

УДК 662.642.74

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОЛОДЫХ БУРЫХ УГЛЕЙ ХАНДИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ

© 2019 г. Н. Г. Вязова^{1,*}, А. Г. Пройдаков¹, Л. П. Шаулина^{1,**}, А. Ф. Шмидт¹

¹ Институт нефте-и углехимического синтеза Иркутского государственного университета
664003 Иркутск, Россия

*e-mail: suslov@chem.isu.ru

**e-mail: shaulinalp@mail.ru

Поступила в редакцию 29.05.2018 г.

После доработки 28.08.2018 г.

Принята к публикации 24.10.2018 г.

Определены основные характеристики бурых углей марки 1Б Хандинского месторождения. Угли малосернистые. Содержание битумных веществ варьируется от 1.5 до 17.5%, среднее содержание восков в битумах — 61.8%. Концентрация гуминовых кислот — 40–70%. Установлен выход экстрактов, восков и смол из изученных углей различными экстрагентами и даны их характеристические показатели. Уголь Хандинского месторождения может быть перспективным сырьем для получения буроугольного воска, углещелочных реагентов и препаратов гуминовых кислот.

Ключевые слова: уголь, битумы, воски, смолы, зола, гуминовые кислоты

DOI: 10.1134/S0023117719030113

В данной работе представлен обобщенный материал, полученный ранее в процессе многолетнего изучения состава и свойств битуминозных бурых углей Хандинского месторождения.

Хандинское месторождение бурых углей расположено в Иркутской области в 40 км от Байкало-Амурской магистрали (станция Магистральная) у истоков реки Ханда. Запасы углей составляют по категории $C_1 + C_2$ около 2 млрд т, в том числе битуминозных по категории $C + P_2$ — 669.7 млн т. Запасы битумов в битуминозных углях — 38470.2 тыс. т, в слабобитуминозных — 23163.2 тыс. т. Среднее содержание восков в битумах — 61.8%. Угли располагаются в виде мощной залежи (50–300 м), в которой выделяется несколько самостоятельных пластов. Исследованные образцы углей из семи скважин Хандинского месторождения (их более 200) относятся к низкой стадии метаморфизма марки 1Б ($R_0 = 0.24–0.29$) и характеризуются высоким содержанием рабочей влаги (от 30 до 55%). Петрографический состав углей неоднороден: преобладающей в них является группа гуминита (от 40 до 90%); содержание группы липтинита от 2 до 8%, группа инертинита содержится в небольших количествах — до 4%, но в единичных пробах — до 13% [1].

По глубине залегания углей наблюдается переменение их разновидностей. Для всех углей характерен высокий выход летучих веществ (выше 50%) на сухую беззольную массу (*daf*); зольность

(без прослоев) — от средней до высокой (от 12 до 38%). Угли малосернистые: 60% образцов содержат менее 1% серы, в остальных пробах — концентрация S не превышает 1.7% и только в отдельных образцах ее концентрация достигает 5–7% на *daf*. Элементный состав (% на *daf*) исследованных углей варьируется в диапазоне 53–69; 5.1–6.6; 0.65–1.27 и 24.15–30.00 для C, H, N и O соответственно. Высшая теплота сгорания (Q_s^{daf}) изученных углей составила 24.5–29.5 МДж/кг. Выход смолы полукоксования — от 6.9 до 17.3% на *daf*.

Минеральная часть углей представлена α -кварцем, глинистыми минералами (каолинитом, смесью иллита и галлуазита), гипсом. Иногда прослеживается пирит, кальцит, сидерит.

Согласно результатам химического анализа, в золах углей наблюдаются большие колебания в содержании оксидов (%): SiO_2 (17.36–74.33), Al_2O_3 (8.15–32.55), Fe_2O_3 (4.37–35.96), CaO (1.13–16.80), MgO (0.59–5.80). Зола изученных углей легко- и среднеплавкие [1].

В углях Хандинского месторождения физическими и химическими методами анализов обнаружено около 50 макро- и микроэлементов (токсичных, потенциально токсичных и полезных). В изученных углях содержание (г/т угля): Mn 27–1047, Cu 38–251, Ni 10–259, Cr 21–186, V 30–161. Концентрация Hf, Nb, Zn, Ba, La, Li, Sr, B, Y в зо-

Таблица 1. Выход экстрактов, восков и смол из углей Хандинского месторождения

Скважина, количество проб	Глубина залегаания, м	Экстрагент	Выход, %		
			экстракт	воск	смола
29; 12	81.4–133.1	Бензол	$\frac{3.4-9.4}{4.9}$	51.3–63.8	36.2–48.7
29; 12	81.4–133.1	Этанол-бензол (1:1)	$\frac{5.3-16.7}{9.8}$	44.0–76.0	23.2–55.8
30; 14	102–151.3	Бензол	$\frac{1.4-8.2}{4.3}$	53.6–61.4	38.6–46.4
30; 14	102–151.3	Этанол-бензол (1:1)	$\frac{8.8-17.5}{12.7}$	43.0	57.0
31; 32	51.0–200.8	Бензол	$\frac{5.6-8.2}{7.2}$	45.2–65.2	34.8–54.8
31; 32	51.0–200.8	Этанол-бензол (1:1)	$\frac{8.3-30.8}{13.7}$	49.3–75.7	24.2–50.7

Примечание. Выход экстракта определен на сухую беззольную массу угля, выход восков и смол — на экстракт. В числителе указаны минимальные и максимальные содержания, в знаменателе — средние значения.

Таблица 2. Характеристические показатели экстрактов и восков, выделенных из углей Хандинского месторождения

Экстрагент	Выход, %		Кислотное число	Эфирное число	Температура каплепадения, °С
	экстракт	воск	мг КОН/г		
Бензол	1.4—9.4	65.2	37	81	75
Бензин	3.6—4.6	78.0	28	52	78
Дихлорэтан	5.3—6.0	75.8	38	77	80
Этанол	2.9—4.0	52.4	61	61	40
Толуол	5.0—13.2	77.2	49	58	80
Этанол-бензол	5.3—30.8	76.1	52	138	82
Этанол-толуол	7.5—26.8	71.0	60	60	80

лах углей колеблется в пределах от нескольких граммов до двухсот (г/т).

Содержание токсичных элементов Pb, F, Hg, As, Be и Cd невысокое, ниже кларка в бурых углях и предположительно опасной концентрации [2]. Так, в изученных углях (г/т угля): Pb 1–5.6; F < 200–430; Hg 0.05–0.1; As 2–13; Be 1.2–3.0; Cd не обнаружен [3].

При исследовании образцов углей из скважин 606, 612, 29–31 Хандинского месторождения на содержание в них битума (ГОСТ 10969-91) использовали различные растворители [4]. Экстракцию проводили в аппаратах Грефе в течение 4–24 ч. Установлено, что за 4 ч экстрагируется около половины от общего количества экстрактивных веществ, за 24 ч выделяется наибольшее их количество. В табл. 1, 2 приведены результаты, из которых следует, что выход экстрактов уменьшается в ряду: этанол-бензол > этанол-толуол >

> толуол > бензол > дихлорэтан > бензин марки БР1 > этанол. Так, при экстракции этанол-бензольной смесью из угля выделяется до 30.8% битума, а бензином — до 4.6%. Для аналогичных углей Александрийского месторождения выход спирто-бензольного экстракта составляет 8–12%, а бензинового — 2–6%.

Существует взаимосвязь между петрографическим составом углей и содержанием в них битума. Повышенное количество битума обнаружено в изученных пробах угля, содержащего значительное количество липтинита. Добавка поверхностно-активных веществ (ПАВ) к экстрагенту увеличивает выход битумов. Наиболее активны (в качестве ПАВ) одноатомные полиалкилфенолы марок ОПК и П-23. Так, добавки ОПК и П-23 в количестве 1% увеличивают выход битума на 50 и 24% соответственно. Диметилсульфат, карбоксиметилцеллюлоза и олигомер винилового эфира

моноэтаноламина не оказали существенного влияния на выход битумов из углей. Выделенный из битума воск имел в основном темно-бежевую окраску, в случае бензинового и дихлорэтанового экстрактов — светло-бежевую.

Наибольшее количество воска (%) содержат (табл. 2) бензиновый экстракт (~78), толуольный (~77) и спирто-бензольный (~76). Спирто-бензольные, бензольные и дихлорэтановые экстракты из угля Александрийского месторождения содержат 20–30% смол (соответственно восков 70–80%); те же экстракты из южно-уральских бурых углей — 60–70% смол (восков 30–40%).

Характеристические показатели восков зависят от применяемого экстрагента. Количество кислот, как следует из результатов табл. 2, в восках бензольного, бензинового и дихлорэтанового экстрактов значительно меньше, чем в восках спирто-бензольного и спирто-толуольного экстрактов.

Более детально рассмотрен спирто-бензольный экстракт. За 24 ч экстракции спирто-бензольной смесью извлекается от 5.3 до 30.8% экстрактивных веществ, а по скважинам выход составляет (%): 9.8; 12.7 и 13.7, соответственно, для углей из скважин 29, 30 и 31. Более высокое содержание экстрактов отмечено в углях из скважин 30 и 31 на глубине от 114 до 125 м.

Битумы спирто-бензольного экстракта имеют следующий элементный состав (% на *daf*): С 72–7, Н 9–10, О 10–16. Кислотное число изменяется от 46 до 57 мг КОН/г, эфирное — от 99 до 263 мг КОН/г, число омыления колеблется от 133 до 270 мг КОН/г. Температура каплепадения (по Уббеллоде) изменяется от 77 до 82°C [4]. Соответствующие экстракты южно-уральских углей имеют кислотное число 41 мг КОН/г, александрийских — 32 мг КОН/г, число омылений 113–203 и 133–270 мг КОН/г соответственно. По количеству непредельных структур спирто-бензольные экстракты изученных углей мало отличаются от аналогичных экстрактов других месторождений. Температура каплепадения спирто-бензольных экстрактов из александрийских углей 89°C, южно-уральских — 70–95°C.

Методом ядерного магнитного резонанса на ядрах ^1H (ЯМР ^1H) определено распределение протонов по структурным фрагментам битумов (табл. 3). В спектрах ЯМР ^1H имеются в основном сигналы алифатических фрагментов со средней длиной цепи 5–7 углеродных атомов. Содержание ароматических структур незначительно, а степень их замещения алкильными группами высока. Олефиновые и кислородсодержащие (эфирные) структуры также присутствуют в незначительных количествах.

Таблица 3. Относительное распределение протонов по структурным фрагментам битумов (доли)

$\text{H}_{\text{альд}}$	$\text{H}_{\text{ар}}$	$\text{H}_{\text{ОН + ол}}$	H_{α}^1	H_{α}	H_{β}	H_{γ}
3.0×10^{-4}	0.03	0.02	0.03	0.08	0.62	0.22

Примечание. $\text{H}_{\text{альд}}$ — атомы водорода в альдегидных группах; $\text{H}_{\text{ар}}$ — атомы водорода в ароматических структурах; $\text{H}_{\text{ОН + ол}}$ — атомы водорода в гидроксильных группах и олефинах; H_{α}^1 — атомы водорода в алкоксигруппе; H_{α} — атомы водорода в α -положении к ароматическому кольцу и олефиновому фрагменту; H_{β} — атомы водорода в β -положении к ароматическому кольцу или в метиленовых и метиновых группах; H_{γ} — атомы водорода в концевых метильных группах.

Показано, битумы углей данного месторождения состоят из смесей длинноцепочечных алифатических сложных эфиров, спиртов и кислот.

В результате исследования хандинских углей на битуминозность авторы [4] указывают на возможность нетопливного использования данных углей — как потенциальное и перспективное сырье для промышленного получения горного воска. Горный воск и продукты его переработки используются более чем в 200 отраслях промышленности. Россия импортирует дефицитный и дорогой буроугольный воск, поскольку до настоящего времени нет отечественного его производства [5]. Гуминовые кислоты в отличие от битумов являются одним из основных компонентов, составляющих органическую массу углей, а для землистых бурых углей — преобладающую. Угли Хандинского месторождения характеризуются высоким содержанием ГК (40–70%), половина из которых (а в некоторых пробах и более) свободные. Свободные ГК, извлекаемые (ГОСТ 9517-94) однократной экстракцией гидроксидом натрия (без предварительной обработки пирофосфатом натрия или минеральной кислотой), составляют 50–70% от общего количества гуминовых кислот в угле.

Фракционирование гуминовых кислот в ацетоне показало (табл. 4), что основная часть их представлена гумусовыми кислотами (до 93%), а содержание гиматомелановых кислот составляет всего 7%. Все препараты различаются как по выходам, так и по зольности, но близки по элементному составу. ГК, извлекаемые гидроксидом аммония, являются менее обуглероженными. Функциональный состав кислот содержит (мг-экв/г): фенольных гидроксидов 5.38–6.32, карбонильных до 10.86 и карбоксильных групп 2.18–4.54.

Установлено, что гуминовые кислоты, выделенные водным раствором аммиака, содержат больше кислорода (32.88%) и активных кислых групп (13.24 мг-экв/г), чем в препаратах, выделенных водным раствором гидроксида натрия [4].

Свободные ГК, извлекаемые из хандинских углей гидроксидами натрия и аммония, проанализированы методом ЯМР ^{13}C и ^{17}O , позволяющим судить не только о количестве функциональных групп, но и о том, в какие структурные фрагменты они входят [6].

Выявлено различие в строении и составе гуминовых кислот в зависимости от способа их получения. Гуминовые кислоты, выделенные более слабым основанием (NH_4OH), имеют в своем составе больше активных кислых групп, чем ГК, извлекаемые гидроксидом натрия. Показаны некоторые существенные различия в содержании функциональных групп гуминовых кислот, определяемых химическим анализом и методом ЯМР ^{13}C . В сравнении с химическим анализом метод ЯМР является более информативным точным в определении.

В [7] изучен состав и строение растворимых (гиматомелановых) и нерастворимых (гумусовых) в ацетоне фракций ГК бурых углей Хандинского месторождения методами количественной спектроскопии ЯМР ^{13}C и ЭПР. Выявлены некоторые различия параметров спектров ЯМР ^{13}C и ^1H полученных фракций. Установлено, что в процессе экстракции происходит окисление ГК.

Авторами [8] разработана схема количественного определения состава и строения гуминовых кислот на основе совокупности их структурных параметров с использованием спектров ЯМР ^{13}C . Проведен анализ фрагментного состава ГК исходного бурого угля различных месторождений, а также подвергнутого предварительной механоактивации с применением метода ЯМР на ядрах ^{13}C . Дана оценка возможности использования этой информации для экспрессного тестирования свойств ГК как стимуляторов роста растений.

Изучение ИК-спектров исходного хандинского угля и свободных гуминовых кислот, выделенных гидроксидом натрия и гидроксидом аммония, показало наличие полос поглощения в области $1050\text{--}1230\text{ см}^{-1}$, указывающих на присутствие эфирных групп, спиртовых и фенольных гидроксидов. Интенсивные полосы поглощения в области $1600\text{--}1700\text{ см}^{-1}$ характерны для связей $\text{C}=\text{C}$ ароматических систем и карбонильных групп, а интенсивная полоса 3400 см^{-1} — для гидроксидов, связанных водородной связью. Наблюдаемое подобие ИК-спектров угля и гуминовых кислот объясняется значительным содержанием последних в органическом веществе угля.

Определение молекулярных масс гуминовых кислот методом гель-хроматографии на сефадексах Г-10, Г-23, Г-75, Г-100 показало, что свободные и общие ГК почти подобны по молекулярно-массовому распределению и содержат фракции с молекулярными массами от 3000 до 35000 у.е. [4].

В составе гуминовых кислот кроме свободных присутствуют еще и связанные кислоты (гуматы). В изученных углях преобладают гуматы щелочно-земельных элементов, железа и небольшое количество цветных и редких металлов (Co, Ni, V, Mo, Cu, Ti, Nb, Mn и др.).

Методом гель-хроматографии установлено, что кальций связан (на 70%) с низкомолекулярной частью гуминовых кислот, а Mg и Cu — в основном с высокомолекулярной, железо — со среднемолекулярной частью. Гуминовые кислоты по содержанию токсичных элементов (F, Hg, Pb, Be, Cd, As) являются экологически безопасными.

Данные рентгеноструктурного анализа гуминовых кислот хандинских углей показали, что большая часть их находится в свободном состоянии с значительным количеством активных кислородсодержащих групп, которые позволяют предположить более высокую биологическую активность ГК.

Полученные из природного угля гуминовые препараты (ГП) находят наиболее перспективное применение в сельском хозяйстве, медицине и технике [9–11]. Известны промышленные гуминовые препараты, производимые в Иркутске из окисленных иркутских бурых углей: гумат калия “Гумат” [12], “Гумат 80”, “Гумат +7” и др. “Гумат +7” содержит 80–88% солей гуминовых кислот (гуматов K, Na) и семь основных микроэлементов (Fe, Cu, Zn, Mn, Mo, Co, B), необходимых для жизнедеятельности растений. Гуматы из окисленных бурых иркутских углей по содержанию активного вещества и количеству функциональных фрагментов существенно превосходят аналогичную продукцию других производств России [12].

Гуматы, полученные из угля Хандинского месторождения, испытаны в Иркутской области агрохимической службой “Иркутский”. Были поставлены вегетационные и полевые опыты. Прибавка урожая картофеля составила 20–30 ц/га. Урожай кукурузы возрос на 40%.

В [8, 13–16] показано, что повышение выхода ГК из бурых и каменных углей может быть достигнуто их активацией различными методами. В [17, 18] приведены положительные результаты выхода ГК из углей Хандинского и других месторождений в результате механохимической активации и окислительной механодеструкции полученных в разных условиях. В результате использования указанных методов повышается выход ГК, а также их физиологическая активность по отношению к сельскохозяйственным культурам, которая подтверждена полевыми испытаниями. Урожайность зерновых культур повышается на 25–35%.

Адсорбционные продукты, полученные из природных и активированных бурых углей, находят широкое применение в процессах очистки

Таблица 4. Характеристика гуминовых кислот и их фракций

Гуминовые кислоты	W^a , %	A^d , %	Элементный состав, % на daf			Активные кислые группы, мг-экв/г			Выход ГК, % на daf
			C	H	O + S	ОН + COOH	ОН	COOH	
Общие	8.20	11.08	63.57	5.17	31.26	10.86	6.32	4.54	100
Гиматомелановые	8.14	2.84	63.31	6.81	29.88	7.56	5.38	2.18	7.3
Гумусовые	8.03	11.60	63.64	4.69	31.67	9.20	6.02	3.18	92.7
Свободные гуминовые кислоты, извлекаемые:									
NaOH	8.62	3.66	64.43	4.59	30.98	9.65	6.27	3.38	41.0
NH ₄ OH	8.40	4.20	61.50	5.62	32.88	13.24	5.71	7.53	20.0

Таблица 5. Характеристика глинистых буровых растворов

Состав глинистых растворов	Плотность раствора, г/см ³	Условная вязкость раствора, с	Статическое напряжение сдвига, Па		Водоотдача, (см ³) за 30 мин
			CHC ₁	CHC ₁₀	
Глина + 3% КОН	1.07	6	47	57	13
Глина + 5% УЩР из угля Хандинского месторождения	1.06	5	9	26	13.5
Глина + 7% УЩР из угля Хандинского месторождения	1.07	5	8	27	13
Глина + 5% УЩР из угля КАУ	1.07	5	26	41	10.5
Глина + 7% УЩР из угля КАУ	1.07	5	25	38	10

природных, грунтовых и сточных вод, газовых выбросов и т.д. [19–21].

Гуминовые кислоты, полученные из углей Хандинского месторождения, были использованы в качестве адсорбента по отношению к водным растворам сульфатов и хлоридов металлов Са, Mg, Mn, Fe, Ni, и Cu [22]. Результаты исследования показали, что ионообменное равновесие наступает за 3 ч контакта фаз. Адсорбция ионов металлов на гуминовых кислотах в сернокислой среде протекает несколько лучше, чем в солянокислой. Наибольшая ионообменная емкость ГК из числа рассматриваемых ионов металла отмечается в случае Cu²⁺, наименьшая — для Mg²⁺.

Одним из числа многих ГП является углещелочной реагент (УЩР). Основная масса углещелочных препаратов потребляется в нефтяной промышленности при бурении скважин в качестве стабилизатора и регулятора свойств глинистых буровых растворов (БР). Кроме того, они используются в качестве связующего при брикетировании и агломерации железных руд и концентратов [23, 24].

Порошкообразный реагент УЩР, полученный в лабораторных условиях Института нефте- и углехимического синтеза при Иркутском государственном университете, прошел с положительным эффектом в научно-исследовательском ин-

ституте геологии, геофизики и минерального сырья (ВостСибНИИГГ и МС, Иркутск). Из полученного УЩР приготовлены реагенты для улучшения качества промывочных глинистых растворов, применяемых при бурении нефтяных скважин.

Свойства глинистых растворов характеризуются показателями, принятыми в нефтяной промышленности: условная вязкость, статическое напряжение сдвига (CHC), показатель фильтрации (водоотдача). С применением полученного УЩР были приготовлены глинистые буровые растворы по стандартной методике с использованием бентонитовой глины Черногорского края (Украина) с размером частиц < 1.5 мкм. Характеристика буровых растворов и влияние УЩР на их качество приведены в табл. 5. В качестве стандарта использовали суспензию, содержащую 10% глины и 3% каустической соды. БР готовили из расчета 10% глины, 2% гидроксида натрия, 5 и 7% УЩР. Статическое напряжение сдвига определяли на приборе CHC-2 через 1 и 10 мин, соответственно, CHC₁ и CHC₁₀, после приведения глинистого раствора в состояние покоя. Из данных таблицы следует, что удельный вес и вязкость суспензий почти постоянны.

Предельное статическое напряжение сдвига с повышением содержания УЩР понижается и

значительно для суспензий с УЩР из изученного угля по сравнению с данным показателем для угля Канско-Ачинского бассейна (КАУ). Это свидетельствует о том, что угли Хандинского месторождения более предпочтительны, чем КАУ, для производства углещелочных растворов.

Таким образом, проведенные исследования показали, что угли Хандинского месторождения могут рассматриваться как потенциальное сырье для производства воска по технологии, заключающейся в подготовке углей (измельчение, сушка), экстракции, регенерации растворителя и выделения УЩР.

Хандинские угли можно рекомендовать для нетопливного использования в качестве сырья для получения биологически активных препаратов (углегуминовых стимуляторов роста растений, аммонизированных комплексных гранулированных органоминеральных композиций, компостов).

Остаточный уголь, полученный после обработки исходного угля аммиаком или другими реактивами (для получения ГП), может быть использован в производстве строительных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Покуль Т.В., Крюкова В.Н., Комарова Т.Н., Белоногова Л.Н., Лобанова Г.Л., Вязова Н.Г., Суслова М.Г. // ХТТ. 1988. № 1. С. 3.
2. Юдович Я.Ю., Кетрис М.П. Токсичные элементы-примеси в ископаемых углях. Екатеринбург: Наука, 2005. 596 с.
3. Вязова Н.Г., Шаулина Л.П., Шмидт Ф.К., Димова Л.М. // ХТТ. 2016. № 5. С. 45. DOI: 10.7868/S0023117716050091. [Solid Fuel Chemistry, 2016, vol. 50, no. 6, p. 316] DOI: 10.3103/S0361521916050098
4. Покуль Т.В., Парамонова Т.Г., Баранский А.Д., Крюкова В.Н. // ХТТ. 1989. № 3. С. 19.
5. Жеребцов С.И. Алкилирование спиртами твердых горючих ископаемых низкой степени углефикации: Дис. ... докт. хим. наук. Кемерово, 2016. 314 с.
6. Калабин Г.А., Чеченина Т.Е., Парамонова Т.Г., Кушнарев Д.Ф. // ХТТ. 1997. № 2. С. 19. [Solid Fuel Chemistry, 1997, vol. 31, no. 2, p. 17]
7. Чеченина Т.Е., Пройдаков А.Г., Кушнарев Д.Ф. // ХТТ. 1998. № 5. С. 29.
8. Бямбагар Б., Кушнарев Д.Ф., Федорова Т.Е., Новикова Л.Н., Яковлева Ю.Н., Островская Р.М., Пройдаков А.Г., Калабин Г.А. // ХТТ. 2003. № 1. С. 83.
9. Неверова О.А., Мосиячина Н.Н., Жеребцов С.И., Исмаилов З.Р. // Электронный журнал: "Современные проблемы науки и образования". 2012. № 6. <http://www.science-education.ru/106-7519>
10. Лиштван И.И., Дударчик В.М., Крайко В.М. // ХТТ. 2017. № 5. С. 3. DOI: 10.7868/S0023117717050012. [Solid Fuel Chemistry, 2017, vol. 51, no. 5, p. 267]. DOI: 10.3103/S0361521917050056
11. Чуманова Н.Н., Анохина О.В., Жеребцов С.И., Малышенко Н.В., Исмаилов З.Р. // Альтернативная энергетика и экология. 2014. № 3. С. 32.
12. Левинский Б.В., Калабин Г.А., Кушнарев Д.Ф., Бутырин М.В. // Химия в сельском хозяйстве. 1997. № 2. С. 30.
13. Шендрик Т.Г., Тамаркина Ю.В., Кучеренко В.А., Грибанова А.С. // ХТТ. 2011. № 5. С. 16 [Solid Fuel Chemistry, 2011, vol. 45, no. 5, p. 303]. DOI: 10.3103/S0361521911050107
14. Кузнецов П.Н. // ХТТ. 2013. № 6. С. 19. DOI: 10.7868/S0023117713060066 [Solid Fuel Chemistry, 2013, vol. 47, no. 6, p. 329] DOI: 10.3103/S0361521913060062
15. Савельева А.В., Иванов А.А., Юдина Н.В., Ломовский О.И. // ХТТ. 2015. № 4. С. 3. DOI: 10.7868/S002311771504009X [Solid Fuel Chemistry, 2015, vol. 49, no. 4, p. 201] DOI: 10.3103/S0361521915040096
16. Пройдаков А.Г., Полубенцев А.В., Кузнецова Л.А. // Химия в интересах устойчивого развития. 2005. Т. 13. № 5. С. 641.
17. Пройдаков А.Г. // ХТТ. 2009. № 1. С. 13 [Solid Fuel Chemistry, 2009, vol. 43, no. 1, p. 9]. DOI: 10.3103/S0361521909010030
18. Пройдаков А.Г., Калабин Г.А., Пройдакова О.А. Уголь: окислительно-восстановительная механо-деструкция. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2013. 191 с.
19. Лиштван И.И., Дударчик В.М., Крайко В.М. // Докл. НАН Беларуси. 2015. Т. 59. № 3. С. 97.
20. Вязова Н.Г., Крюкова В.Н., Шаулина Л.П., Шмидт А.Ф. // ХТТ. 2014. № 3. С. 27. DOI: 10.7868/S0023117714030104 [Solid Fuel Chemistry, 2014, vol. 48, no. 3, p. 170]. DOI: 10.3103/S0361521914030100
21. Кузнецов П.Н., Кузнецова Л.И., Кутихина Е.А. // ХТТ. 2008. № 3. С. 30 [Solid Fuel Chemistry, 2008, vol. 42, no. 3, p. 153]. DOI: 10.3103/S0361521908030063
22. Вязова Н.Г., Крюкова В.Н., Латышев В.П. // ХТТ. 1999. № 6. С. 47.
23. Куклина Г.Л., Соловов Ю.Г., Закиев Р.Б., Блохин Ю.Ф. // Горный информ.-анал. бюл. 2009. № 12. С. 130.
24. Шумейко М.В. // Горный информ.-анал. бюл. 2008. № 10. С. 373.