два основных пика. Первый (основной) пик ДТГ (см. рис. 3 б) с максимальной скоростью реакции 10%/мин при температуре 610°C отображает горение коксового остатка с максимальной интенсивностью теплового потока 52 мВт/мг. Второй пик ДТГ (см. рис. 3 б) – с максимальной скоростью реакции 3%/мин при температуре 700°C отображает догорание особо плотного углеродного остатка, тепловыделение при этом почти не происходит (рис. 3 с). Теплота сгорания Каа-Хемского угля выше, чем у полученного из него карбонизата. Снижение теплоты сгорания происходит за счет удаления высококалорийных летучих, содержащих водород (см. табл. 1), в процессе термохимической деструкции. Процесс горения по сравнению с исходным Каа-Хемским уг-

лем стал иметь затяжной характер с увеличением диапазона температур, при котором протекает горение коксового остатка (см. рис. 3 б), со снижением значения максимальной скорости изменения массы в основном пике на 90% (табл. 2).

Процесс горения Чаданского угля и полученного из него карбонизата представлен на рис. 4. Из-за низкого содержания влаги в ЧД_{уголь} кривая ТГ в температурном интервале 25–380°C имеет почти горизонтальный вид. При дальнейшем нагреве ЧД_{уголь} начинается его термическое разложение с выходом летучих веществ, процесс сопровождается интенсивной убылью массы (см. рис. 4 а). Воспламенение и горение летучих веществ увеличивает скорость реакции (рис. 4 б). Увеличение температуры угольной частицы за счет горения на ее поверхности летучих веществ приводит к воспламенению коксового остатка при температуре 436°C. Процесс горения ЧД_{уголь} характеризуется тремя пиками ДТГ (см. рис. 4 б). Первый пик ДТГ находится в интервале температур 465–480°C с максимальной скоростью реакции 10%/мин. В этом температурном интервале происходит горение летучих веществ и части коксового остатка, сопровождающееся незначительным

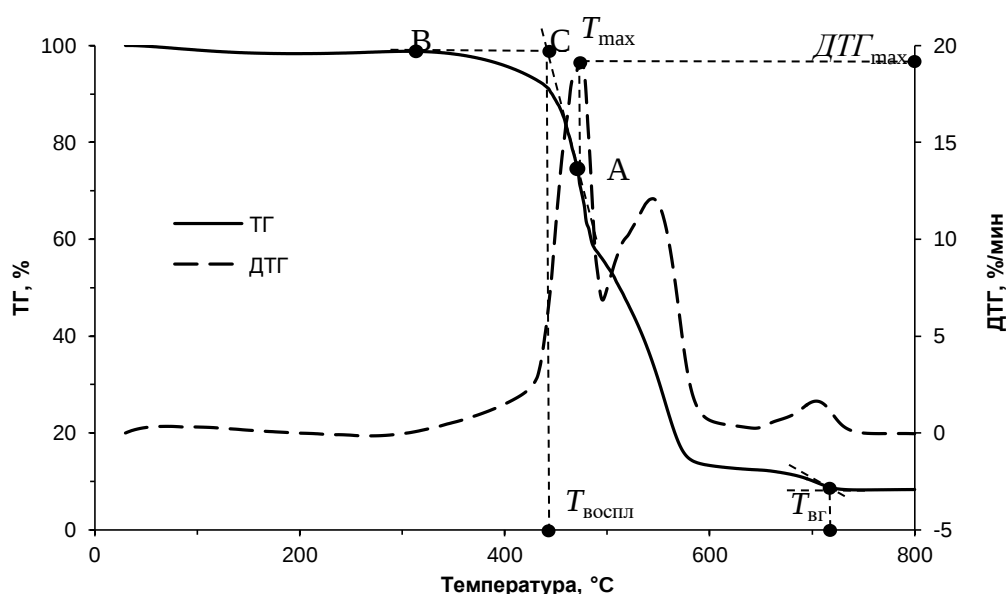


Рис. 2. Определение температуры воспламенения и выгорания
Fig. 2. Determination of ignition and burnup temperatures

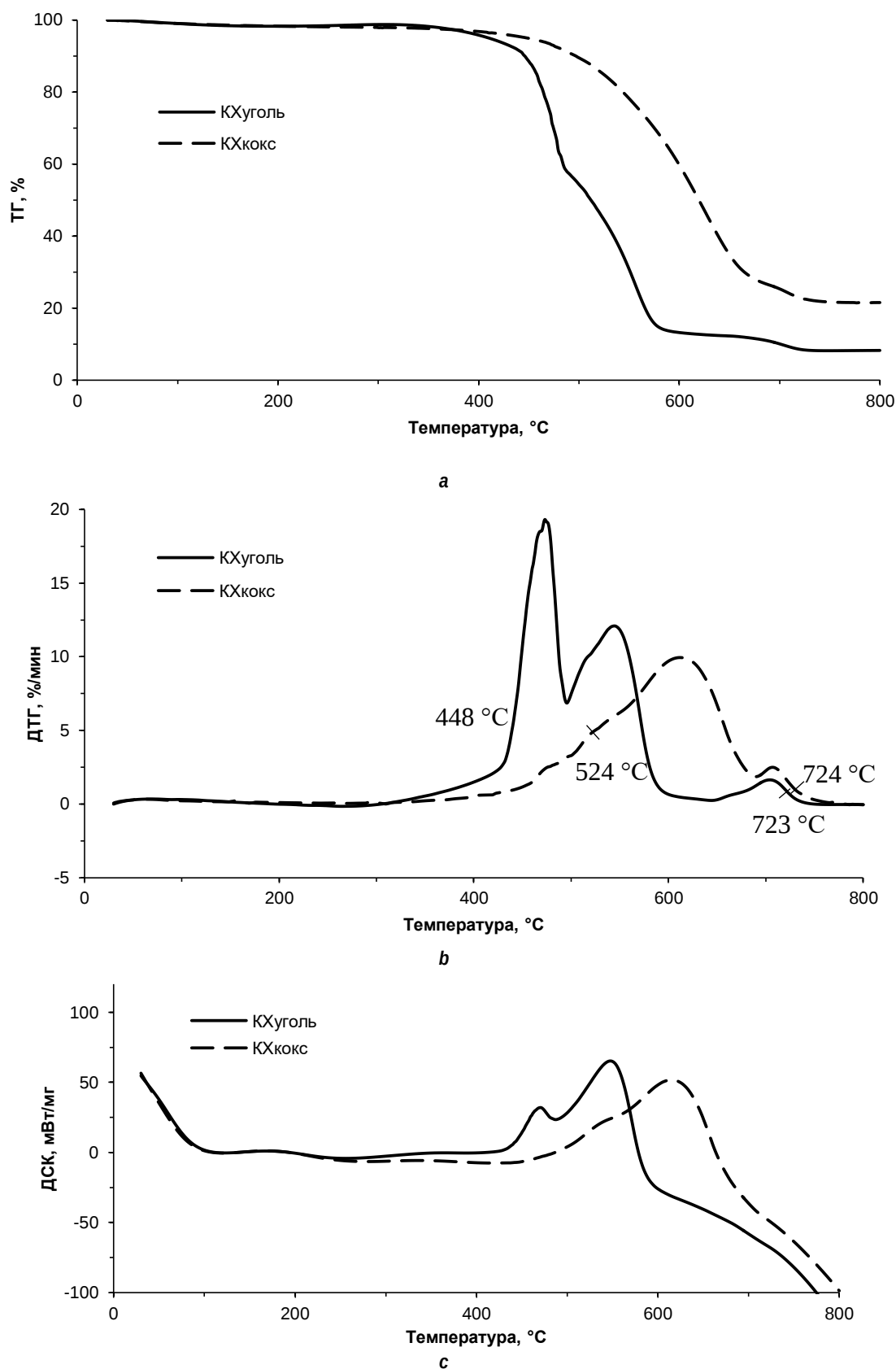


Рис. 3. Горение Каа-Хемского угля и карбонизата: а – термогравиметрический анализ; б – дифференциально-термогравиметрический анализ; с – дифференциальная сканирующая калориметрия
Fig. 3. Combustion of Kaa-Khemskey coal and carbonizate: a – thermal gravimetric analysis; b – differential thermal gravimetric analysis; c – differential scanning calorimetry

Таблица 2. Характеристики горения топливных образцов
Table 2. Combustion characteristics of fuel samples

Топлива	$T_{\text{воспл}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{max}}, ^\circ\text{C}$	$T_{\text{вг}}, ^\circ\text{C}$	$DTG_{\text{max}}, \%/ \text{мин}$
КХ _{уголь}	448	473	723	19
ЧД _{уголь}	436	552	704	26
КХ _{кокс}	524	612	724	10
ЧД _{кокс}	526	591	727	11

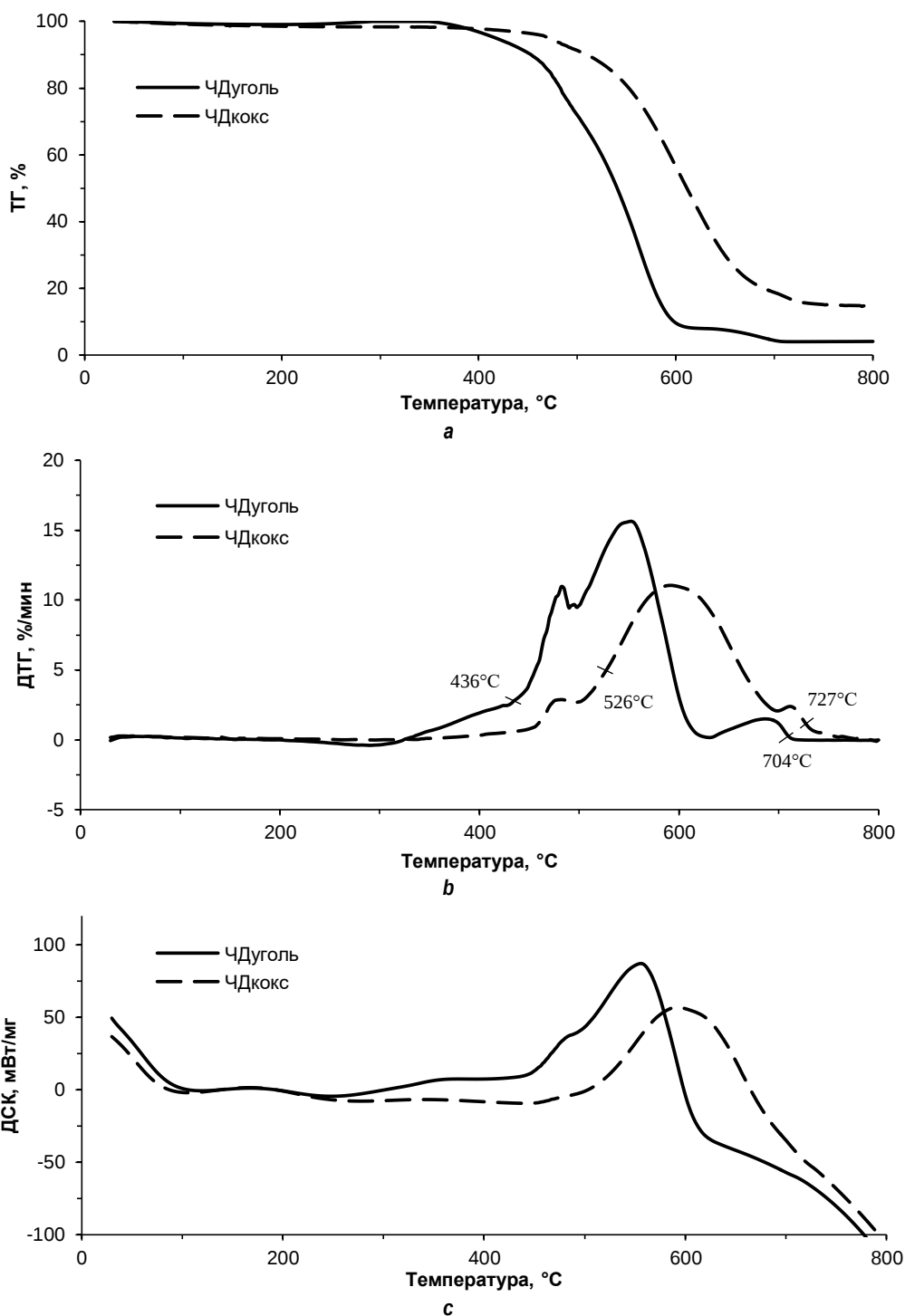


Рис. 4. Горение Чаданского угля и карбонизата: а – термогравиметрический анализ;
b – дифференциально-термогравиметрический анализ; **с** – дифференциальная сканирующая калориметрия
Fig. 4. Combustion of Chadansky coal and carbonizate: a – thermal gravimetric analysis; b – differential thermal gravimetric analysis; c – differential scanning calorimetry

экзотермическим пиком на кривой ДСК (см. рис. 4 с) с максимальной интенсивностью теплового потока 37 мВт/мг. Основной (второй) пик ДТГ (см. рис. 4 б) с максимальной скоростью реакции 26%/мин находится в интервале температур 545–555°C. При этом происходит горение основного коксового остатка, сопровождающееся экзотермическим пиком на кривой ДСК (см. рис. 4 с) с максимальной интенсивностью теплового потока 87 мВт/мг. Третий пик ДТГ (см. рис. 4 б), демонстрирующий догорание особо плотного углеродного остатка, находится в области более высоких температур – 630–720°C, при этом экзотермических пиков на кривой ДСК (см. рис. 4 с) не наблюдается.

Воспламенение и горение коксового остатка карбонизата, полученного из Чаданского угля, происходит в области более высоких температур, чем у Чаданского угля из-за низкого содержания летучих. Температура воспламенения $\text{ЧД}_{\text{кокс}}$ равна 526°C, темпера-

тура выгорания составила 727°C. Убыль массы почти отсутствует в интервале температур 25–400°C (см. рис. 4 а). В процессе горения $\text{ЧД}_{\text{кокс}}$ профиль кривой ДТГ отображает три основных пика (см. рис. 4 б). Первый незначительный пик ДТГ (рис. 4 б) с максимальной скоростью реакции 3%/мин находится в интервале температур 450–490°C и отражает горение малого количества летучих веществ. Основной (второй) пик ДТГ с максимальной скоростью реакции 11%/мин (см. табл. 2) находится в области более высоких температур – 580–595°C, отражая горение коксового остатка (см. рис. 4 б). Третий пик ДТГ с максимальной скоростью реакции 2%/мин находится в области температур 700–715°C, отражая догорание особо плотного углеродного остатка. Процесс горения карбонизата из Чаданского угля, как и у термококса из Каа-Хемского угля, имеет затяжной характер с широким температурным диа-

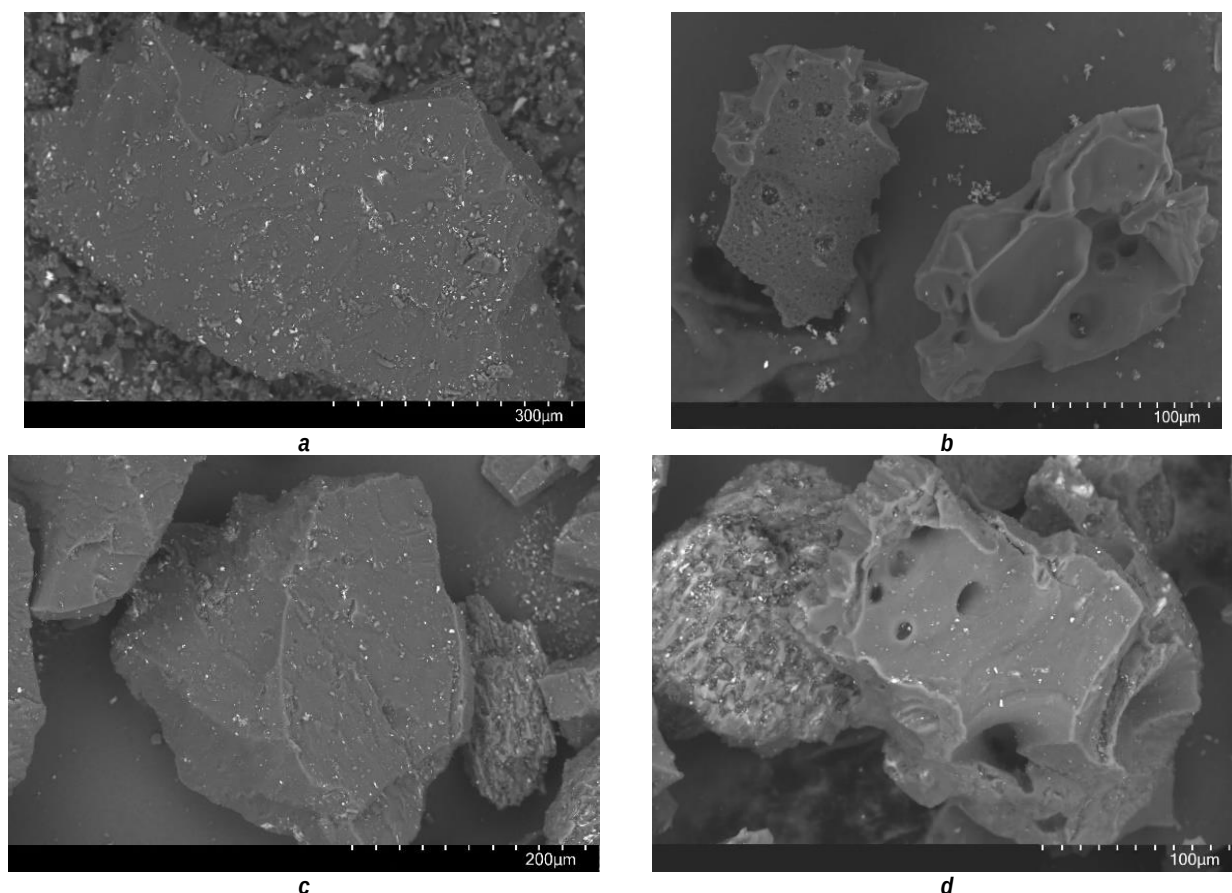


Рис. 5. Изображения сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) угольных частиц: а – Каа-Хемский уголь; б – карбонизат из Каа-Хемского угля; с – Чаданский уголь; d – карбонизат из Чаданского угля

Fig. 5. Scanning electron microscopy (SEM) images of coal particles: a – Kaakhemskiy coal; b – Kaakhemskiy coal carbonizate; c – Chadanskoy coal; d – Chadanskoy coal carbonizate

пазоном (рис. 4 *b*), а DTG_{max} основного пика снизился по сравнению с Чаданским углем на 135%.

На рис. 5 представлены изображения СЭМ, на которых частицы различных видов топлив. На поверхности карбонизатов (рис. 5 *b*, *d*) видны поры крупного диаметра, пронизывающие глубоко внутрь топливную частицу, в отличие от углей до их карбонизации. Угли до карбонизации имеют более гладкую поверхность с порами и трещинами малых размеров (рис. 5 *a* и 5 *c*). Карбонизат имеет развитую пористую структуру, так как в процессе термического воздействия на уголь из него удаляются летучие компоненты, образуются дополнительные трещины и отверстия (рис. 5 *b* и 5 *d*). Поверхность частицы играет важную роль в процессе горения, так как через поры, каналы и трещины кислород может быстрее проникать внутрь частицы и взаимодействовать с углеродом. При неизотермическом нагреве топлива основное влияние на температуру воспламенения оказывает количество летучих компонентов в нем: чем выше количество летучих, тем ниже температура воспламенения топлива. Воспламенение и горение углей, в отличие от карбонизатов, начинается в области более низких температур (см. рис. 3 *b* и 4 *b*).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был проведен термогравиметрический анализ горения каменных углей различных месторождений, расположенных на территории Республики Тыва, до и после их карбонизации.

Установлено, что:

1. Основным параметром, влияющим на температуру воспламенения в условиях неизотермического нагрева, является содержание летучих компонентов в топливах. Пористость топливных частиц играет второстепенное значение.

2. Установлено, что температура воспламенения у карбонизатов увеличилась по сравнению с исходным углем до 20%. Температура выгорания у Каа-Хемского угля до и после его карбонизации не изменилась. Температура выгорания коксового остатка карбонизата, полученного из Чаданского угля, увеличилась на 3% по сравнению с исходным углем.

3. Процесс горения карбонизата имеет затяжной характер с широким температурным диапазоном по сравнению с горением исходных углей. Снижение максимальной скорости ρ в основных пиках ДТГ у карбонизата из Каа-Хемского угля составило 90%, у карбонизата из Чаданского угля – 136%.

Список источников

1. Лебедев Н. И. Угли Тувы: Состояние и перспективы освоения сырьевой базы. Кызыл: Изд-во ТувИКОПР СО РАН, 2007. 180 с.
2. Монгуш Г. Р. Исследование изменения технических показателей и химических свойств (методом ИК-спектрального анализа) угольных смесей тувинских месторождений // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2019. № 12-1. С. 157–162. <https://doi.org/10.17513/mjpf.12973>.
3. Chen Yixin, Lee Soonho, Tahmasebi A., Bai Jin, Vongsivut Jitraporn, Yu Jitraporn. Chemical structure transformation during the later stage of plastic layers during coking using synchrotron infrared microspectroscopy technique // Fuel. 2020. Vol. 273. P. 117764. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117764>.
4. Chen Yixin, Lee Soonho, Tahmasebi A., Liu Mengjie, Zhang Tingting, Bai Jin, et al. Mechanism of carbon structure transformation in plastic layer and semi-coke during coking of Australian metallurgical coals // Fuel. 2022. Vol. 315. P. 123205. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123205>.
5. Filippov S. P., Keiko A. V. Coal gasification: at the crossroad. Technological factors // Thermal Engineering. 2021. Vol. 68. P. 209–220. <https://doi.org/10.1134/S0040601521030046>.
6. Loginov D. A., Chernykh A. P., Islamov S. R. An experimental study of the effect of pressure on the process of brown coal semicoking // Solid Fuel Chemistry. 2021. Vol. 55. Iss. 2. P. 129–132. <https://doi.org/10.3103/S036152192102004X>.
7. 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>.
8. Yang Yu, Lu Xiaofeng, Wang Quanhai. Investigation on the co-combustion of low calorific oil shale and its semi-coke by using thermogravimetric analysis // Energy Conversion and Management. 2017. Vol. 136. P. 99–107. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.006>.
9. Zhang Xiaoyu, Zhu Shujun, Zhu Jianguo, Lyu Qinggang, Wei Kai, Huang Qian, et al. TG-MS study on co-combustion characteristics and coupling mechanism of coal gasification fly ash and coal gangue

by ECSA® // *Fuel*. 2022. Vol. 314. P. 123086. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123086>.

10. Zhang Jinping, Jia Xiaowei, Wang Chang'an, Zhao Nan, Wang Pengqian, Che Defu. Experimental investigation on combustion and NO formation characteristics of semi-coke and bituminous coal blends // *Fuel*. 2019. Vol. 247. P. 87–96. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.045>.

11. Yao Huifeng, He Boshu, Ding Guangchao, Tong Wenxiao, Kuang Yucheng. Thermogravimetric analyses of oxy-fuel co-combustion of semi-coke and bituminous coal // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 156. P. 708–721. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.115>.

12. 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>.

13. Zheng Shaowei, Hu Yingjie, Wang Zhiqiang, Cheng Xingxing. Experimental investigation on ignition and burnout characteristics of semi-coke and bituminous coal blends // *Journal of the Energy Institute*. 2020. Vol. 93. Iss. 4. P. 1373–1381. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.12.007>.

14. Hu Lilin, Zhang Yang, Chen Denggao, Fang Jugang, Zhang Man, Wu Yuxin, et al. Experimental study on the combustion and NO_x emission characteristics of a bituminous coal blended with semi-coke // *Applied Thermal Engineering*. 2019. Vol. 160. P. 113993. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113993>.

15. Zhao Ruidong, Qin Jianguang, Chen Tianju, Wu Jinhu. TG-FTIR study on co-combustion of bituminous coal semicoke and lignite // *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022. Vol. 147. P. 1849–1858. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10405-7>.

16. 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>.

17. Wang Guangwei, Zhang Jianliang, Shao Jiugang, Liu Zhengjian, Zhang Guohua, Xu Tao, et al. Thermal behavior and kinetic analysis of co-combustion of waste biomass/low rank coal blends // *Energy Conversion and Management*. 2016. Vol. 124. P. 414–426. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.045>.

18. Deng Shuanghui, Tan Houzhang, Wei Bo, Wang Xuebin, Yang Fuxin, Xiong Xiaohe. Investigation on combustion performance and ash fusion characteristics of Zhundong coal co-combustion with coal gangue // *Fuel*. 2021. Vol. 294. P. 120555. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120555>.

19. Zhang Kaihua, Zhang Kai, Cao Yan, Pan Wei-ping. Co-combustion characteristics and blending optimization of tobacco stem and high-sulfur bituminous coal based on thermogravimetric and mass spectrometry analyses // *Bioresource Technology*. 2013. Vol. 131. P. 325–332. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.163>.

20. Oladejo J. M., Adegbite S., Pang Cheng Heng, Liu Hao, Parvez A. M., Wu Tao. A novel index for the study of synergistic effects during the co-processing of coal and biomass // *Applied Energy*. 2017. Vol. 188. P. 215–225. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.005>.

21. 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. Lebedev N. I. *Tuvianian Coals*. Kyzyl: Tuvianian Institute for Exploration of Natural Resources of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences; 2007, 180 p. (In Russ.).

2. Mongush G. R. *Study of changes in specifications and chemical properties (using IR spectral analysis) of coal mixtures from Tuva deposits*. *Mezhdunarodnyj zhurnal prikladnyh i fundamental'nyh issledovanij = International Journal of Applied and Basic Research*. 2019;12-1:157-162. (In Russ.). <https://doi.org/10.17513/mjpf.12973>.

3. Chen Yixin, Lee Soonho, Tahmasebi A., Bai Jin, Vongsvivut Jitraporn, Yu Jitraporn. Chemical structure transformation during the later stage of plastic layers during coking using synchrotron infrared microspectroscopy technique. *Fuel*. 2020;273:117764. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117764>.

4. Chen Yixin, Lee Soonho, Tahmasebi Arash, Liu Mengjie, Zhang Tingting, Bai Jin, et al. Mechanism of carbon structure transformation in plastic layer and semi-coke during coking of Australian metallurgical coals. *Fuel*. 2022;315:123205. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.123205>.

5. Filippov S. P., Keiko A. V. Coal gasification: at the

crossroad. Technological factors. *Thermal Engineering*. 2021;68:209-220. <https://doi.org/10.1134/S0040601521030046>.

6. Loginov D. A., Chernykh A. P., Islamov S. R. An experimental study of the effect of pressure on the process of brown coal semicoking. *Solid Fuel Chemistry*. 2021;55(2):129-132. <https://doi.org/10.3103/S036152192102004X>.

7. 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>.

8. Yang Yu, Lu Xiaofeng, Wang Quanhai. Investigation on the co-combustion of low calorific oil shale and its semi-coke by using thermogravimetric analysis. *Energy Conversion and Management*. 2017;136:99-107. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.01.006>.

9. Zhang Xiaoyu, Zhu Shujun, Zhu Jianguo, Lyu Qinggang, Wei Kai, Huang Qian, et al. TG-MS study on co-combustion characteristics and coupling mechanism of coal gasification fly ash and coal gangue by ECSA®. *Fuel*. 2022;314:123086.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.123086>.

10. Zhang Jinping, Jia Xiaowei, Wang Chang'an, Zhao Nan, Wang Pengqian, Che Defu. Experimental investigation on combustion and NO formation characteristics of semi-coke and bituminous coal blends. *Fuel*. 2019;247:87-96.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.03.045>.

11. Yao Huifeng, He Boshu, Ding Guangchao, Tong Wenxiao, Kuang Yucheng. Thermogravimetric analyses of oxy-fuel co-combustion of semi-coke and bituminous coal. *Applied Thermal Engineering*. 2019;156:708-721. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.115>.

12. 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>.

13. Zheng Shaowei, Hu Yingjie, Wang Zhiqiang, Cheng Xingxing. Experimental investigation on ignition and burn-out characteristics of semi-coke and bituminous coal blends. *Journal of the Energy Institute*. 2020;93(4):1373-1381. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2019.12.007>.

14. Hu Lilin, Zhang Yang, Chen Denggao, Fang Jugang, Zhang Man, Wu Yuxin, et al. Experimental study on the combustion and NO_x emission characteristics of a bituminous coal blended with semi-coke. *Applied Thermal Engineering*. 2019;160:113993. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113993>.

15. Zhao Ruidong, Qin Jianguang, Chen Tianju, Wu Jinhui. TG-FTIR study on co-combustion of bituminous coal semicoke and lignite. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2022;147:1849-1858. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10405-7>.

16. 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>.

17. Wang Guangwei, Zhang Jianliang, Shao Jiugang, Liu Zhengjian, Zhang Guohua, Xu Tao, et al. Thermal behavior and kinetic analysis of co-combustion of waste biomass/low rank coal blends. *Energy Conversion and Management*. 2016;124:414-426. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.045>.

18. Deng Shuanghui, Tan Houzhang, Wei Bo, Wang Xuebin, Yang Fuxin, Xiong Xiaohe. Investigation on combustion performance and ash fusion characteristics of Zhundong coal co-combustion with coal gangue. *Fuel*. 2021;294:120555.

<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.120555>.

19. Zhang Kaihua, Zhang Kai, Cao Yan, Pan Wei-ping. Co-combustion characteristics and blending optimization of tobacco stem and high-sulfur bituminous coal based on thermogravimetric and mass spectrometry analyses. *Bioresource Technology*. 2013;131:325-332. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.12.163>.

20. Oladejo J. M., Adegbite S., Pang Cheng Heng, Liu Hao, Parvez A. M., Wu Tao. A novel index for the study of synergistic effects during the co-processing of coal and biomass. *Applied Energy*. 2017;188:215-225. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.12.005>.

21. 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,

кандидат технических наук,
заведующий учебно-научной лабораторией кафедры
теплотехники и гидрогазодинамики,
Сибирский федеральный университет,
660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского 26а,
Россия

Логинов Дмитрий Александрович,

кандидат технических наук,
начальник управления НИОКР,
Сибирский научно-исследовательский институт
углеобогащения,
660060, г. Красноярск, ул. Ады Лебедевой, 64а,
Россия

Монгуш Григорий Романович,

научный сотрудник,
Тувинский институт комплексного освоения
природных ресурсов СО РАН,
667007, Республика Тыва, г. Кызыл,
ул. Интернациональная, 117а, Россия

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Andrei V. Zhuikov,

Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Educational and Scientific Laboratory
of the Department of Heat Engineering and Fluid
Gas Dynamics,
Siberian Federal University,
26a, Academician Kirensky St., Krasnoyarsk 660074,
Russia

Dmitry A. Loginov,

Cand. Sci. (Eng.),
Head of the Research and Development Department,
Siberian Research Institute of Coal Concentration,
64a, Ada Lebedeva St., Krasnoyarsk 660060, Russia

Grigory R. Mongush,

Researcher,
Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources
of the Siberian Branch of the Russian Academy
of Sciences,
117a, Internatsionalnaya St., Kyzyl, Tyva Republic,
667007, Russia

Чичерин Станислав Викторович,
аспирант,
Омский государственный университет путей
сообщений,
644046, г. Омск, пр. Маркса, 35, Россия

Stanislav V. Chicherin,
Postgraduate,
Omsk State Transport University,
35, Marksa St., Omsk 644046, Russia

Землянский Николай Алексеевич,
студент,
Сибирский федеральный университет,
660074, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 26а,
Россия

Nikolai A. Zemlyansky,
Student,
Siberian Federal University,
26a, Academician Kirensky St., Krasnoyarsk 660074,
Russia

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to the preparation of the article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

The authors declare no conflicts of interests.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

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

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 03.02.2022; одобрена после рецензирования 18.04.2022; принята к публикации 01.06.2022.

Information about the article

The article was submitted 03.02.2022; approved after reviewing 18.04.2022; accepted for publication 01.06.2022.