

УДК 662.6/.9
DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4313
Шифр специальности ВАК: 2.4.6

Комплексная СВЧ-переработка высокозольного бурого угля для нужд энергетической и металлургической отраслей

Р.Б. Табакаев^{1,2✉}, К.О. Пономарев¹, И.К. Калинин²,
М.А. Гайдабрус¹, Н.А. Шулаев¹, П.М. Елецкий³

¹ Тюменский государственный университет, Россия, г. Тюмень

² Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, г. Томск

³ Институт катализа СО РАН, Россия, г. Новосибирск

✉ r.b.tabakaev@utmn.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена потребностью Томской области в ценных энергетических ресурсах, получаемых из местных низкосортных ресурсов, для разработки имеющихся в регионе железорудных месторождений и покрытия энергетических нужд. *Цель:* исследование газообразных и твердых продуктов, получаемых из низкосортного бурого угля Томской области (Таловское месторождение) в условиях СВЧ-пиролиза, применительно к использованию в энергетической и металлургических отраслях. *Объекты:* бурый уголь Таловского месторождения (Томская область). *Методы:* аттестованные методики ГОСТ для определения теплотехнических характеристик и элементного состава органической и минеральной частей угля, метод «передачи-отражения» для измерения мнимой (ϵ'') и действительной (ϵ') составляющих комплексной диэлектрической проницаемости, физический эксперимент, газовый анализ, метод Брунауэра–Эммета–Теллера для измерения текстурных характеристик. *Результаты.* Бурый уголь Таловского месторождения имеет высокие значения влажности и зольности на рабочее состояние, что обуславливает низкое значение его теплоты сгорания. Такие характеристики позволяют отнести уголь к низкосортному топливу, что указывает на нецелесообразность его применения в качестве сырья для энергетической и металлургической отраслей. Термическая переработка посредством СВЧ-пиролиза позволяет получить из низкосортного таловского угля высококалорийное (теплота сгорания выше 21 МДж/м³) и экологичное (доля водорода более 29 %) газообразное топливо. Образующийся при этом твердый углеродный остаток имеет зольность свыше 48 %, что явилось причиной проведения его химической обработки в растворе HF и HCl. В результате обработки твердого углеродистого остатка значение его зольности снизилось более чем на 38 %, содержание серы – более чем в 1,5 раза. Полученный продукт по своим характеристикам соответствует используемым на данный момент углеродным продуктам – полукоксу, коксу и углеродному восстановителю для ферросплавного производства.

Ключевые слова: Низкосортный уголь, высокозольное топливо, Таловское месторождение бурого угля, СВЧ-пиролиз, углеродистый остаток, генераторный газ, углеродный восстановитель

Благодарности: Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РНФ № 22-19-00410 «Разработка научных основ технологии получения продуктов СВЧ-пиролиза из био-угольных композиций». Аналитические исследования проводились на научном оборудовании, закупленном в рамках государственного задания Института катализа СО РАН (проект FWUR-2024-0038).

Для цитирования: Комплексная СВЧ-переработка высокозольного бурого угля для нужд энергетической и металлургической отраслей / Р.Б. Табакаев, К.О. Пономарев, И.К. Калинин, М.А. Гайдабрус, Н.А. Шулаев, П.М. Елецкий // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 1. – С. 57–68. DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4313

UDC 662.6/.9
DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4313

Complex microwave processing of high-ash brown coal in relation to the energy and metallurgical industries

R.B. Tabakaev^{1,2✉}, K.O. Ponomarev¹, I.K. Kalinich²,
M.A. Gaidabrus¹, N.A. Shulaev¹, P.M. Yeletsky³

¹ University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation

² National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russian Federation

³ Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, Novosibirsk, Russian Federation

✉ r.b.tabakaev@utmn.ru

Abstract. Relevance. The need of the Tomsk region for valuable energy resources obtained from local low-grade resources to develop iron ore deposits available in the region and cover energy needs. **Aim.** To study gaseous and solid products obtained from low-grade brown coal of the Talovsky deposit (Tomsk region) under microwave pyrolysis conditions in relation to the energy and metallurgical industries. **Objects.** Brown coal of the Talovsky deposit (Tomsk region). **Methods.** Certified SS methods to determine thermal characteristics and elemental composition of coal organic and mineral parts, the "transmission-reflection" method for measuring imaginary (ϵ'') and real (ϵ') components of the complex dielectric permittivity, physical experiment, gas analysis, Brunauer–Emmett–Teller method for measuring texture characteristics. **Results.** Brown coal of the Talovsky deposit has high values of moisture and ash contents for operating conditions, which leads to a low calorific value. Such characteristics make it possible to classify coal as a low-grade fuel, which indicates the inexpediency of its use as a raw material for the energy and metallurgical industries. Thermal processing by means of microwave pyrolysis makes it possible to obtain a high-calorie (heat of combustion over 21 MJ/m³) and environmentally friendly (hydrogen content over 29%) gaseous fuel from the low-grade brown coal of the Talovsky deposit. The resulting solid carbonaceous residue has an ash content of over 48%, which required its chemical treatment in a solution of HF and HCl. As a result of the solid carbonaceous residue treatment, its ash content decreased by more than 38%, the sulfur content – by more than 1.5 times. According to its characteristics, the resulting product corresponds to the currently available carbonaceous products – semi-coke, coke and carbon reducing agent for ferroalloy production.

Keywords: Low-grade coal, high-ash fuel, brown coal of the Talovsky deposit, microwave pyrolysis, carbonaceous residue, generator gas, carbon reducing agent

Acknowledgements: This work was supported by the Russian Science Foundation project no. 22-19-00410 "Development of scientific and technical fundamentals for the technology of microwave pyrolysis products from bio-coal compositions". Analytical studies were carried out using scientific equipment purchased within the governmental order for Boreskov Institute of Catalysis (project FWUR-2024-0038).

For citation: Tabakaev R.B., Ponomarev K.O., Kalinich I.K., Gaidabrus M.A., Shulaev N.A., Yeletsky P.M. Complex microwave processing of high-ash brown coal in relation to the energy and metallurgical industries. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 1, pp. 57–68. DOI: 10.18799/24131830/2024/1/4313

Введение

Россия обладает огромным природно-ресурсным потенциалом [1]. Одним из добываемых в России полезных ископаемых, используемых в металлургической промышленности при производстве чугуновых и стальных сплавов, является бурый железняк, или лимонит (Fe₂O₃). Месторождениями бурого железняка являются Тульская и Липецкая области России, а также Алапаевское, Бакальское, Кыштымское и Карабашское месторождения, сформированные на Урале. Крупнейшим (с запасами железа более 28 млрд т [2]) месторождением этой руды является Западно-Сибирский желе-

зорудный бассейн, располагающийся преимущественно в Томской области. Это железорудное месторождение включает пять рудных залежей (Бакчарская, Колпашевская, Парабельская, Парбигская и Чузикская), самой крупной из которых является Бакчарское месторождение в 200 км к северо-западу от города Томска. Разработка железорудных месторождений, как правило, целесообразна в случае близлежащего расположения металлургического комбината, функционирование которого возможно лишь при наличии энергетических ресурсов и развитого транспортного сообщения. Можно заметить, что залежи руды Fe₂O₃ в Томской области

сформированы в районах с большим количеством минерализованной воды: болотистые места, побе-режья рек, озер, палеоморей и их дно. Как след-ствие, в таких окрестностях располагаются высо-коминерализованные торфяные и буроугольные месторождения. В Томской области насчитывается более ста локализаций бурого угля, а перспектива освоения Бакcharского железорудного месторожде-ния инициировала колоссальный интерес к Талов-скому месторождению угля (примерно в 25 км се-вернее Томска) как к наиболее крупному и геогра-фически удачно расположенному участку [3].

Уголь остается важным источником энергии в мире в настоящее время и на долгосрочную пер-спективу [4, 5]. Однако бурый уголь, используемый в регионах в качестве энергетического топлива для нужд местной энергетики, имеет ряд недостатков (высокая влажность, зольность, крошимость и низ-кая теплота сгорания), что приводит к высоким эксплуатационным затратам в процессе его эксплу-атации. Показано [6], что прямое энергетическое использование угля (сжигание) или преобразование его в жидкое топливо недостаточно эффективны и ухудшают экологическую ситуацию в регионах. Так как возобновляемые источники энергии в виде биомассы пока не готовы стать альтернативой углю по производству энергии [7], а снижение мирового потребления в ближайшие 20 лет не предвидится, важной задачей России остается повышение каче-ства угля [8]. Как следствие, перспективной видит-ся [9–12] термическая переработка бурого угля с получением ценных газообразных (например, ме-тан), жидких (например, смола) и твердых (углеро-дистый остаток, который может быть превращен в гуминовую кислоту или использован как полу-кок/сорбент/мелиорант) продуктов. В последнем случае, как правило, используется традиционный метод термической переработки сырья – медлен-ный слойевой пиролиз. При этом в последнее время большее внимание уделяется микроволновому из-лучению (СВЧ-излучению) как перспективному и ресурсоэффективному направлению термической переработки низкосортного угля [13, 14].

При СВЧ-излучении буроугольное сырье нагре-вается в объеме, а не в ограниченной области, как в условиях медленного пиролиза при передаче тепла теплопроводностью [15]. При переработке сырья таким методом существует много факторов (коли-чество пиролизуемого сырья, температура пироли-за, время нагрева [16]), влияющих на выход лету-чих, количество твердого углеродистого остатка и их свойства. Показано [16–18], что эта технология требует меньше времени обработки и может быть более эффективной по сравнению с пиролизом в условиях электрического нагрева. Установлено, что при СВЧ-излучении бурый уголь образует больше

газообразных продуктов и меньше смол по сравне-нию с традиционным пиролизом [18]. Удельная площадь поверхности и объем пор у биоугля из низкосортного угля, полученного в условиях СВЧ-излучения, больше, чем у биоугля, полученного методом медленного пиролиза (текстурные харак-теристики в обоих методах с ростом температуры термической переработки увеличивались) [18]. Установлено [17], что уплотнение угля позволяет существенно ускорить процесс микроволновой конверсии с получением высококачественного кок-са. Также увеличение скорости конверсии низко-сортного бурого угля в условиях СВЧ-излучения достигается при использовании «микроволновых поглотителей», например, SiC, CuO, Fe₂O₃, K₂CO₃, FeSO₄, CaCl₂ [19, 20].

Опубликованных работ, посвященных СВЧ-облучению низкосортных видов угля, ограничен-ное количество, поэтому исследователи отмеча-ют [21], что микроволновый пиролиз бурого угля изучен недостаточно и механизмы, протекающие в этом процессе, описаны неполностью. Это гово-рит о необходимости дальнейшего изучения влия-ния СВЧ-излучения на угли, биомассу и их смеси перед началом возможного масштабирования микроволновой технологии [17]. Конверсия мест-ных низкосортных видов топлива в условиях СВЧ-излучения является актуальной задачей в рамках обеспечения удаленных децентрализован-ных потребителей тепловой и электрической энер-гией при минимальных для них денежных затра-тах. Эффективное энергетическое использование термически переработанного угля возможно при понимании механизмов протекания выбранного процесса переработки сырья, обосновании его це-лесообразности и знании свойств получаемого в процессе пиролиза продукта.

Целью работы являлось исследование газооб-разных и твердых продуктов, получаемых из низ-косортного бурого угля Томской области (Талов-ское месторождение) в условиях СВЧ-пиролиза, применительно к использованию в энергетической и металлургических отраслях.

Материалы и методы

Объект исследования

Исследуемая керновая проба бурого угля ото-брана близ населенного пункта село Наумовка (Томская область, Томский район). Таловский уголь после достижения воздушно-сухого состоя-ния хрупкий, коричневого цвета, имеет неоднород-ный состав, представленный визуально различи-мыми неразложившимися остатками древесины и органических веществ, что позволяет отнести его к топливам ранней стадии метаморфизма.

Теплотехнические характеристики и элементный анализ

Определение теплотехнических характеристик и элементного состава (содержание элементов органической части C, H, N, S, O) таловского угля проводили стандартными методами: зольность (A^d) – ГОСТ Р 55661-2013; выход летучих веществ (V^{daf}) – ГОСТ Р 55660-2013. Общую и аналитическую влагу определяли с использованием анализатора влажности Элвис-2С (ЭЛИЗА, Россия). Измерение значения низшей теплоты сгорания (Q_i') проводили на калориметре АБК-1В (РЭТ, Россия) согласно ГОСТ 147-2013. Элементный состав устанавливали при помощи анализатора Vario Unicube (Elementar, Германия). Перед каждым измерением работоспособность прибора проверяли на стандартном образце сульфаниламида (C=41,68 %; H=4,04 %; N=8,05 %; S=18,47 %). Содержание кислорода (мас. %) определяли по остатку:

$$O^d = 100 - C^d - H^d - N^d - S^d - A^d, \%,$$

где C^d , H^d , N^d , S^d – содержание углерода, водорода, азота и серы, пересчитанное на сухую массу (мас. %); A^d – зольность угля в пересчете на сухую массу, %.

Изучение зольного остатка

Состав зольного остатка (SiO_2 , SO_3 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO и TiO_2) определяли в соответствии с ГОСТ Р 59592-2021: содержание SiO_2 и SO_3 в зольном остатке после сжигания таловского угля измеряли гравиметрическим методом, Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO и MgO – комплексометрическим методом, TiO_2 – спектрофотометрическим методом.

Измерение диэлектрических характеристик

Измерение диэлектрических характеристик образца осуществляли методом «передачи–отражения», описанным в работе [22]. Данная методика характеризуется тем, что отсутствует необходимость определения положения образца внутри коаксиальной воздушной линии в процессе исследований.

Для измерений использован векторный сетевой анализатор Р4М-18 (Микран, Россия), который предварительно калибровали. Затем тороидальный образец помещали между внутренним и внешним проводниками воздушной линии, и осуществляли измерения характеристик «передачи» и «отражения». Измерения проводили в диапазоне частот от 40 МГц до 18 ГГц. Исходя из полученных характеристик, путем пересчета определяли величины мнимой (ϵ'') и действительной (ϵ') составляющих комплексной диэлектрической проницаемости в зависимости от частоты излучения. Из этих параметров рассчитывали величину тангенса диэлектрических потерь, характеризующего величину

мощности, поглощаемой образцом. Расчет осуществляли по формуле:

$$tg(\delta) = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}.$$

СВЧ-пиролиз таловского угля

Эксперименты проведены на установке микроволнового пиролиза, принципиальная схема которой представлена на рис. 1. В процессе эксперимента образец таловского угля в форме гранулы – 3 с диаметром 12 мм, высотой 30 мм и массой $3,0 \pm 0,1$ г помещали в кварцевую трубку – 2, закрепленную в реакторе – 1, осуществляли продувку азотом в течение всего эксперимента (расход 0,5 л/мин.). При помощи магнетрона – 9 (паспортная мощность 750 Вт) генерировали излучение с частотой 2,45 ГГц, поступающее в реактор – 1 через циркулятор – 7. Мощность СВЧ-излучения, измеренная непосредственно перед входом в систему (перед образцом), – 400 Вт. Часть излучения, не поглощенная образцом, перенаправлялась с помощью циркулятора – 7 в водоохлаждаемую нагрузку – 8, где трансформировалась в тепло.

Поглощение СВЧ-излучения приводило к нагреву образца и выделению жидких и газообразных продуктов, удаляемых из рабочей области за счет продувки азотом. После последовательного прохождения фильтров – 12–15 газ разделялся на два потока: первый принудительно направляли в газоанализатор Тест-1 (Бонэр, Россия) при помощи встроенного в него насоса с расходом 0,3 л/мин, второй естественным путем удалялся в атмосферу. Газоанализатор Тест-1 в режиме реального времени регистрировал состав газов (H_2 , CH_4 , CO , CO_2 , O_2) на протяжении всего эксперимента. Теплоту сгорания получаемого газа устанавливали по компонентному составу в соответствии с рекомендациями [23]:

$$Q_i^d = 0,01 \cdot (CO \cdot Q_{CO} + H_2 \cdot Q_{H_2} + CH_4 \cdot Q_{CH_4}),$$

МДж/м³,

где CO , H_2 , CH_4 – доли соответствующих компонентов, %; Q_{CO} , Q_{H_2} , Q_{CH_4} – теплотворная способность соответствующих компонентов, МДж/м³. Теплота сгорания монооксида углерода (CO), водорода (H_2) и метана (CH_4) составляет 12,64, 10,79 и 35,88 МДж/м³ соответственно.

Измерение температуры образца осуществляли с помощью пирометра «FinePower DIN21H» при открывании штуцера отвода газов – 6. Максимальная температура в процессе измерений достигала 613 °С. После визуального окончания эксперимента твердый углеродистый остаток извлекали из реактора, взвешивали на весах для дальнейшего определения выхода продукта.

Более подробно методика подготовки образцов и проведения эксперимента описана в работе [24].

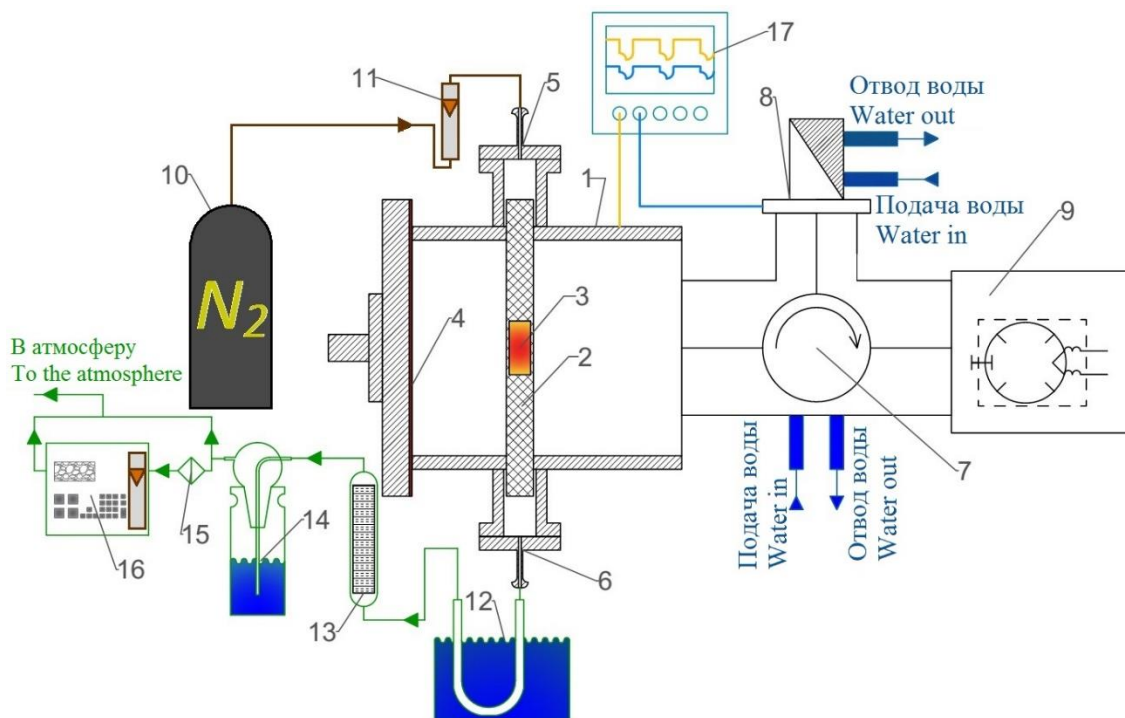


Рис. 1. Установка микроволнового пиролиза: 1 – реактор, 2 – кварцевая трубка, 3 – цилиндрический образец, 4 – подвижная мембрана с механизмом регулировки, 5 – штуцер подачи азота, 6 – штуцер отвода газа, 7 – микроволновый циркулятор, 8 – нагрузка, 9 – магнетронный СВЧ генератор, 10 – бак с азотом, 11 – ротаметр, 12 – теплообменник, 13 – стеклянный фильтр, 14 – гидравлический затвор, 15 – фильтр очистки пробы (PTFE, пористость 0,2 мкм), 16 – газоанализатор, 17 – осциллограф

Fig. 1. Microwave pyrolysis device: 1 – reactor, 2 – quartz tube, 3 – cylindrical sample, 4 – movable membrane with an adjustment mechanism, 5 – nitrogen inlet valve, 6 – gas outlet valve; 7 – microwave circulator, 8 – load, 9 – magnetron microwave generator, 10 – nitrogen tank, 11 – rotameter, 12 – cooler, 13 – glass filter, 14 – water seal, 15 – PTFE filter, 16 – gas analyzer, 17 – oscilloscope

Характеристики твердого углеродистого остатка, полученного в процессе СВЧ-пиролиза

Теплотехнические характеристики и элементный состав твердого углеродистого остатка определяли аналогично исходному сырью (раздел «Объект исследования»).

Удельную поверхность образцов углеродистого остатка, полученного в результате СВЧ-излучения бурого угля, определяли по методу Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ) на основе данных изотерм низкотемпературной адсорбции азота, полученных с использованием адсорбционного анализатора удельной поверхности и пористости 3P sync 210 (Ribori Instrumentation, Германия). Образцы предварительно высушивали при 125 °С в течение 2 ч. Затем осуществляли дегазацию углеродистых остатков в вакууме в течение 12 часов при температуре 270 °С. Измерения проводили при температуре минус 196 °С.

Повышение качества углеродистого остатка

Используемый остаток СВЧ-пиролиза подвергали кислотному выщелачиванию для удаления минеральной фазы следующим образом. На первом этапе образец остатка обрабатывали концентриро-

ванным раствором HF (ТУ 6-09-3401-88, ч.д.а., 46–49 мас. % HF), взятым в количестве 100 мл на 25 г угля (~пятикратный избыток по отношению к SiO₂ угля). Образец непрерывно перемешивали на магнитной мешалке в течение 3 ч с использованием пластикового стакана. Затем промывали деионизированной водой до нейтрального pH. На второй стадии отмывку проводили избытком 3N HCl для удаления минеральных примесей, которые могли остаться в образце, аналогичным образом. Затем образец также промывали деионизированной водой до нейтрального pH с использованием стеклянного фильтра, с последующей сушкой в течение ночи при 120 °С в сушильном шкафу. Анализ на содержание зольной компоненты, для контроля глубины выщелачивания остатка СВЧ пиролиза, проводили так же, как и в случае исходного таловского угля – в соответствии с ГОСТ Р 55661-2013.

Результаты экспериментов и обсуждение Характеристики исходного топлива

Теплотехнические характеристики и элементный состав исходного бурого угля Таловского месторождения представлены в табл. 1.

Таблица 1. Теплотехнические характеристики и элементный состав пробы бурого угля Таловского месторождения (Томская область)

Table 1. Thermal characteristics and elemental composition of the brown coal of the Talovsky deposit (Tomsk region) sample

Образец Sample	W_r , рабочая влажность moisture, %	A^d , зольность на сухую массу вещества, % мас. ash on dry basis, wt %	V^{daf} , выход летучих ве- ществ, % мас. volatile matter yield, wt %	Q_i^r , низшая теплота сгора- ния, МДж/кг net calorific value, MJ/kg	Элементный состав на сухую беззольную массу вещества, % мас. Elemental composition on dry-ash-free basis, wt %				
					C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S^{daf}	O^{daf}
Бурый уголь Таловского месторождения Brown coal of the Talov- sky deposit	51,0	22,6	59,2	7,4	63,95	5,23	0,62	0,75	29,45

Таблица 2. Компонентный состав зольного остатка после сжигания таловского угля

Table 2. Component composition of the ash residue after burning coal of the Talovsky deposit

Компонент зола Ash components	Содержание компонента в зольном остатке % мас. Ash composition, wt %							$\Sigma K/O$
	SiO_2	$Al_2O_3+TiO_2$	Fe_2O_3	SO_3	CaO	MgO	Другие/Others (Na_2O , K_2O , P_2O_5 и др./et al.)	
	65,6	13,0	5,3	3,8	9,0	2,3	1,0	

Видно, что по значению влажности таловский уголь относится к пятой группе, согласно международной классификации, что существенно усложняет его транспортировку, особенно в зимний период [25]. Стоит отметить довольно высокую зольность угля ($A^d=22,6\%$), что в совокупности с высокой влажностью ($W_t=51,0\%$) обуславливает низкое значение его теплоты сгорания ($Q_i^r=7,4$ МДж/кг). Однако высокий выход летучих веществ свидетельствует о его термической нестабильности при нагреве.

Состав зольного остатка, представленный в табл. 2, показывает, что основные компоненты зола представлены оксидами кремния (SiO_2), кальция (CaO), алюминия и титана ($Al_2O_3+TiO_2$). При этом отношение кислотных оксидов к основным ($\Sigma K/O$) составляет 6,4, что, согласно [26], указывает на отсутствие шлакования поверхностей нагрева топочной камеры при сжигании.

Анализируя полученные результаты, можно прийти к выводу, что бурый уголь Таловского месторождения относится к низкосортным видам топлива. Использование такого топлива традиционными методами сжигания, как правило, неэффективно и экономически нецелесообразно, что требует поиска вариантов его предварительной подготовки, например, термическим обогащением.

СВЧ-пиролиз таловского угля

На рис. 2 представлены результаты влияния частоты излучения на мнимую (ϵ'') и действительную (ϵ') составляющие комплексной диэлектрической проницаемости таловского угля. При воздействии СВЧ-излучения нагрев таловского угля осуществляется за счет рассеяния электрической мощности, которая называется диэлектрическими потерями.

Для оценки величины рассеиваемой мощности используют тангенс угла диэлектрических потерь [27]. Мощность, рассеиваемая в угле и переходящая в теплоту, тем больше, чем больше величина тангенса угла диэлектрических потерь. Величину тангенса угла диэлектрических потерь ($\tan(\delta)$) можно определить из отношения мнимой составляющей комплексной диэлектрической проницаемости (ϵ'') к действительной (ϵ'). Таким образом, можно построить зависимость $\tan(\delta)$ от частоты излучения (рис. 3).

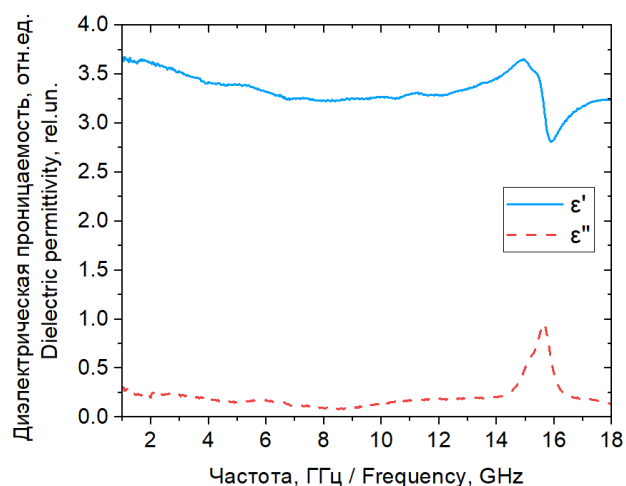


Рис. 2. Диэлектрическая проницаемость таловского угля в зависимости от частоты излучения

Fig. 2. Dielectric permittivity of the Talovsky deposit coal depending on radiation frequency

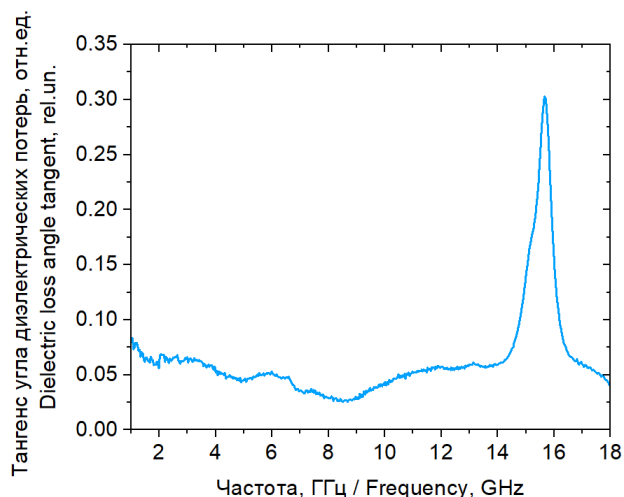


Рис. 3. Тангенс угла диэлектрических потерь в зависимости от частоты излучения

Fig. 3. Dielectric loss angle tangent depending on radiation frequency

Из рис. 3 видно, что значение тангенса угла диэлектрических потерь, а следовательно, и обеспечивающей нагрев рассеиваемой мощности, не постоянно и зависит от частоты. Для обеспечения максимально возможного уровня поглощаемой образцом мощности необходимо использовать частоту, на которой величина диэлектрических потерь имеет максимальную величину. Наибольшие значения наблюдаются на частотах 2–4 и 14–17 ГГц. Пик в диапазоне частот 14–17 ГГц, вероятнее всего, объясняется наличием объемного резонанса, связанного с размерами исследуемого образца [22]. Полученные результаты указывают на возможность эффективного использования наиболее рас-

пространенных и доступных магнетронов с частотой излучения 2,45 ГГц.

Под воздействием СВЧ-излучения происходит разрыв химических связей в органической составляющей таловского угля, в результате чего практически в равном соотношении формируются твердый углеродистый остаток и летучие продукты пиролиза (пары смолы и пирогенетической влаги, газ).

Состав газа, полученного в процессе СВЧ-пиролиза, представлен на рис. 4. Видно, что газ имеет низкое содержание негорючего углекислого газа (доля CO_2 менее 1 %). Высокая доля водорода в составе газа (более 29 %), характерная для паровой или парокислородной газификации угля [28, 29], указывает на экологичность его использования в качестве топлива. Высокие концентрации горючих компонентов (CH_4 , CO , H_2) приводят в совокупности к высокому значению теплоты сгорания получаемого газа, равному $21,2 \text{ МДж/м}^3$, что превосходит теплотворную способность газа, получаемого в процессе медленного или быстрого видов пиролиза угля ($Q_i^d = 13\text{--}15 \text{ МДж/м}^3$) [30–32].

Характеристики полученного твердого углеродистого остатка представлены в табл. 3. Видно, что после пиролиза зольность углеродного остатка по сравнению с исходным сырьем выросла на 25,7 % и составила практически половину от его массы. Ожидаемое при термической переработке увеличение доли углерода ($\Delta C^{df} = 22,32 \%$) способствовало росту теплоты сгорания углеродистого остатка. Стоит также отметить довольно высокую удельную площадь поверхности углеродного остатка ($S_{\text{ВЕТ}} = 144 \text{ м}^2/\text{г}$), сопоставимую со значением [33], полученным при пиролизе в кипящем слое.

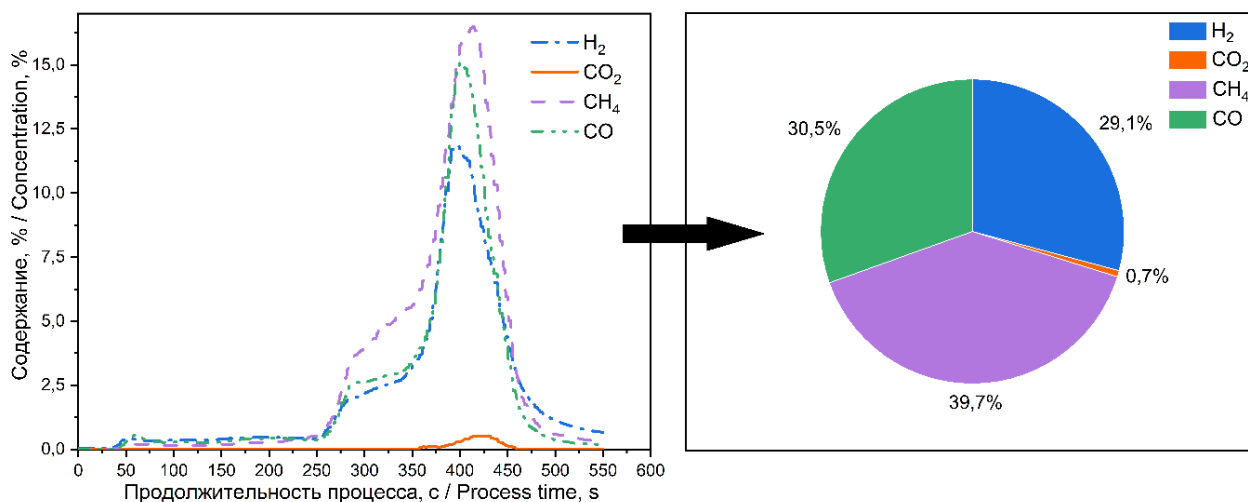


Рис. 4. Состав газа, полученный при СВЧ-пиролизе бурого угля Таловского месторождения

Fig. 4. Gas composition obtained by microwave pyrolysis of the Talovsky deposit brown coal

Таблица 3. Теплотехнические характеристики и элементный состав углеродистого остатка, полученного в процессе СВЧ-пиролиза

Table 3. Thermal characteristics and elemental composition of the carbonaceous residue obtained in the microwave pyrolysis

Образец Sample	ω , выход продукта на сухое состояние, % мас. product dry yield, wt %	A^d , зольность на сухую массу вещества, % мас. ash on dry basis, wt %	Q_i^r , низшая теплота сгорания, МДж/кг net calorific value, MJ/kg	Элементный состав на сухую беззольную массу вещества, % мас. Elemental composition on dry-ash-free basis, wt %					Свет, удельная площадь поверхности, м ² /г surface area, m ² /g
				C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S^{daf}	O^{daf}	
Углеродистый остаток Carbonaceous residue	50,7	48,3	18,7	86,3	2,8	1,0	1,1	8,8	144

Однако можно отметить, что, несмотря на увеличение доли углерода и рост теплотворной способности, полученный при СВЧ-пиролизе углеродистый остаток из-за высокого значения зольности не представляет интерес ни для энергетического использования (высокие затраты на утилизацию золы, снижение надежности работы энергетического оборудования в процессе эксплуатации), ни для металлургической отрасли при разработке близлежащего железнорудного месторождения (высокая зольность снизит КПД доменных печей, негативно скажется на качестве получаемой стали).

Повышение качества углеродистого остатка

Как отмечено ранее, основным недостатком углеродистого остатка, получаемого при СВЧ-пиролизе, является высокая зольность, в связи с чем исследована возможность снижения её значения за счет химической обработки. Учитывая состав зольного остатка (табл. 2), снижение зольности произведено при помощи кислотного выщелачивания фтористоводородной и соляной кислотами. Характеристики обработанного углеродистого остатка представлены в табл. 4. Видно, что зольность полученного при обработке углеродистого остатка снизилась более чем на 38 %, что привело к существенному росту его теплоты сгорания ($Q_i^r=27,2$ МДж/кг). Остаточная зольность, наиболее вероятно, связана с наличием недоступной для выщелачивания части минеральной фазы. Стоит также отметить, что в результате обработки содержание серы (S^d) уменьшилось более чем в 1,5 раза.

Учитывая особенность близости Таловского месторождения к запасам железной руды, рассмотрена возможность использования обработанного углеродистого остатка в качестве углеродного восстановителя-аналога доменного кокса (табл. 5). При сравнении видно, что полученный продукт по своим характеристикам соответствует имеющимся на данный момент на рынке углеродным продуктам – полукоксу, коксу и углеродному восстановителю для ферросплавного производства.

Заключение

Бурый уголь Таловского месторождения имеет высокие значения влажности и зольности на рабочее состояние, что обуславливает низкое значение его теплоты сгорания. Такие характеристики позволяют отнести уголь к низкосортному топливу, что указывает на нецелесообразность его применения в качестве сырья для энергетической и металлургической отраслей.

Термическая переработка посредством СВЧ-пиролиза позволяет получить из низкосортного таловского угля высококалорийное (теплота сгорания свыше 21 МДж/м³) и экологичное (доля водорода более 29 %) газообразное топливо. Образующийся при этом твердый углеродный остаток имеет зольность свыше 48 %, что потребовало проведения его химической обработки в растворе HF и HCl. В результате обработки твердого углеродистого остатка значение его зольности снизилось более чем на 38 %, содержание серы (S^d) – более чем в 1,5 раза.

Таблица 4. Теплотехнические характеристики и элементный состав углеродистого остатка после выщелачивания его минеральной части

Table 4. Thermal characteristics and elemental composition of the carbonaceous residue after leaching its mineral part

Образец Sample	A^d , зольность на сухую массу вещества, % мас. ash on dry basis, wt %	Q_i^r , низшая теплота сгорания, МДж/кг net calorific value, MJ/kg	Элементный состав на сухую беззольную массу вещества, % мас. Elemental composition on dry-ash-free basis, wt %					Свет, удельная площадь поверхности, м ² /г surface area, m ² /g
			C^{daf}	H^{daf}	N^{daf}	S^{daf}	O^{daf}	
Обработанный углеродистый остаток после выщелачивания его минеральной части Carbonaceous residue after leaching its mineral part	10,2	27,2	82,22	2,10	0,84	0,72	14,12	252

Таблица 5. Сравнение характеристик обработанного углеродистого остатка и коксов для металлургии

Table 5. Comparison of characteristics of carbonaceous residue after leaching its mineral part and cokes for metallurgy

Характеристика Characteristic	Обработанный углеродистый остаток, полученный при СВЧ- пиролизе таловского угля Carbonaceous residue obtained by microwave pyrolysis of the Talovsky deposit brown coal, after leaching its mineral part	Полукок из бурых углей Semi-coke from lignite [34]	Доменный кокс Blast-furnace coke [35, 36]	Углеродный восстановитель для ферросплавного произ- водства Carbon reducing agent for ferroalloy production [35, 36]
A^d , зольность на сухую массу вещества, % мас. ash on dry basis, wt %	10,2	8,6–27,0	12,8–15,5	7,0–12,3
V^{daf} , выход летучих веществ, % мас. volatile matter yield, wt %	10,7	5,6–17,2	0,8–10,0	1,5–12,0
(C_{fix}) ^d , содержание фиксированно- го углерода fixed carbon content	79,1	67,4–81,9	80–86	75,5–87,1
S^d , содержание серы, % мас. sulfur content, wt %	0,65	0,13–0,91	0,4–1,5	0,2–0,4
$S_{вет}$, удельная площадь поверхно- сти, м ² /г surface area, m ² /g	252,3	<0,1	<12,4	–

Полученный продукт по своим характеристикам соответствует имеющимся на данный момент на рынке углеродным продуктам – полукоксу, коксу и углеродному восстановителю для ферросплавного производства.

Проведенное исследование показывает возможность применения СВЧ-пиролиза для эффективной

термической переработки низкосортного таловского угля, в результате чего получается высококалорийный газ и углеродный остаток для металлургии. Практическая реализация предложенного решения позволит перейти к разработке близ расположенных залежей железной руды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Bakchar ironstone deposit: mining conditions and technologies / V.I. Cheskidov, V.L. Gavrilov, A.V. Reznik, A.S. Bobyl'sky // Journal of Mining Science. – 2021. – Vol. 57. – № 5. – P. 795–804. DOI: 10.1134/S1062739121050094
2. Minerals of rare earth elements in high-phosphorus ooidal ironstones of the western Siberia and Turgai depression / M. Rudmin, I. Reva, E. Sokol, E. Abdullayev, A. Ruban, A. Kudryavtsev, O. Tolkachev, A. Mazurov // Minerals. – 2020. – Vol. 10. – № 1. – P. 1–16. DOI: 10.3390/min10010011
3. Топливные ресурсы Томской области для альтернативного энергетического использования / А.С. Заворин, Т.С. Тайлашева, К.В. Буваков, А.Ю. Долгих, Е.С. Воронцова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2022. – Т. 333. – № 6. – С. 55–65. DOI: 10.18799/24131830/2022/6/3622
4. Москаленко Т.В., Михеев В.А., Ворсина Е.В. Деминерализация бурого угля Харанорского месторождения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2021. – № 12-1. – С. 148–158. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_121_0_148
5. Узародов И.М. Энергетический кризис в Европе и перспективы низкоуглеродной экономики // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Общественные науки. – 2022. – № 2. – С. 95–101. DOI: 10.18522/2687-0770-2022-2-95-10
6. Modelling and development of technological processes for low rank coal bio-utilization on the example of brown coal / L. Plyatsuk, Y. Chernysh, I. Abdieva, Y. Bataitsev, R. Vaskin, I. Roy, E. Yakhnenko, H. Roubik // Fuel. – 2020. – Vol. 267. – P. 117298. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117298
7. Голландцы решили: сжигание биомассы не является устойчивым. URL: <https://www.openforest.org.ua/227626> (дата обращения 21.04.2023).
8. Исламов С.Р. Термическая переработка как новый уровень обогащения угля // Уголь. – 2020. – № 5 (1130). – С. 50–55. DOI: 10.18796/0041-5790-2020-5-50-55
9. Табакаев Р.Б., Казаков А.В. Оценка тепловых энергозатрат в технологии получения твёрдого композитного топлива из низкосортного сырья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2016. – Т. 327. – № 7. – С. 110–117.
10. Низкосортное топливо Томской области: перспективы энергетического использования / Р.Б. Табакаев, С.А. Хаустов, Г.А. Черкашина, А.В. Казаков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2015. – Т. 326. – № 9. – С. 106–113.
11. Humics 101. URL: <https://humaxx.com/humics101.html> (дата обращения 21.04.2023).
12. Effects of Si and Al elements in coal on Fe-catalyzed brown coal pyrolysis / R. He, H. Liu, Q. Lu, Y. Zhao, X. Wang, X. Xie, X. Deng, S. Yuan // Fuel. – 2022. – Vol. 267. – P. 117298. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123170
13. Ren Y., Xu Z., Gu S. Physicochemical properties and slurry ability changes of lignite after microwave upgrade with the assist of lignite semi-coke // Energy. – 2022. – Vol. 252. – P. 123728. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123728
14. Effect of microwave and thermal co-pyrolysis of low-rank coal and pine wood on product distributions and char structure / V. Abdelsayed, C.R. Ellison, A. Trubetskaya, M.W. Smith, D. Shekhawat // Energy and Fuels. – 2019. – Vol. 33. – № 8. – P. 7069–7082. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.9b01105

15. Low rank coal for fuel production via microwave-assisted pyrolysis: a review / B. Sardi, I. Uno, F. Pasila, A. Altway, M. Mahfud // *FirePhysChem.* – 2023. – Vol. 3. – № 2. – P. 106–120. DOI: 10.1016/j.fpc.2023.02.002
16. Oil production from microwave-assisted pyrolysis of a low rank American brown coal / Y. Zhang, S. Liu, L. Fan, N. Zhou, M. Mubashar Omar, P. Peng, E. Anderson, M. Addy, Y. Cheng, Y. Liu, B. Li, J. Snyder, P. Chen, R. Ruan // *Energy Conversion and Management.* – 2018. – Vol. 159. – P. 76–84. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.01.004
17. Formation of metallurgical coke within minutes through coal densification and microwave energy / O. Williams, A. Ure, L. Stevens, E. Binner, C. Dodds, S. Kingman, B. Das, P.S. Dash, E. Lester // *Energy and Fuels.* – 2019. – Vol. 33. – № 7. – P. 6817–6828. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.9b00511
18. Microwave-assisted pyrolysis of Mississippi coal: a comparative study with conventional pyrolysis / V. Abdelsayed, D. Shekhawat, M.W. Smith, D. Link, A.E. Stiegman // *Fuel.* – 2018. – Vol. 217. – P. 656–667. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.12.099
19. Shuqin L.I.U., Yanjun Z.H.A.N.G., Chaofan Z.H.A.N.G. Microwave assisted pyrolysis of lignite with microwave absorbers // *Journal of the China Coal Society.* – 2017. – Vol. 42. – № 16. – P. 3280–3285. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.0871
20. Microwave-assisted pyrolysis of low-rank coal with K_2CO_3 , $CaCl_2$, and $FeSO_4$ catalysts / Y. Zhang, G. Chen, L. Wang, K. Tuo, S. Liu // *ACS Omega.* – 2020. – Vol. 5. – № 28. – P. 17232–17241. DOI: 10.1021/acsomega.0c01400.
21. Microwave-assisted co-pyrolysis of brown coal and corn stover for oil production / Y. Zhang, L. Fan, S. Liu, N. Zhou, K. Ding, P. Peng, E. Anderson, M. Addy, Y. Cheng, Y. Liu, B. Li, J. Snyder, P. Chen, R. Ruan // *Bioresource Technology.* – 2018. – Vol. 259. – P. 461–464. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.03.078
22. Wideband reference-plane invariant method for measuring electromagnetic parameters of materials / K. Chalapat, K. Sarvala, J. Li, G.S. Paraoanu // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques.* – 2009. – Vol. 57. – № 1. – P. 2257–2267. DOI: 10.1109/TMTT.2009.2027160
23. Тепловой расчет котлов (Нормативный метод). изд. 3-е, перераб. и доп. – СПб: ПНО ЦКТИ, 1998. – 256 с.
24. Экспериментальное исследование СВЧ-пиролиза твердых органических топлив / Р.Б. Табакаев, И.Д. Димитрюк, И.К. Калинин, А.В. Астафьев, А.В. Гиль, К.Т. Ибраева, П.Ю. Чумерин // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2022. – Т. 333. – № 12. – С. 190–199. DOI: 10.18799/24131830/2022/12/3789
25. Transportation of coal concentrates at negative ambient temperatures / A.D. Uchitel', M.V. Kormer, V.P. Lyalyuk, I.A. Lyakhova, E.O. Shmel'tser, Y.I. Vititnev // *Coke and Chemistry.* – 2013. – Vol. 56. – № 5. – P. 167–172. DOI: 10.3103/S1068364X13050104
26. Фурсов И.Д. Конструирование и тепловой расчет паровых котлов. – Барнаул: Изд-во АлтГТ, 2016. – 297 с.
27. Брандт А.А. Исследование диэлектриков на сверхвысоких частотах. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1963. – 404 с.
28. Паровая бескислородная газификация в условиях полигенерации / С.А. Шевыр'ев, П.А. Стрижак, Д. Ральф-Юве, А.Р. Богомолов // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов.* – 2021. – Т. 332. – № 2. – С. 44–58. DOI: 10.18799/24131830/2021/02/3042
29. Афанасьев В.В., Ковалев В.Г., Тарасов В.А. Анализ технологий газификации твердого топлива // *Вестник Чувашского университета.* – 2010. – № 3. – С. 194–205.
30. Жуйков А.В., Матюшенко А.И. Способы получения и практического применения синтез-газа (обзор) // *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии.* – 2020. – Т. 13. – № 4. – С. 383–405. DOI: 10.17516/1999-494X-0232
31. Пиролиз бурых углей Бриневского месторождения республики Беларусь / И.И. Лиштван, П.Л. Фалюшин, В.М. Дударчик, В.Н. Кожурин, Е.В. Ануфриева // *Химия твердого топлива.* – 2009. – № 3. – С. 19–25.
32. Техничко-экономическая оценка получения водорода методом подземной газификации угля / Ю.В. Стефаник, В.Я. Шпет, Ю.В. Хоха, М.И. Дубына, В.М. Храмов, А.В. Волочий // *Альтернативная энергетика и экология.* – 2008. – № 4. – С. 55–89.
33. Conversion of natural feedstocks to porous carbons via carbonization in fluidized catalyst bed followed by leaching the feedstock mineral template phase: a comparison of biomass and sedimentary raw materials / P.M. Yeletsky, Y.V. Dubinin, N.A. Yazykov, R.B. Tabakaev, K.A. Okotrub, V.A. Yakovlev // *Fuel Processing Technology.* – 2022. – Vol. 226. – P. 107076. DOI: 10.1016/j.fuproc.2021.107076
34. Применение буроугольных полукоксов в металлургии: технологическая и экономическая оценка / Г.В. Галевский, А.Е. Аникин, В.В. Руднева, С.Г. Галевский // *Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Материаловедение. Энергетика.* – 2016. – № 2 (243). – С. 114–123. DOI: 10.5862/jest.243.12
35. Ульева Г.А. Исследование физико-химических свойств специальных видов кокса и его применение для выплавки высококремнистых сплавов: автореф. дис. ... канд. тех. наук. – Екатеринбург, 2013. – 24 с.
36. Научные и практические основы бескоксового производства кремнистых ферросплавов / В.М. Страхов, И.М. Кашлев, М.А. Соловьев, А.Г. Калиакпаров // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации.* – 2019. – Т. 75. – № 4. – С. 465–479. DOI: 10.32339/0135-5910-2019-4-465-479

Информация об авторах

Роман Борисович Табакаев, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории ресурсоэффективных технологий термической переработки биомассы Института экологической и сельскохозяйственной биологии (Х-БИО) Тюменского государственного университета, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6; доцент научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. r.b.tabakaev@utmn.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3879-7353>

Константин Олегович Пономарев, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории ресурсоэффективных технологий термической переработки биомассы Института экологической и сельскохозяйственной биологии (Х-БИО) Тюменского государственного университета, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6. k.o.ponomarev@utmn.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4877-1536>

Иван Константинович Калинин, аспирант, ассистент отделения естественных наук Школы базовой инженерной подготовки Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. ikk5@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9597-7671>

Мария Андреевна Гайдабрус, аспирант, инженер-исследователь лаборатории ресурсоэффективных технологий термической переработки биомассы Института экологической и сельскохозяйственной биологии (Х-БИО) Тюменского государственного университета, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6. m.a.gajdabrus@utmn.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8569-5327>

Никита Анатольевич Шулаев, инженер-исследователь лаборатории наноматериалов и наноэлектроники Центра природовдохновенного инжиниринга Тюменского государственного университета, Россия, 625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6. n.a.shulaev@utmn.ru; <https://orcid.org/0009-0007-9673-0137>

Петр Михайлович Елецкий, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Инжинирингового центра Института катализа СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 5. yeletsky@catalysis.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8899-9039>

Поступила в редакцию: 05.07.2023

Поступила после рецензирования: 15.09.2023

Принята к публикации: 22.11.2023

REFERENCES

1. Cheskidov V.I., Gavrillov V.L., Reznik A.V., Bobyl'sky A.S. The Bakchar ironstone deposit: mining conditions and technologies. *Journal of Mining Science*, 2021, vol. 57, no. 5, pp. 795–804. DOI: 10.1134/S1062739121050094
2. Rudmin M., Reva I., Sokol E., Abdullayev E., Ruban A., Kudryavtsev A., Tolkachev O., Mazurov A. Minerals of rare earth elements in high-phosphorus ooidal ironstones of the western Siberia and Turgai depression. *Minerals*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 1–16. DOI: 10.3390/min10010011
3. Zavorin A.S., Taylasheva T.S., Buvakov K.V., Dolgikh A.Yu., Vorontsova E.S. Fuel resources of Tomsk region for alternative energy usage. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 6, pp. 55–65. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/6/3622
4. Moskalenko T.V., Mikheev V.A., Vorsina E.V. Demineralization of Kharanor lignite. *Mining Informational and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)*, 2021, no. 12-1, pp. 148–158. (In Russ.) DOI: 10.25018/0236_1493_2021_121_0_148
5. Uznarodov I.M. The energy crisis in Europe and the prospects for a low-carbon economy. *Bulletin of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Social Science*, 2022, no. 2, pp. 95–101. (In Russ.) DOI: 10.18522/2687-0770-2022-2-95-10
6. Plyatsuk L., Chernysh Y., Ablicieva I., Bataltsev Y., Vaskin R., Roy I., Yakhnenko E., Roubik H. Modelling and development of technological processes for low rank coal bio-utilization on the example of brown coal. *Fuel*, 2020, vol. 267, pp. 117298. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.117298
7. *The Dutch have decided: burning biomass is not sustainable*. (In Russ.) Available at: <https://www.openforest.org.ua/227626> (assessed 21 April 2023).
8. Islamov S.R. Thermal processing as a new level of coal enrichment. *Ugol' – Russian Coal Journal*, 2020, no. 5, pp. 50–55. (In Russ.) DOI: 10.18796/00415790-2020-5-50-55
9. Tabakaev R.B., Kazakov A. Assessment of thermal energy use in technique of producing solid composite fuels from low-grade raw materials. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2016, vol. 327, no. 7, pp. 110–117. (In Russ.)
10. Tabakaev R.B., Khaustov S.A., Cherkashina G.A., Kazakov A. Low-grade fuels of Tomsk region: prospects for energy use. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2015, vol. 326, no. 9, pp. 106–113. (In Russ.)
11. *Humics 101*. (In Russ.) Available at: <https://humaxx.com/humics101.html> (assessed 21 April 2023).
12. He R., Liu H., Lu Q., Zhao Y., Wang X., Xie X., Deng X., Yuan S. Effects of Si and Al elements in coal on Fe-catalyzed brown coal pyrolysis. *Fuel*, 2022, vol. 267, pp. 117298. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.123170
13. Ren Y., Xu Z., Gu S. Physicochemical properties and slurry ability changes of lignite after microwave upgrade with the assist of lignite semi-coke. *Energy*, 2022, vol. 252, pp. 123728. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123728
14. Abdelsayed V., Ellison C.R., Trubetskaya A., Smith M.W., Shekhawat D. Effect of microwave and thermal co-pyrolysis of low-rank coal and pine wood on product distributions and char structure. *Energy and Fuels*, 2019, vol. 33, no. 8, pp. 7069–7082. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.9b01105
15. Sardi B., Uno I., Pasila F., Altway A., Mahfud M. Low rank coal for fuel production via microwave-assisted pyrolysis: a review. *FirePhysChem*, 2023, vol. 3, no. 2, pp. 106–120. DOI: 10.1016/j.fpc.2023.02.002
16. Zhang Y., Liu S., Fan L., Zhou N., Mubashar Omar M., Peng P., Anderson E., Addy M., Cheng Y., Liu Y., Li B., Snyder J., Chen P., Ruan R. Oil production from microwave-assisted pyrolysis of a low rank American brown coal. *Energy Conversion and Management*, 2018, vol. 159, pp. 76–84. DOI: 10.1016/j.enconman.2018.01.004
17. Williams O., Ure A., Stevens L., Binner E., Dodds C., Kingman S., Das B., Dash P. S., Lester E. Formation of metallurgical coke within minutes through coal densification and microwave energy. *Energy and Fuels*, 2019, vol. 33, no. 7, pp. 6817–6828. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.9b00511

18. Abdelsayed V., Shekhawat D., Smith M.W., Link D., Stiegman A.E. Microwave-assisted pyrolysis of Mississippi coal: a comparative study with conventional pyrolysis. *Fuel*, 2018, vol. 217, pp. 656–667. DOI: 10.1016/j.fuel.2017.12.099
19. Shuqin L., Yanjun Z., Chaofan Z. Microwave assisted pyrolysis of lignite with microwave absorbers. *Journal of the China Coal Society*, 2017, vol. 42, no. 16, pp. 3280–3285. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.0871
20. Zhang Y., Chen G., Wang L., Tuo K., Liu S. Microwave-assisted pyrolysis of low-rank coal with K_2CO_3 , $CaCl_2$, and $FeSO_4$ catalysts. *ACS Omega*, 2020, vol. 5, no. 28, pp. 17232–17241. DOI: 10.1021/acsomega.0c01400
21. Zhang Y., Fan L., Liu S., Zhou N., Ding K., Peng P., Anderson E., Addy M., Cheng Y., Liu Y., Li B., Snyder J., Chen P., Ruan R. Microwave-assisted co-pyrolysis of brown coal and corn stover for oil production. *Bioresource Technology*, 2018, vol. 259, pp. 461–464. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.03.078
22. Chalapat K., Sarvala K., Li J., Paraoanu G.S. Wideband reference-plane invariant method for measuring electromagnetic parameters of materials. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, vol. 57, no. 1, pp. 2257–2267. DOI: 10.1109/TMTT.2009.2027160
23. *Thermal calculation of boiler units (Normative Method)*. (In Russ.) St. Petersburg, NPO CKTI Publ. house, 1998. 256 p.
24. Tabakaev R.B., Dimitryuk I.D., Kalinich I.K., Astafiev A.V., Gil A.V., Ibraeva K.T., Chumerin P.Y. Experimental research of microwave pyrolysis of solid organic fuels. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2022, vol. 333, no. 12, pp. 190–199. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2022/12/3789
25. Uchitel' A.D., Kormer M.V., Lyalyuk V.P., Lyakhova I.A., Shmel'tser E.O., Vitinev Y.I. Transportation of coal concentrates at negative ambient temperatures. *Coke and Chemistry*, 2013, vol. 56, no. 5, pp. 167–172. DOI: 10.3103/S1068364X13050104.
26. Fursov I.D. *Design and thermal calculation of steam boilers*. (In Russ.) Barnaul, AltGT Publ., 2016. 297 p.
27. Brandt A.A. *Study of dielectrics at ultrahigh frequencies*. (In Russ.) Moscow, Gosudarstvennoe izdatel'stvo fiziko-matematicheskoi literatury Publ., 1963. 404 p.
28. Shevyrev S.A., Strizhak P.A., Ditrikh R.Y., Bogomolov A.R. Oxygen-free steam gasification under polygeneration. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2021, vol. 332, no. 2, pp. 44–58. (In Russ.) DOI: 10.18799/24131830/2021/02/3042
29. Afanasyev V.V., Kovalev V.G., Tarasov V.A. The know-hows of a gasification of solid fuel. *Vestnik Chuvashskogo Universiteta*, 2010, no. 3, pp. 194–205. (In Russ.)
30. Zhuikov A.V., Matushenko A.I. Methods for producing and practical use of synthesis gas (review). *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2020, vol. 13, no. 4, pp. 383–405. (In Russ.) DOI: 10.17516/1999-494x-0232
31. Lishtvan I.I., Falyushin P.L., Dudarchik V.M., Kozhurin V.N., Anufrieva E.V. Pyrolysis of brown coals of the Brinevskoe deposit of the Republic of Belarus. *Solid Fuel Chemistry*, 2009, no. 3, pp. 19–25. (In Russ.)
32. Stefanik Yu.V., Shpet V.Ya., Khokha Yu.V., Dubyna M.I., Khramov V.M., Volochy A.V. Feasibility study of hydrogen production by underground coal gasification. *Alternative energy and ecology*, 2008, no. 4, pp. 55–89. (In Russ.)
33. Yeletsky P.M., Dubinin Y.V., Yazykov N.A., Tabakaev R.B., Okotrub K.A., Yakovlev V.A. Conversion of natural feedstocks to porous carbons via carbonization in fluidized catalyst bed followed by leaching the feedstock mineral template phase: A comparison of biomass and sedimentary raw materials. *Fuel Processing Technology*, 2022, vol. 226, pp. 107076. DOI: 10.1016/j.fuproc.2021.107076
34. Galevsky G.V., Anikin A.E., Rudneva V.V., Galevsky S.G. Using brown-coal semi-coke in metallurgy: technological and economic assessment. *St. Petersburg State Polytechnical University Journal*, 2016, no. 2 (243), pp. 1114–1123. (In Russ.) DOI: 10.5862/jest.243.12
35. Ulyeva G.A. *Research of the physicochemical properties of coke special types and its application for the smelting of high-silicon alloys*. Cand. Diss. (In Russ.) Ekaterinburg, 2013. 24 p.
36. Strakhov V.M., Kashlev I.M., Solov'ev M.A., Kaliakparov A.G. Scientific and practical fundamentals of cokeless production of siliceous ferroalloys. *Chernaya metallurgiya. Bulletin of scientific, technical and economic information*, 2019, vol. 75, no. 4, pp. 465–479. (In Russ.) DOI: 10.32339/0135-5910-2019-4-465-479

Information about the authors

Roman B. Tabakaev, Cand. Sc., Senior Researcher, University of Tyumen, 6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russian Federation; Associate Professor, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. r.b.tabakaev@utmn.ru; <https://orcid.org/0000-0003-3879-7353>

Konstantin O. Ponomarev, Cand. Sc., Researcher, University of Tyumen, 6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russian Federation. k.o.ponomarev@utmn.ru; <https://orcid.org/0000-0003-4877-1536>

Ivan K. Kalinich, Postgraduate Student, Assistant, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation. ikk5@tpu.ru; <https://orcid.org/0000-0001-9597-7671>

Mariya A. Gaidabrus, Postgraduate Student, Research Engineer, University of Tyumen, 6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russian Federation. m.a.gaidabrus@utmn.ru; <https://orcid.org/0009-0005-8569-5327>

Nikita A. Shulaev, Research Engineer, University of Tyumen, 6, Volodarsky street, Tyumen, 625003, Russian Federation. n.a.shulaev@utmn.ru; <https://orcid.org/0009-0007-9673-0137>

Petr M. Yeletsky, Cand. Sc., Senior Researcher, Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, 5, Lavrentiev avenue, Novosibirsk, 630090, Russian Federation. yeletsky@catalysis.ru; <https://orcid.org/0000-0001-8899-9039>

Received: 05.07.2023

Revised: 15.09.2023

Accepted: 22.11.2023