

Установлено, что при мольном соотношении $\text{NH}_3:\text{CS}_2 = 7:1$ достигается практически полное извлечение сероуглерода из органической фазы в водную в форме роданистых соединений.

Литература

1. Лейбович Р.Е., Обуховский Я.М., Сатановский С.Я. Технология коксохимического производства. — М: Metallurgy, 1966. — 463 с.
2. Коляндра Л.Я. Новые способы переработки сырого бензола. — М.: Metallurgy, 1976 — 192 с.
3. Химическая энциклопедия, т.4, под ред. Зефирова Н.С. — М.: Большая Российская энциклопедия, 1995. — 639 с.
4. Губен И. Методы органической химии. Т.III, Вып.3. — М.: ОНТИ, 1935 — 628 с.
5. Кульберг Л.М. Синтезы органических реактивов для неорганического анализа. — М: Госхимиздат, 1947 — 165 с.
6. Попов А.А., Рожнятовский И.И., Зайченко В.М. и др. Применение роданистых солей в органическом синтезе // Кокс и химия, 1973. — № 10. — С. 43–45.

© Крутько И.Г., Кипря А.В., Колбаса В.А., Комаров А.С., Сацюк К.А., 2010

Поступила в редакцию 21.10.2009 г.

УДК 87.53.13

Бутузова Л.Ф., Сафин В.А., Кипря А.В., Бутузов Г.Н., Шакир Ш.М. (ДонНТУ, ИнФОУ НАН Украины), **Маринов С., Стефанова М.** (Институт органической химии с центром фитохимии БАН, г. София)

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПЕРЕРАБОТКИ СЕРНИСТЫХ УГЛЕЙ

Исследованы выход и состав продуктов пиролиза в условиях полукоксования и термофильтрации каменных углей марки Ж восстановленного (ВУ) и слабовосстановленного (СВУ) типов.

Методами экстракции и последующей газо-хромато-масс-спектрометрии (ГХ/МС) насыщенных и ароматических фракций из жидких продуктов пиролиза выделено и идентифицировано 120 индивидуальных соединений. Показано, что сернистые угли дают больший выход жидких продуктов, чем малосернистые. Органическая масса СВУ подвергается более глубокому преобразованию в процессе пиролиза по сравнению с органической массой ВУ.

Ключевые слова: каменный уголь, смола, летучие органические соединения.

Источниками основной части промышленных отходов являются угледобывающая, коксохимическая промышленность, электроэнергетика и металлургия.

Значительная часть отходов этих производств выбрасывается в атмосферу, попадает в грунтовые воды или накапливается на ограниченной площади, загрязняя окружающую среду. В процессах переработки угля выделяются газообразные соединения CO_x , SO_x , NO_x (в окислительной среде) или H_2S , NH_3 (в восстановительной среде) и ядовитые органические соединения [1]. Свойства

загрязняющих выбросов зависят от содержания гетероатомов серы, кислорода, азота в сырье и условий обработки угля [2].

Проведенный нами ранее математико-статистический анализ (с использованием справочных данных) показал, что для донецких низкометаморфизованных углей имеет место линейная корреляционная связь между содержанием серы (S_o^{daf}) и выходом летучих веществ (V^{daf}) [3].

Среди летучих органических веществ полициклические ароматические углеводороды (ПАУ) и соединения на их основе являются самыми канцерогенными. ПАУ могут попадать в воду и почву [4], поглощаться растениями, животными, рыбой и проникать в организм человека.

В настоящее время законодательство Европейского союза устанавливает предельно допустимые концентрации оксидов серы, азота и углерода, но не указывает допустимые концентрации выбросов органических соединений.

Ежегодно на коксохимических заводах Украины образуется огромное количество таких отходов, как: фенолсодержащие сточные воды (30–40% df), выбросы в атмосферу (0,7–0,8% df), отходы химического крыла (0,10–0,15% df). Количество загрязняющих выбросов значительно возросло в последние годы в связи с увеличением использования низкокачественных углей.

В предыдущих работах [3, 5–12] мы подробно исследовали состав и свойства донецких углей с различным содержанием серы и кислорода. Установлено, что они по-разному ведут себя в процессах пиролиза. Показана высокая реакционная способность сернистых углей в реакциях, ответственных за процессы спекания, окускования, сшивки органических молекул [7]. Методом дифференциального термического анализа доказано, что высокосернистые низкометаморфизованные угли имеют в 1,8–2,0 раза более высокую скорость максимального разложения при нагревании по сравнению с изометаморфными малосернистыми углями. Эти данные находятся в полном соответствии с содержанием в экстрактах углей дибензотиофена и ароматических углеводородов и др. Кроме того, содержание органической серы коррелирует с отношением дибензотиофен/фенантрен и с содержанием биомаркеров (стеранов и гопанов) в угольных экстрактах [5].

Активные участки, прежде всего кислородсодержащие и серосодержащие функциональные группы, кислородные и серные мостики, самым существенным образом определяют механизм процесса пиролиза и, соответственно, состав образующихся продуктов [13, 14].

Серосодержащие группы принимают активное участие в реакциях образования и рекомбинации радикалов в процессах термической и термохимической деструкции спекающихся и неспекающихся углей. Они приводят к отщеплению боковых цепей в среднестатистической структурной единице органической массы угля, уменьшению рентгеноструктурного параметра L_a и увеличению количества парамагнитных центров [15].

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что проблема защиты окружающей среды требует дальнейшего сокращения количества отходов, а также утилизации и повторного использования ядовитых органических веществ, неспособных к разложению микроорганизмами. Обычно используемые методы уничтожения отходов, такие, как захоронение, сжигание и биологическое разложение, в случае с каменноугольными смолами оказываются неэффективными.

Одним из перспективных методов решения проблемы утилизации таких материалов является использование их в качестве добавок к шихте для коксования [16].

Получены данные, показывающие, что путем предварительной химической обработки углей можно направленно варьировать скорость пиролиза, выход тех или иных продуктов, а также структуру образующихся полукоксов, коксов [6].

Исследованы возможности утилизации полиэтилентерефталата в процессах полукоксования и коксования газовых углей разных типов по восстановленности. Показано, что добавка пластика в небольших количествах ($\approx 1\%$) является достаточной для увеличения ресурсов жидкой фазы пластической массы, что позволяет увеличить выход кокса с сохранением его прочностных характеристик, увеличить содержание в газе ценных горючих компонентов, таких как H_2 , CO , C_nH_m . Были отмечены существенные различия в ходе процессов термической деструкции низко- и высокосернистых углей [10].

Важно отметить, что угли с высоким содержанием гетероатомов могут быть использованы в качестве сырья для получения различных химических продуктов. Однако, эта возможность фактически не используется в настоящее время, поскольку низкосортные топлива главным образом сжигаются. В процессе горения они загрязняют окружающую среду оксидами SO_2 , NO_x и летучими органическими соединениями (ЛОС).

Целью настоящей работы является исследование влияния сернистости углей (ВУ и СВУ) и условий их термической переработки на количественный и качественный состав образующихся летучих органических соединений.

Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования использовали две пары спекающихся углей марки Ж восстановленного и слабовосстановленного типов Донецкого бассейна. Данные о наличии известняка в кровле пластов, тонкодисперсного пирита и микролитотипов с тонкодисперсным пиритом (карбопирита) использовали для оценки типа угля по восстановленности [3]. Поскольку угли Донбасса имеют практически однородный петрографический состав, отобранная коллекция позволила выявить влияние показателя восстановленности на состав и свойства пиролитических продуктов.

Результаты технического и элементного анализа углей следующие.

ВУ: зольность (d) 2,7–12,2% мас.; V^{daf} 31,7–35,6% мас.; C^{daf} 83,6–87,3% мас.; H^{daf} 4,9–5,23% мас.; $(O+N)^{daf}$ 7,2–10,0% мас.; S_d^t 2,81–3,75% мас.; W^a 0,8% масс; толщина пластического слоя 16–22 мм.

СВУ: зольность (d) 2,6–3,7% мас.; V^{daf} 28,7–31,7% мас.; C^{daf} 87,4–87,8% мас.; H^{daf} 5,1–5,16% мас.; $(O+N)^{daf}$ 6,9–7,0% мас.; S_d^t 0,7–1,09% мас.; W^a 1,2–1,4% мас., толщина пластического слоя 27–32 мм.

Термообработку образцов проводили с использованием различных вариантов пиролиза:

- в условиях стандартного полукоксования в реторте Фишера (ИСО 647-74, ГОСТ 3168-93);

- в центрифуге Харьковского политехнического института ХПИ (ГОСТ 17621-89).

Последний метод основан на вращении угольного образца в поле центробежных сил с одновременным быстрым нагреванием до $600^\circ C$. Эта техника позволяет отделять жидкие продукты без вторичных термических превращений.

Для разделения и идентификации жидких продуктов пиролиза использовали методы экстракции, колонной хроматографии и газо-хромато-

масс-спектрометрии (для фракций насыщенных и ароматических углеводородов) [17].

С целью интенсификации процессов спекания и обессеривания твердых продуктов проводили предварительную химическую обработку углей путем введения 1%-ых растворов инициатора радиальной полимеризации ДАК (динитрил азобисизомасляной кислоты $C_8H_{12}N_4$) и продукта дистилляции каменноугольной смолы — поглотительного масла. Выбор способов химической модификации основывался на известных представлениях о свободно радикальном механизме в реакциях термодеструкции углей и участии жидких продуктов в процессе спекания. ДАК вводили с целью повлиять на ход радикальных реакций. В качестве возможного аналога компонентов жидких продуктов полукоксования и коксования использовали поглотительное масло.

Результаты и обсуждение

В таблице 1 приведен выход продуктов полукоксования и термофильтрации исследуемых углей различных генетических типов по восстановленности. Как видно из таблицы, выход полукоксового газа значительно отличается для ВУ и СВУ, но выход смолы приблизительно одинаков. Образцы восстановленного типа дают меньший выход полукокса и воды, но больший суммарный выход парогазовых продуктов (смолы и газа) по сравнению со слабовосстановленными, что прекрасно согласуется с данными определения выхода летучих веществ.

При термофильтрации выход жидких нелетучих продуктов, как и толщина пластического слоя, значительно выше для ВУ, чем для СВУ.

Таблица 1. Выход продуктов полукоксования и термофильтрации, % масс.

шахта, пласт	Тип	Выход продуктов полукоксования, масс. %				Выход продуктов термофильтрации, мас. % daf			
		Полу-кокс	H ₂ O	Смола	Газ	A ^d	ЖНП*	Паро-газовые продукты	T**
Гагарина, м ³	СВУ	84,4	2,3	5,3	8	0,4	22,4	19,9	57,7
Засядько, l ₄	СВУ	82,7	3,2	5,9	8,2	2,3	17,1	23,4	59,5
Гагарина, м ⁰ ₄	ВУ	71,8	1	4,7	22,5	7,8	38,7	21,3	40,0
Засядько, k ₈	ВУ	71,7	1,5	6,1	20,7	2,2	42,0	17,3	40,7

*жидкие нелетучие продукты (ЖНП), **надсеточный остаток (Т)

Материальный баланс полукоксования углей до и после химической обработки представлен в таблице 2.

Таблица 2. Выход продуктов полукоксования в присутствии добавок, % daf

Шахта, пласт, способ обработки	Тип	m _{пк} , %	m _{воды} , %	m _{см} , %	m _r , %
Засядько, l ₄	СВУ	82,7	3,2	5,9	8,2
Засядько, l ₄ (ДАК)	СВУ	79,4	2,1	5,9	12,6
Засядько, l ₄ (масло)	СВУ	85,6	2,1	6,4	5,9
Засядько, k ₈	ВУ	71,7	1,5	6,1	20,7
Засядько, k ₈ (ДАК)	ВУ	76,0	0,8	4,3	18,9
Засядько, k ₈ (масло)	ВУ	77,1	0,5	5,1	17,3

Из таблицы следует, что добавка поглотительного масла однозначно приводит к увеличению выхода полукокса, снижению выхода воды и парогазовых продуктов для всех исследуемых углей, а добавка ДАК по-разному

влияет на ход процесса полукоксования углей разных генетических типов по восстановленности (ГТВ). Для образцов ВУ это действие аналогично действию поглотительного масла, а для образцов СВУ, напротив, наблюдается снижение выхода полукокса и резкое увеличение выхода газа. Это происходит, по-видимому, из-за изменения направления радикальных реакций, которые активнее осуществляются в газовой фазе. Сказанное подтверждается данными по увеличению общего количества газа и содержания в нем углеводородов и водорода (таблица 3) [18].

Таблица 3. Количественный анализ полукоксового газа

Шахта, пласт	Тип	H ₂ S, мг/г	CO ₂ , мг/г	C _m H _n , мг/г	CO, мг/г	H ₂ , мг/г	CH ₄ , мг/г
Засядько, I ₄	СВУ	1,99	15,46	3,17	6,54	46,02	59,52
Засядько, I ₄ (ДАК)	СВУ	2,34	12,60	4,02	6,52	47,14	57,30
Засядько, I ₄ (масло)	СВУ	2,73	13,26	3,47	5,20	38,76	55,95
Засядько, k ₈	ВУ	19,76	3,89	5,61	6,54	55,39	106,42
Засядько, k ₈ (ДАК)	ВУ	21,16	6,49	7,75	9,59	72,63	112,42
Засядько, k ₈ (масло)	ВУ	19,32	9,77	2,55	6,54	79,60	101,76

Основным компонентом газа полукоксования углей марки Ж является метан, содержание которого достигает 53,9% для ВУ и 44,9% для углей СВУ. Газ, выделяющийся из жирного угля восстановленного типа, содержит значительно больше метана, водорода и сероводорода в сравнении с газом, полученным из СВУ.

Использование предварительной химической обработки увеличивает содержание в газе ценных горючих компонентов, т.е. дает возможность получить газ с большей теплотой сгорания. Кроме того, добавки позволяют перевести в газ большее количество серы в виде сероводорода.

Таким образом, продемонстрирована возможность химической модификации углей с целью интенсификации процессов их спекания и обессеривания при термической переработке [18]. Важно отметить, что применение выбранных в работе химических добавок позволяет также снизить выбросы газообразных соединений и в 1,2–1,4 раза уменьшить выбросы наиболее экологически опасных смолистых соединений при переработке низкокачественных высокосернистых углей, которые преобладают в Украине.

Сравнительное исследование смол полукоксования показывает, что их состав зависит от содержания гетероатомов в исходном сырье.

Как показали результаты структурно-группового анализа, состав смолы полукоксования существенно зависит от генетического типа угля по восстановленности. Смола из угля восстановленного типа содержит большее количество асфальтенов, «свободного углерода», и меньше веществ, растворимых в гексане (табл. 4.). Асфальтены и свободный углерод образуются, преимущественно, из «нерастворимой» матрицы макромолекул угля. Следовательно, структурная ячейка восстановленных углей при пиролизе имеет больше связей, разрушающихся под действием растворителя по сравнению с СВУ.

Четко видна разница в соотношении оснований и фенолов для углей разных типов по восстановленности. Экстракты полукоксовой смолы

спекающихся слабовосстановленных углей включают значительные количества фенолов и органических оснований, а экстракты сернистых углей — больше кислых соединений. Обратное распределение компонентов наблюдается для малометаморфизованных углей разных ГТВ [19, 20].

Таблица 4. Структурно-групповой состав полукоксовой смолы, масс. %

Шахта, пласт	Нейтральное масло	Кислоты	Фенолы	Основания	Асфальтены	Свободный углерод+ потери
Гагарина, м ³	43,23	3,00	19,15	2,87	18,17	13,58
Засядько, I ₄	52,14	0,64	2,21	9,79	18,25	16,97
Гагарина, м ⁰ ₄	40,25	4,79	13,33	2,77	24,86	14,00
Засядько, K ₈	42,95	0,72	1,16	2,51	33,55	19,10

Фракция нейтральных масел, полученных из восстановленного угля, содержит примерно в 2 раза больше растворимых в гексане парафино-нафтеновых соединений (ПНС), но меньше на ≈8% ароматических и на ≈10% полярных смол (табл. 5). Соединения, идентифицированные методом газохромато-масс-спектрометрии в гексановых и бензольных элюантах, представлены, в основном, ароматическими углеводородами и алканами. При этом в образце восстановленного типа обнаружены *n*-алканы C₁₃₋₃₃, а в его маловосстановленной паре — соединения с более короткой цепью C₁₃₋₃₀.

Таблица 5. Фракционный состав нейтрального масла первичной смолы, масс. %

Шахта, пласт	Тип	Парафино-нафтеновая фракция	Ароматическая фракция	Полярная фракция + потери
Гагарина, м ³	СВУ	13	28	59
Гагарина, м ⁰ ₄	ВУ	26	20	54

Ароматические компоненты присутствуют в виде алкилзамещенных и алкилнезамещенных соединений, состоящих из двух- четырех конденсированных колец. Заместители — преимущественно 1–3 радикала. Нафталины присутствуют, в основном, в виде 2-х и 3-х замещенных, а фенантрены, антрацены и пирены — в виде одно- и двухзамещенных соединений. Всего идентифицировано 120 соединений, в том числе производные дибензофурана, дибензотиофена и карбазола.

Анализ данных, полученных с помощью масс-спектрометрии, свидетельствует о различном вещественном составе нейтрального масла, входящего в состав первичной смолы углей разных ГТВ. Смола сернистого жирного угля содержит большее количество нормальных алканов и гетероциклических соединений, имеет менее ароматический характер. Она включает 8,26 мас.% антраценов и фенантронов, 1,98 мас.% наиболее канцерогенных полициклических ароматических соединений, что значительно ниже, чем в смоле изометаморфного СВУ (9,33 и 2,68 соответственно). В то же время смола ВУ содержит примерно в 2 раза больше нафталинов, дибензофуранов и флуоренов, т.е. она может быть использована в качестве более экологически чистого сырья для получения вышеупомянутых продуктов и синтетического жидкого топлива в сравнении со смолой малосернистых углей

(содержит меньше кислот и фенолов и больше парафино-нафтеновых соединений).

Выводы

Установлено, что выход и состав первичных летучих органических продуктов пиролиза существенно зависит от генетического типа угля по восстановленности и условий термической переработки.

В условиях термофильтрации СВУ и ВУ образуется соответственно в 4 и 7 раз больше смол, чем при их полукоксовании. Полукоксовый газ сернистых углей содержит значительно больше метана, водорода и сероводорода в сравнении с газом, полученным из СВУ, т.е. является более калорийным топливом.

Жидкие продукты, образующиеся при термической переработке низкокачественных сернистых углей, содержат меньшее количество наиболее экологически опасных полиядерных ароматических соединений и больше продуктов, необходимых для производства синтетического жидкого топлива в сравнении с равнометаморфизованными малосернистыми углями. Следовательно, комплексная переработка этих смол позволит не только получить ряд ценных химических продуктов, но также и улучшить экологию в промышленных регионах.

Установлено, что введение органических добавок в шихту для коксования позволяет направленно изменять выход и состав продуктов пиролиза и таким образом влиять на количество органических выбросов, спекаемость и коксуемость угольного сырья, эффективность работы оборудования.

Литература

1. Mastral A.M. et al. Toxic emissions from coal combustion // Fuel Processing Technology, 2000. — № 67. — P. 1–10.
2. Mastral A.M. et al. Fluidized Bed Combustion of Fossil and Nonfossil Fuels. A comparative Study // Energy and Fuels, 2000. — № 14. — P. 275–281.
3. Butuzova L.F. et al. Agglutinated materials from low-rank sulfur coals // 3rd International Conference "New carbon and composite materials 2004", Ustron-Zawodzie, Poland, 2004. — P. 23.
4. Mastral A.M. et al. Benzo(a)pyrene, Benzo(a)anthracene and Dibenzo(a,h)anthracene Emissions from Coal and Waste Tire Energy Generation at Atmospheric Fluidized Bed Combustion // Environ. Sci. Technol., 2001. — № 35. — P. 2645–2649.
5. Bechtel A. et al. Thermochemical and geochemical characteristics of sulphur coals // Fuel Processing Technology, 2002. — Vol. 77–78. — P. 45–52.
6. Butuzova L.F. et al. Thermodestruction of brown coals of different genetic types // Fuel Processing Technology, 2002. — Vol. 77–78. — P. 145–150.
7. Butuzova L.F. et al. Pyrolysis of low-reduced and reduced coals of different rank // Bulletin of geosciences, 2005. — Vol. 80. — № 1 — P. 15–18.
8. Butuzova L.F. et al. Adsorbents from sulphur coals of the coal rank // Polish Journal of Environmental studies, 2005. \ Vol. IV. — № 14. — P. 75–79.
9. Butuzova L. F. et al. Organic sulphur as a main index for determining the genetic type of low-rank coals // Bulletin of geosciences, 2005 — Vol. 80. — № 1. — P. 3–8.
10. Butuzova L.F. et al. Opportunities of waste plastic recycling during semi-coking and coking processes // 11th Conference on Environment and Mineral Processing & Exhibition, Ostrava, Czech Republic, 2007, 31.5.–2.6. — P. 75–79.
11. Minkova V. et al. Adsorbents from sulphur coals of the coal rank. // 10th Coal Geology Conference. Prague, Czech Republic, 2004. — P. 47.
12. Marinov S. et al. Comparative study the effect of two treatments on sulphur types distribution in coal // Acta Montana IRSM AS CR, 2000, Series B. — Vol. 10,117. — P. 27–35.
13. Butuzova L.F. et al. Influence of oxygen on the behaviour of oxygen-containing groups of soft coal in pyrolysis // Fuel, 1994. — V. 73. — № 6. — P. 945–950.

14. Butuzova L.F., Krzton A. About mechanism of soft coal pyrolysis //Acta Universitatis Carolinae-GEOLOGICA, 2001. — 45(2–4). — P. 23–25.

15. Butuzova L.F. et al. The possibility to control of radical reactions way during thermal processing of low-quality coals // 7-th European Coal Conference, Lviv, Ukraine, August 26–29, 2008. — P. 26.

16. Barriocanal, C. et al. Assessment of coking plant wastes as additives for cokemaking // Proceedings ICCS'97 edited by Ziegler et al, DGMK Tagungsberichte 9703, Essen, Germany, 1997. — P. 677–680.

17. Сафин В.А., Бутузова Л.Ф., Маринов С., Турчанина О.Н., Бутузов Г.Н. Влияние серы на структуру углей и полукоксов. // Вопросы химии и химической технологии, 2005. — № 5. — С. 177–179.

18. Бутузова Л. Ф., Сафин В.А. Полукоксование высокосернистых спекающихся углей в присутствии добавок // Матеріали III наук.-практ. конф. “Донбас-2020: Наука і техніка – виробництву”. ДНТУ, Донецьк, 30-31 травня 2006. — С. 404–408.

19. Сафин В.А., Бондаренко А.В., Турчанина О.Н. Зависимость состава смолы полукоксования от генетического типа по восстановленности // Сборник докладов научно-технической конференции “Хімія і сучасні технології-2005”. — Днепропетровск, 2005. — С. 165.

20. Бутузова Л. Ф., Слинкин С. М., Рублева Л. И., Сафин В.А., Крутько И. Н., Збыковский Е. И. Исследование смолы полукоксования углей разных генетических типов // Химическая технология переработки горючих ископаемых, 2003 — № 6. — С. 175–177.

© Бутузова Л.Ф., Сафин В.А., В.А. Кипря А.В., Бутузов Г.Н., Шакир Ш.М., Маринов С., Стефанова М., 2010

Поступила в редакцию 20.10.2009 г.

УДК 87.53.91

Маковский Р.В., Бутузова Л.Ф., Маринов С. (Институт органической химии с центром фитохимии БАН), **Сафин В.А., Наливкина А.О.** (ДонНТУ)

ВЛИЯНИЕ СЕРНИСТЫХ КОМПОНЕНТОВ НА СВОЙСТВА УГОЛЬНЫХ ШИХТ ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКЕ

Впервые подробно изучено поведение при термической переработке шихт на основе газового и жирного углей разных генетических типов по восстановленности (ГТВ). Показано существенное влияние ГТВ указанных компонентов на выход и состав продуктов термофльтрации в центробежном поле (ТФЦ). Выявлен оптимальный состав шихты (Га+Жв), позволяющий получить высокий выход «пластического» слоя, насыщенного алифатическими компонентами.

Ключевые слова: генетический тип по восстановленности, термическая переработка, шихта, термофльтрация, пластический слой.

Внедрение новых технологий в доменное производство неизменно приводит к ужесточению мировых требований к качеству кокса, необходимого для производства чугуна. Кокс, обеспечивающий минимальный расход в доменной печи, должен характеризоваться следующими показателями: W^f — 3–5%, A^d — 8,5–9,5%, S^d — 0,5–0,75%, V^{daf} — 0,4–1%, M_{25} — 90–96%, M_{10} — <2%, содержание классов 0–5мм — 3–5%, CRI — <22%, CSR — 58–70% [1, 2]. К сожалению сырьевая база Донбасса, как и Украины в целом, характеризуется небольшим содержанием малосернистых углей марок К, Ж и ОС. Существующие методы обогащения и обессеривания угольных концентратов