

Анализ перспектив термической конверсии торфяного сырья и его использования в черной металлургии



А. В. Михайлов,
профессор кафедры
машиностроения¹,
докт. техн. наук,
профессор, эл. почта:
mikhaylov_av@pers.spmi.ru



В. Ю. Бажин,
зав. кафедрой металлургии¹,
докт. техн. наук,
профессор, эл. почта:
bazhin_vyu@pers.spmi.ru



В. Ю. Пириайнен,
профессор кафедры
материаловедения¹,
докт. техн. наук,
профессор, эл. почта:
piirainen_vyu@pers.spmi.ru

Рассмотрены текущее состояние и перспективы использования альтернативных углеродсодержащих материалов в качестве исходного сырья для получения кокса с целью частичного или полного замещения угля в металлургических процессах и желательных свойств альтернативных топлив, которые способствуют такому замещению. Частичное замещение коксующегося угля низкосортным топливом низкой степени метаморфизма определено в качестве перспективного подхода для эффективного снижения уровня потребления угольного кокса и расширения сырьевых баз низкосортных топлив. Актуальным для расширения энергетических и технологических свойств углеродсодержащих компонентов с целью повышения эффективности и качества металлургических процессов является изучение вопросов использования продуктов термической переработки торфяного сырья. Проведен анализ достигнутого уровня технологий термической конверсии торфяного сырья и основные пути развития технологий в области его термической переработки с учетом накопленного ранее опыта. На основании проведенных экспериментов сделан вывод, что кокс, полученный из торфяного сырья, характеризуется высокой реакционной способностью. Интерес к использованию торфяного сырья для производства кокса обусловлен его доступностью и гораздо более низкой стоимостью по сравнению с обычно используемыми твердыми коксующимися углями. Проведен анализ существующих торфяных баз и перспективы их развития, позволившие обозначить возможное размещение совмещенных производственных комплексов. Исходное торфяное сырье преобразуется в окучкованные материалы методом экструзии с помощью процессов предварительной механотермической переработки прежде чем они могут быть использованы в производстве чугуна и стали.

Ключевые слова: металлургический кокс, каустобиолиты, торфяное сырье, сырьевые базы, черная металлургия, термическая конверсия торфяного сырья.

DOI: 10.17580/chm.2024.09.02

¹Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II, Санкт-Петербург, Россия

Введение

Поиск новых и альтернативных решений для расширения минерально-сырьевой базы в условиях дефицита и истощения запасов некоторых типов руд, в частности и железорудного сырья, является перспективным для перерабатывающих отраслей отечественной промышленности [1–3].

В металлургической промышленности возрастает потребность не только в доменном коксе, основном металлургическом топливе, но и в других его видах: для агломерации железных руд, литейного производства, производства ферросплавов. В настоящее время в металлургии существует необходимость разработки новых технологий и материалов для снижения энергопотребления и выбросов загрязняющих веществ, присущих традиционным сталелитейным

предприятиям [4–6]. Кокс составляет около 40 % конечной стоимости стали, что заставляет производителей сохранять дефицитные и дорогостоящие энергоносители и искать устойчивые альтернативы для получения коксовой смеси [7, 8]. В некоторых исследованиях по коксохимическому производству рассматривают угольную мелочь, торф, древесные отходы [4, 9, 10]. Биомассу в металлургии можно использовать путем непосредственного введения в доменные или электродуговые печи, включения в шихтовые материалы или в смесь с углем для получения кокса [11–13]. В последнем случае обязательным условием является сохранение требуемого качества для применения в доменной печи по показателям прочности кокса после реакции (CSR), индекса реакционной способности кокса (CRI) и индекса барабана (ID). При этом обеспечение низкой себестоимости является перспективным для промышленности [14, 15].

В связи с ограниченным предложением и высокой стоимостью высококачественных коксующихся углей смешивание углей и топлив низкой степени метаморфизма с приемлемыми уровнями летучих и зольности является распространенной практикой для получения кокса соответствующей прочности [16, 17]. Технологии, способствующие снижению сопутствующих расходов, такие как окускование и сушка, также требуют внимания, чтобы сделать возможной значительную интеграцию биомассы [17, 18]. Интерес к использованию низкосортных топлив низкой степени метаморфизма для производства кокса обусловлен их доступностью, запасами и малой стоимостью по сравнению с обычно используемыми углями [14]. Примерно 75 % себестоимости производства кокса составляет текущая стоимость исходных углей, используемых для коксующейся шихты [19].

Современная концепция предполагает внедрение принципиально новых экономически эффективных и экологически безопасных технологий использования топлив низкой степени метаморфизма (торфа, бурого и длиннопламенного угля), т. е. высоких влажности и выхода летучих веществ для использования как в усовершенствованных, так и в принципиально новых (бездоменных) технологиях получения железа [20, 21].

Среди видов топлива, которые могут быть использованы в металлургии, определенный интерес представляет торфяное сырье и продукты его термической конверсии. Торфяные продукты характеризуются рядом ценных для металлургического использования качеств: низким содержанием серы и фосфора, высокой реакционной способностью, низкой зольностью. Ранее, с учетом теплотворной способности и структурных особенностей торфа, рассматривали вопросы альтернативного использования торфа в черной металлургии [22–24].

Целью данного технического обзора являются обобщение, оценка и выводы на основе проведенных аналитических исследований использования торфяного сырья для получения металлургического кокса, а также оценка связанных с этим преимуществ.

Требования к качеству кокса

Согласно отчету Всемирной Ассоциации Стали (World Steel Association, WSA), мировое производство стали в 2023 г. составило 1,88 млрд т [25], в России (по предварительным оценкам) — 75,8 млн т [26].

Мировая торговля коксом, который используют в сталеплавильном производстве, в первой половине 2023 г. составила 11,68 млн т [27].

В доменной печи кокс выполняет несколько основных функций [7]:

- генератора восстановительных газов (при газификации кокса образуются восстановительные газы, которые отвечают за превращение оксидов железа в металлическое железо);
- топлива (поскольку реакции горения кокса являются экзотермическими, выделяется тепло для восстановления оксидов и плавления металлического железа);
- обогащает углеродом раскаленный металл;

– поддерживает слои шихты, обеспечивая проницаемость для прохождения восходящих газов.

Общие требования к коксовым материалам [7]:

- максимальное содержание углерода и минимальное влаги, золы, серы и фосфора;
- адекватные значения реакционной способности для CO_2 и H_2O ;
- диапазон размеров частиц при загрузке в доменную печь;
- устойчивость к механической, термической и химической деструкции.

Свойства включают: высокую механическую прочность (CSR) — прочность кокса после реакции; низкую реакционную способность (CRI) — индекс реакционной способности кокса; а также степень поверхностной пористости в сочетании с толстыми стенками пор [4]. Ниже приведены физико-химические и механические параметры кокса в соответствии с указанными требованиями. Согласно ГОСТ 5.1261–2023 [28], содержание углерода в доменном коксе не регламентируется.

Свойства кокса для использования в доменных печах [5]

Параметр	Показатель
Влажность, %	<6,0
Углерод, %	65–75
Зольность, %	<10,5
Летучие вещества, %	<1,2
Сера, %	<0,7
Фосфор, %	<0,045
Щелочи, %	<0,35
Плотность, кг/м^3	180–350
ID (150/15), %	>85
CSR, %	>65,5
CRI, %	21,0–25,5
Прочность на сжатие, МПа	130–160
Размер кусков, мм	45–60

Промышленные предприятия, эксплуатирующие низкотемпературные печи, испытывают определенные трудности с обеспечением литейным коксом [29, 30].

Качество металлургического кокса определяется эффективностью химических, физических и тепловых функций в доменной печи. Насыпная плотность, содержание летучих веществ и скорость коксования шихты считаются основными контролирующими параметрами в развитии давления коксования [31]. Известно, что добавка в шихту биомассы для коксования обычно снижает насыпную плотность, что приводит к благоприятному снижению давления коксования [4].

Торфяное сырье для термической конверсии

Одним из важных природных ресурсов России является торф, который может внести значительный вклад в решение задач по наращиванию и обеспечению производства продукции металлургического назначения. Торф — это возобновляемый природный ресурс растительного и биологического происхождения, широко распространен на планете. Он образуется в результате отмирания растительности болот в обводненной среде при недостаточном доступе кислорода воздуха.

По условиям образования торф относится к виду каустобиолитов угольного (гумусового) ряда, в который входят антрацит, каменный уголь, бурый уголь и торф. Угли и антрациты являются результатом сложного процесса углефикации торфа. Углеобразование последовательно проходит следующие стадии: торфяную (торфогенез), буроугольную (диагенез), каменноугольную (метагенез) и антрацитовую [32]. В естественном состоянии при залегании в залежи торф сильно обводнен (до 90 %), что является основной трудностью при его разработке и практическом применении (табл. 1).

Ранг угля указывает на степень его органического метаморфизма (углефикации), начиная от торфа с низким рангом и заканчивая метаантрацитом с высоким рангом, и определяется различными параметрами угля: содержание влаги, витринитовая отражательная способность, соотношения Н:С и О:С, теплотворная способность и содержание летучих веществ [33]. При снижении ранга угля увеличение содержания гидроксильных групп ускоряет протекание реакций конденсации [34].

В компонентном составе органической массы торфа содержание водорастворимых веществ составляет 1–5 %, битумов — 2–10 %, легкогидролизующих соединений — 20–40 %, целлюлозы — 4–10 %, гуминовых кислот — 15–50 %, лигнина — 5–20 %.

Россия располагает 32,28 % общемирового распределения торфяников [35]. Основные торфяные ресурсы России (76 %) сосредоточены в Уральском — 87,6 млрд т (48,3 %), Сибирском — 50,1 млрд т (27,7 %), Северо-Западном — 26,1 млрд т (14,4 %) федеральных округах [36]. Применительно к горно-металлургическому комплексу представляет интерес использование продуктов переработки торфа в металлургических

процессах, в частности на территориях Северо-Западного и Уральского федеральных округов с развитой металлургической промышленностью, работающей на дальнепривозном углеродистом топливе, при наличии крупных торфяных месторождений, расположенных сравнительно близко от металлургических заводов [37]. Крупным и перспективным направлением, вероятно, может стать использование в металлургии в качестве топлива богатых запасов малозольного бессернистого высококалорийного верхового торфа высокой степени разложения, сосредоточенных в районе залегания богатейшего Бакчарского железорудного месторождения в Томской области. В некоторых случаях запасы железной руды прикрыты торфяными месторождениями. Их промышленное освоение привело бы к тому, что одновременно с получением продукции в виде торфяного сырья проводили бы вскрышные работы по подготовке территории, повышающие эффективность последующей разработки месторождения железных руд. Это обстоятельство может способствовать повышению экономической эффективности добычи не только железной руды, но и торфяного сырья [38].

Структура и направления развития термической конверсии торфяного сырья

Известны следующие направления использования торфа в металлургических процессах [39–41]:

- торфяной кокс и полукокк в качестве отошающего компонента шихты;
- агломерация железных руд;
- производство ферросплавов;
- использование фрезерного торфа для термического разложения в реакторе аэрофонтанного типа с последующим вдуванием полученного пылевидного торфяного кокса в горно-доменных печах для частичной замены каменноугольного кокса;
- производство топливно-плавильных материалов на основе торфа и термобрикетов для доменного процесса и торфяных брикетов для внедоменного получения стали в кипящем шлаковом слое и производства губчатого железа с последующей переплавкой в сталь в индукционных печах;
- сырье для производства активных углей, торфяного полукоксового карбюризатора размером 2–15 мм для цементации стали, кузнечного топлива и др.

Таблица 1

Характеристики каустобиолитов угольного ряда

Каустобиолиты угольного ряда	Содержание влаги, %	Средняя плотность ρ , кг/м ³
Торф	90	950
Бурый уголь	<60	1200
Каменный уголь	<18	1300
Антрацит	<5	1500

Таблица 2

Характеристика углеродистых материалов, используемых и рекомендованных в качестве восстановителей при выплавке кремния

Материал	Технический анализ, %				Реакционная способность по CO ₂ , мл/г·с	Удельное электрическое сопротивление, Ом·см
	Влажность W ^p	Летучие вещества V ^f	Зольность A ^c	Углерод C _{тв}		
Древесный уголь	6–9	20,0	3,5	76,5	0,3–11,1	2,1·10 ⁶
Нефтяной кокс	3–13	3–6,5	0,16–0,7	92,8	0,36–0,42	1,10 ³
Торфяной кокс	4	12,5	5,7–10,7	80–85	9,03	1,10 ⁴

Вопросами комплексного использования торфа и продуктов его термической конверсии в металлургических процессах на протяжении целого ряда лет совместно с металлургическими заводами занимался ряд научно-исследовательских и проектных институтов страны [42].

В **табл. 2** приведена сравнительная характеристика углеродистых материалов, используемых и рекомендованных в качестве восстановителей при выплавке кремния [43].

В **табл. 3** приведено сравнение качественных характеристик каменноугольного литейного кокса, состав которого определяется по ГОСТ 3340–88 [44], и торфяного кокса [45].

В зависимости от степени термической деструкции торфа пиролиз подразделяют на бертинирование, полукоксование и коксование. Бертинирование является начальной стадией пиролиза до выделения дегтя или с частичным выделением его; обычно его проводят при температуре 200–300 °С. Полукоксование представляет собой пиролиз до полного выделения дегтя и завершается при температуре около 550 °С. Коксование или пиролиз до выхода летучих веществ не более 7 % осуществляется при конечной температуре 700 °С и выше [46]. Выход кокса колеблется от 25 до 36 % для металлургического кокса и до 50 % для полукокса, и зависит от влажности торфяного сырья, ботанического состава, плотности и метода коксования. Теплотворная способность кокса колеблется от 27,21 до 33,49 МДж/кг (низшая — для полукокса). Влажность готового кокса составляет от 3 до 7 %.

Таблица 3
Сравнение характеристик каменноугольного и торфяного кокса

Продукт	Содержание в сырье, %		Содержание в готовой стали, %	
	S	P	S	P
Каменно-угольный кокс	0,40–1,40	0,15–0,40	0,020–0,025	0,020–0,025
Торфяной кокс	0,10–0,30	0,03–0,04	0,004–0,020	0,008–0,020

Таблица 4
Выход продуктов полукоксования на сухую массу (%) и на горючую массу торфа (%)

Степень разложения, %	Полукокс	Деготь	Пирогенетическая вода	Газ
15	38,8	7,4	28,8	25,0
30	39,3	16,2	21,4	23,1
50	42,4	16,2	19,1	22,3
530	37,7–46,8	13,9–18,5	10,3–22,0	23,6–31,4
700	33,4–39,0	14,1–18,5	10,6–23,3	25,6–37,8
820	31,0–38,4	14,5–18,4	10,4–23,6	26,6–40,1
900	30,0–36,8	13,6–19,1	10,2–23,3	28,4–44,1

По мере увеличения степени разложения исходного торфяного сырья выход твердых продуктов пиролиза и смолы увеличивается, а пирогенетической воды и газа снижается. Выход продуктов полукоксования магелланикум-торфа разной степени разложения и продуктов пиролиза при различных температурах для торфа степенью разложения 30–50 % приведен в **табл. 4**.

Повышенное содержание гуминовых кислот и негидролизующего остатка приводит к увеличению выхода твердых продуктов пиролиза, а битумов — к выходу смолы. Максимальное образование пирогенетической воды дают водорастворимые соединения, а газа — гуминовые кислоты [46].

Производство торфяного полукокса и кокса из окускованного торфа развивалось по пути непрерывно действующих печей с подводом тепла через стенку печи (внешний обогрев), путем ввода горячих газов в слой торфа (внутренний обогрев), смешением с нагретым твердым теплоносителем [44]. В настоящее время в Новотроицке Оренбургской области компания ООО «Углерод-14» проводит опытно-промышленную отработку коксования окускованного торфяного сырья в ретортах шахтного типа с обратной тепловой волной (обращенное дутье).

Полукокс и кокс повышенной механической прочности вырабатывают из верхового торфяного сырья средней степени разложения и могут быть получены в результате предварительной интенсивной механической переработки. Для окускования дисперсных материалов в металлургии применяют методы жесткой экструзии в шнековых прессах (**рисунок**) [47–49]. Технологии уплотнения используют в качестве средства повышения насыпной плотности сырья. Уплотнение также облегчает транспортировку, хранение и эффективность сжигания топлива [50].

Влияние степени механической переработки торфяного сырья на физико-механические показатели кокса приведено в **табл. 5**. Увеличение общего объема пор и среднего размера пор повышает реакционную способность кокса [52].

Сравнительно низкая плотность торфяного полукокса и кокса определяет хорошую газопроницаемость засыпки



Экструзия торфяного сырья

Таблица 5

Влияние степени механической переработки торфяного сырья на физико-механические показатели кокса [46]

Показатель	Без переработки	Переработка торфяного сырья в			
		прессе	дробилке МДО	винтовом перетирателе	колоидной мельнице
Плотность, кг/м ³	200	400	700	1100	1400
Пористость, %	89	78	61	39	22
Сопротивление сжатию, МПа	<1	2–3	5–7	15–25	30–35

Таблица 6

Классификация торфяного сырья по прочности при производстве окускованной торфяной продукции [52]

Категория	Отношение ГКЛГ	Группа верхового торфа и степень разложения R
Прочная	<1,5	Моховая, травяно-моховая, травяная, $20 \leq R \leq 35$
Среднепрочная	1,5–2,0	Древесно-моховая, травяно- моховая, $35 \leq R \leq 50$
Низкопрочная	>2,0	Древесная, древесно- травяная, $R \geq 50$

из этих материалов. Торфяной полукокс и кокс крупностью 7–10 мм обладают высоким электрическим сопротивлением.

Температура пиролиза, °С	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м
550	$1 \cdot 10^8$
700	$2,4 \cdot 10^3 - 5,0 \cdot 10^6$
900	$1 \cdot 10^3$

Присутствие мелких коллоидных частиц способствует процессу уплотнения торфяного сырья при экструзии. С увеличением степени разложения торфа прочность окускованной продукции торфа повышается до определенного значения, а потом резко падает. Из факторов группового состава наибольшее влияние на прочность окускованной продукции оказывают гуминовые кислоты (ГК) и легкогидролизуемые соединения (ЛГ) [52]. В табл. 6 приведена классификация торфяного сырья по прочности при производстве окускованной торфяной продукции.

Заключение

На основании существующей тенденции к повышенному интересу в области новых энергетических технологий,

наличию сложившегося спроса, реальному отсутствию конкуренции производителей модернизированной топливной продукции на российском рынке, наличию практически неисчерпаемых ресурсов сырья можно сделать вывод, что организация в России производства окускованного торфяного топлива является своевременной и актуальной.

Перспективы использования торфяного сырья в металлургии следующие:

- большинство районов с развитой металлургической промышленностью, работающих на дальнепривозном углеродистом топливе, имеют собственные значительные запасы торфяного сырья;

- верховые виды торфа являются сравнительно малозольными с низким содержанием серы и фосфора; при экструзии торфяного сырья получают достаточно прочную и плотную окускованную продукцию заданной формы и размеров;

- свойства получаемого торфяного кокса и полукокса (высокая реакционная и поглотительная способность, легкость активации, высокое электрическое сопротивление) определяют эффективность использования в качестве углеродистого восстановителя.

Возобновление исследований по термической конверсии торфяного сырья на современной технической основе может оказаться целесообразным. В связи с этим представляется полезным учесть уже имеющийся опыт использования продуктов термической конверсии торфяного сырья для использования в металлургических процессах. ЧМ

Библиографический список

См. англ. блок

"Chernye metally", 2024, No. 9, pp. 9–14
DOI: 10.17580/chm.2024.09.02

Analysis of prospects of thermal conversion of peat raw materials and their use in ferrous metallurgy**Information about authors**

A. V. Mikhaylov, Dr. Eng., Prof., Dept. of Mechanical Engineering¹,
e-mail: mikhaylov_av@pers.spmi.ru;

V. Yu. Bazhin, Dr. Eng., Prof., Head of the Dept. of Metallurgy¹,
e-mail: bazhin_vyu@pers.spmi.ru;

V. Yu. Piiraynen, Dr. Eng., Prof., Dept. of Materials Science¹,
e-mail: piiraynen_vyu@pers.spmi.ru

¹ Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, St. Petersburg, Russia

Abstract: The article discusses the current state and prospects for the use of alternative carbon-containing materials as feedstock for coke production for the purpose of partial or complete substitution of coal in metallurgical processes and the desirable properties of alternative fuels

that contribute to such substitution. Partial substitution of coking coal with low-grade fuels of low degree of metamorphism is identified as a promising approach for effective reduction of coal coke consumption and expansion of raw material bases of low-grade fuels. Actual, for expansion of energetic and technological properties of carbon-containing components for the purpose of increase of efficiency and quality of metallurgical processes is the study of questions of use of products of thermal processing of peat raw materials. The achieved level of technologies of thermal conversion of peat raw materials and the main ways of technology development in the field of thermal processing of peat raw materials were analyzed, taking into account the accumulated earlier experience. On the basis of the conducted experiments, it can be concluded that coke obtained from peat raw materials is characterized by high reactivity. Interest in the use of peat raw material for coke production is due to its availability and much lower price compared to commonly used hard coking coals. The analysis of existing peat bases and prospects of their development was considered, which allowed to outline the possible location of combined production complexes. Initial peat raw materials are converted into pelletized materials by extrusion through pre-mechanochemical processing before they can be used in the production of iron and steel.

Key words: metallurgical coke, caustobiolites, peat raw materials, raw material bases, thermal steel industry, conversion of peat.

References

- Litvinenko V. S., Petrov E. I., Vasilevskaya D. V., Yakovenko A. V. et al. Assessment of the state role in the mineral resources management. *Zapiski Gornogo instituta*. 2023. Vol. 259. pp. 95–111. DOI: 10.31897/PMI.2022.100.
- Trushko V. L., Trushko O. V. Integrated development of iron ore deposits based on competitive underground geotechnologies. *Zapiski Gornogo instituta*. 2021. Vol. 250. No. 4. pp. 569–577. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.10.
- Kuskov V. B., Sishchuk Yu. M. Improvement of beneficiation technologies for iron ores of various type and material constitution. *Gornyi Zhurnal*. 2016. No. 2. pp. 70–73.
- Brooks B., Khoshk Rish S., Lomas H., Jayasekara A. et al. Advances in low carbon cokemaking – Influence of alternative raw materials and coal properties on coke quality. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2023. Vol. 173. 106083. DOI: 10.1016/j.jaap.2023.106083.
- Feshchenko R. Yu., Erokhina O. O., Litavrin I. O., Ryaboshuk S. V. Improvement of oxidation resistance of arc furnace graphite electrodes. *Chernye Metally*. 2023. No. 7. pp. 31–36.
- Nazarenko M. Y., Saltykova S. N., Rudko V. A., Pihl O. Production of isotropic coke from shale tar at various parameters of the delayed coking process. *ACS Omega*. 2021. Vol. 6, Iss. 34. pp. 22173–22179.
- Campos A. M. A., Assis P. S. Analysis of the influence of biomass addition in coal mixture for metallurgical coke production. *Global Journals of Research in Engineering*. 2021. Vol. 21, Iss. (E2). DOI: 10.34257/GJREEVOL21IS2PG1.
- Shagan V. A., Makarova I. V., Manasheva E. M., Baychenko S. A. et al. Prospects for the development of coke blast furnace processing. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva*. 2015. No. 2 (17). pp. 5–10.
- Mousa E., Wang C., Riesbeck J., Larsson M. Biomass applications in iron and steel industry: An overview of challenges and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 65. pp. 1247–1266.
- Bazhin V. Yu. Structural modification of petroleum needle coke by adding lithium on calcining. *Coke and Chemistry*. 2015. Vol. 58. No. 4. pp. 138–142. DOI: 10.3103/S1068364X15040043.
- Babich A., Arnsfeld S., Senk D., Gudenau H. W. Investigation of usage of biomass in steelmaking. *Proceedings, International Workshop on Utilisation of Biomass for Mitigation of CO₂ Emissions, Sendai, Japan, 2011*. pp. 2.1/17.
- Jahanshani S., Mathieson J. G., Somerville M. A., Haque N. et al. Development of low-emission integrated steelmaking process. *J. Sustain. Metall.* 2015. Vol. 1. pp. 94–114. DOI: 10.1007/s40831-015-0008-6.
- Babich A., Senk D., Solar J., Marco I. Efficiency of biomass use for blast furnace injection. *ISIJ International*. 2019. Vol. 59. No. 12. pp. 2212–2219. DOI: 10.2355/isijinternational. ISIJINT-2019-337.
- Carvalho L. A. L., Campos A. M. A., Assis P. S. Quality evaluation of metallurgical coke produced with sawdust and different mixture of coal. *REM, International Engineering Journal*. 2021. Vol. 74, Iss. 2. pp. 219–223. DOI: 10.1590/0370-44672020740115.
- Rudko V. A., Gabdulkhakov R. R., Pygay I. N. Scientific and technical substantiation of the possibility of organizing the production of needle coke in Russia. *Zapiski Gornogo instituta*. 2023. Vol. 263. pp. 795–809.
- Khanna R. N., Kejiang Li, Ziming Wang, Minmin Sun et al. Biochars in iron and steel industries. *Char and Carbon Materials Derived from Biomass*. 2019. pp. 429–446. DOI: 10.1016/B978-0-12-814893-8.00011-0.
- Taibi E., Gielen D., Bazilian M. The potential for renewable energy in industrial applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16, Iss. 1. pp. 735–744. DOI: 10.1016/j.rser.2011.08.039.
- Gabdulkhakov R. R., Rudko V. A., Pygay I. N. Methods for modifying needle coke raw materials by introducing additives of various origin (review). *Fuel*. 2022. Vol. 310. 122265. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.122265.
- Rejdak M., Bigda R., Wojtaszek M. Use of alternative raw materials in coke-making: new insights in the use of lignites for blast furnace coke production. *Energies*. 2020. Vol. 13. 2832. DOI: 10.3390/en13112832.
- Islamov S. R. Energy-technological processing of coals: monograph. Krasnoyarsk : Polikor, 2010. 224 p.
- Aleksandrova T. N. Key directions in processing of carbonaceous rocks. *Journal of Mining Institute*. 2016. Vol. 220. pp. 568–572. DOI: 10.18454/PMI.2016.4.568.
- Glukharev N. F., Ivakhnyuk G. K., Levinson V. G., Malkov V. A. et al. Method of processing peat into large-piece carbon reducing agent. Patent RF, No. 2083636. Applied: 13.11.1995. Published: 10.07.1997.
- Tarasevich M. R. Electrochemistry of carbon materials. Moscow : Nauka, 1984. 253 p.
- Matskevich E. S., Alekseenko Yu. I., Kulsly L. A. On the activation energy and conductivity mechanism in active coals. *Doklady Akademii nauk SSSR*. 1978. Vol. 239. No. 5. pp. 1147–1149.
- 2023 global crude steel production totals. Available at: <https://worldsteel.org/media/press-releases/2024/december-2023-crude-steel-production-and-2023-global-totals/> (accessed: 22.05.2024).
- Steel production in Russia and the world in 2023. Available at: <https://www.mashprom.ru/press/news/proizodstvo-stali-v-rossii-i-mire-v-2023-godu/> (accessed: 22.05.2024).
- Coke and semi-coke; of coal, lignite or peat, whether or not agglomerated; retort carbon. Available at: <https://oec.world/en/profile/hs/coke> (accessed: 22.05.2024).
- GOST 5.1261–2023. Carboniferous blast furnace coke. Quality requirements for products. Introduced: 01.02.2024.
- Strakhov V. M., Gritsenko N. G. Use of anthracite for smelting cast iron in cupola furnaces. *Koks i khimiya*. 1997. No. 7. pp. 11–15.
- Feoktistov A. V., Skuratov A. P., Selyanin I. F., Temlyantsev M. V. Practice and prospects of industrial application of low-shaft furnaces. *Vestnik Rossiyskoy akademii estestvennykh nauk. Zapadno-Sibirskoe otdelenie*. 2016. No. 18. pp. 69–77.
- Loison R., Foch P., Boyer A. Coke: quality and production. 2nd ed. London; Boston : Butterworths-Heinemann, 1989. 555 p.
- Dyskina B. Sh., Smolyakova K. R. Caustobiolites: textbook. Chelyabinsk : Izdatelskiy tsentr YuUrGU, 2012. 48 p.
- Mastalerz M., Drobnik A., Hower J. C., O'Keefe J. M. K. Spontaneous combustion and coal petrology. *Coal and Peat Fires: A Global Perspective*. Elsevier, 2011. pp. 47–62.
- Betancur Y., Lopez D., Feng J., Du Z. et al. Influence of potassium carbonate catalysis and pre-treatment atmosphere on the textural, structural, and chemical properties of high and low rank coals blended with biomass and their reactivity under conventional and oxy-combustion processes. *Energy*. 2021. Vol. 220. 119602. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119602.
- Xu Jiren, Morris P., Liu Junguo, Holden J. PEATMAP: Refining estimates of global peatland distribution based on a meta-analysis. *Catena*. 2018. Vol. 160. pp. 134–140. DOI: 10.1016/j.catena.2017.09.010.
- Mikhaylov A. V., Ivanov S. L., Bolshunov A. V. et al. Peat resources of the Northwestern Federal District of Russia and prospects for their development. *Zapiski Gornogo instituta*. 2013. Vol. 200. pp. 226–230.
- Grevtsev N. V., Amdur A. M., Forshev A. A., Fedorov S. A. et al. Study of the possibility of using peat as a component of pulverized coal fuel in metallurgical processes. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 2023. No. 4. pp. 93–103. DOI: 10.21440/0536-1028-2023-4-93-103.
- Yampolsky A. L. Economics of the complex use of peat resources of the USSR. Moscow : Nedra, 1979. 319 p.
- Gleber I. V., Smolyaninov S. I. On the prospects for the development of metallurgical and chemical industries in the Tomsk region. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta*. 1964. Vol. 126. pp. 3–7.
- Gleber I. V., Smolyaninov S. I., Potapenko V. E., Kosolapov V. I. Effect of ore and flux additives on the properties of peat as a metallurgical fuel. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta*. 1961. Vol. 111. pp. 86–90.
- Smolyaninov S. I., Beskrovnaya R. A. Use of peat as a reducing agent and binder in the chlorination of some natural materials. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo instituta*. 1963. Vol. 112. pp. 107–111.
- Grevtsev N. V., Aleksandrov B. M., Plekhanov K. A. Prospects for the use of peat carbon-containing and ore-containing briquettes in metallurgical processes. *Izvestiya Uralskogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2003. Iss. 17. pp. 451–457.
- Kim V. A. New types of carbonaceous reducing agents for smelting technical silicon. *Stal*. 2017. No. 2. pp. 25–27.
- GOST 3340–88. Hard coal foundry coke. Specifications. Introduced: 01.01.1990.
- Oleynikova L. N., Gorbunov A. V., Rakhimova V. T., Tyrtseva K. E. Production of peat coke to replace coal coke and charcoal in metallurgical processes. *Energy and resource conservation. Energy supply. Alternative and renewable energy sources: Proceedings of the International scientific-practical conference. Yekaterinburg: UrFU, 2017*. pp. 571–574.
- Peat Guide. Edited by Lazarev A. V. and Korchunov S. S. Moscow : Nedra, 1982. 760 p.
- Bizhanov A., Kurunov I. Extrusion briquettes (brex) – a new stage in agglomeration of raw materials for ferrous metallurgy. Moscow : Metallurgizdat, 2017. 234 p.
- Mikhaylov A. V., Zyuzin B. F., Zhigulskaya A. I. Technological equipment for processing organogenic raw materials: monograph. Tver : Izdatelstvo Kondratyev A. N. 2023. 192 p.
- Kuskov V. B., Ilyin E. S. Study of the process of agglomeration of various types of raw materials by the extrusion method. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten*. 2022. No. 6-1. pp. 279–289. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_61_0_279.
- Wang Z. Energy and air pollution. Comprehensive energy systems. Elsevier, 2018. pp. 909–949. DOI: 10.1016/B978-0-12-809597-3.00127-9.
- Patrick J. W., Walker A. Macroporosity in cokes: Its significance, measurement, and control. *Carbon*. 1989. Vol. 27. pp. 117–123. DOI: 10.1016/0008-6223(89)90164-4.
- Terentyev A. A. Management of structure formation in peat systems during production of household fuel: thesis of inauguration of Dissertation ... of Doctor of Engineering Sciences. Minsk, 1989. 45 p.