

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 662.74:552.57

DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).383-393

ГРНТИ 52.35+61.53.17

Специальность ВАК 2.2.2

Научная статья

ПОЛУЧЕНИЕ И АНАЛИЗ ПЕРВИЧНОЙ СМОЛЫ ПИРОЛИЗА УГЛЕЙ РАЗНОГО ГЕНЕТИЧЕСКОГО ТИПА ПО ВОССТАНОВЛЕННОСТИ

Шевкопляс В. Н., Семенова Р. Г., Макарова Р. А.

*Институт физико-органической химии и углехимии имени Л. М. Литвиненко
(Донецк, Россия)*

Аннотация Сочетая методы термической деструкции и физико-химического анализа была проанализирована первичная смола пиролиза, полученная из углей разного генетического типа по восстановленности (ГТВ) в ряду $C^{daf} = 76,2-86,1 \%$. Пиролиз, проведенный при температуре T_{max} (дериватография, кривая ДТГ) показал, что угли восстановленного типа «в» отличаются от углей маловосстановленного типа «а» повышенным выходом смолы и имеют более интенсивные полосы поглощения при 2920 см^{-1} ($C_{al}-H$ связь) при 810 см^{-1} ($C_{ar}-H$ связь). Установлено, что отношение H_{ar}/H_{al} в смоле растет в ряду C^{daf} , и выше для углей типа «а». Используя уравнение Брауна-Ладнера, были вычислены основные структурные параметры изученных углей.

Ключевые слова: уголь, дериватография, пиролиз, температура T_{max} , первичная смола, ИК-спектроскопия, ЯМР-спектроскопия, структурные параметры

Для цитирования: Шевкопляс В. Н., Семенова Р. Г., Макарова Р. А. Получение и анализ первичной смолы пиролиза углей разного генетического типа по восстановленности // Вестник НовГУ. 2023. 3(132). 383-393. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).383-393

Research Article

OBTAINING AND ANALYSIS OF THE PRIMARY PIROLYSIS TAR OF COALS OF DIFFERENT GENETIC RESTORABILITY TYPES

Shevkoplyas V. N., Semenova R. G., Makarova R. A.

L. M. Litvinenko Institute of Physical-Organic and Coal Chemistry (Donetsk, Russia)

Abstract Combining the methods of thermal destruction and physicochemical analysis, the primary pyrolysis tar obtained from coals of different genetic restorability types (GRT) in the series $C^{daf} = 76,2-86,1 \%$ was analyzed. The pyrolysis carried out at a temperature of T_{max} (derivatography, DTG-curve) showed that restored coals of the “b” type differ from coals of slightly reduced “a” type in an increased tar yield and have more intense absorption bands at 2900 cm^{-1} ($C_{al}-H$ bond) and at 810 cm^{-1} ($C_{ar}-H$ bond). It has been established that H_{ar}/H_{al} relation in tar increases in the coal rank (C^{daf}) and is higher for type “a” coals. Using the Brown-Ladner equation, the main structural parameters of the studied coals were calculated.

Keywords: coal, derivatography, pyrolysis, T_{max} temperature, primary tar, IR-spectroscopy, NMR-spectroscopy, structural parameters

For citation: Shevkoplyas V. N., Semenova R. G., Makarova R. A. Obtaining and analysis of the primary pyrolysis tar of coals of different genetic restorability types // Vestnik NovSU. 2023. 3(132). 383-393. DOI: 10.34680/2076-8052.2023.3(132).383-393

Введение

Одним из важнейших показателей качества углей является содержание гетероатомов, прежде всего кислорода и серы. Если учесть, что донецкие угли, в основном сернистые (около 73 % всех шахтопластов составляют угли восстановленного типа с содержанием серы более 1,5 %), то данное направление исследований является актуальным [1-2]. Для определения оптимальных путей технологического использования углей разного генетического типа по восстановленности (ГТВ) важно найти взаимосвязь между содержанием серы и основными свойствами углей. Следовательно, одной из задач исследователей является определение вклада общей и органической серы в основной показатель технического анализа – выход летучих продуктов из углей низкой и средней стадии метаморфизма, но разного ГТВ.

Ранее [3] экспериментально было показано, что жидкие продукты, полученные из сернистых углей при полукоксовании, являются ценным сырьем для получения химических продуктов. Также перспективным является направление получения и использования полукоксового газа из сернистых углей [4]. На основании полученных данных были определены структурные показатели, позволяющие оценить целесообразность переработки углей методом полукоксования [5].

Авторами предложен новый подход по оценке качества углей, основанный на получении и исследовании первичных продуктов их пиролиза при оптимальной температуре $T_{\max}$, определенной методом дериватографии, и которая является характеристической для конкретного угля, то есть определяется его структурой [6-7].

Целью данной работы было сочетание методов термической деструкции и физико-химических методов исследования для характеристики первичной смолы пиролиза (температура $T_{\max}$), полученной из углей одинакового марочного состава, но разного ГТВ; анализ и выявление особенностей структурно-группового состава полученной смолы для оценки исходной структуры изученных углей и предварительного прогноза по их дальнейшему использованию.

Экспериментальная часть

В качестве объектов исследования использовали угли Донецкого бассейна (марки Д, Г, Ж) разного генетического типа по восстановленности (ГТВ), характеристика которых приведена в таблице 1. Видно, что угли восстановленного типа «в» характеризуются повышенным содержанием серы (S^d_t), а угли маловосстановленного типа «а» более высоким содержанием углерода (C^{daf}).

Таблица 1. Характеристика исследуемых углей

Образец	Тип угля	Технический анализ, %				Элементный анализ, % daf		
		W ^a	A ^d	S _t ^d	V ^{daf}	C	H	O+N
Дl ₂	«в»	1,9	5,1	5,6	43,0	76,2	5,2	13,0
Дl ₄	«а»	3,0	7,2	1,0	37,0	79,0	5,1	14,9
Гl ₃	«в»	1,6	4,6	2,3	38,0	82,2	5,4	10,9
Гl ₁	«а»	1,2	3,1	1,0	35,0	82,7	5,3	11,0
Жk ₈	«в»	0,9	2,6	4,1	30,5	85,4	5,2	5,3
Жl ₁	«а»	1,3	8,2	1,1	32,7	86,1	5,4	7,4

Дериватографический анализ образцов углей разного ГТВ (фракция $\leq 0,2$ мм) проводили в дериватографе Q-1500 системы Паулик-Паулик-Эрдеи в платиновом тигле с крышкой в атмосфере инертного газа аргона. Скорость нагрева составляла 10 °С/мин, навеска образца – 500 мг. По кривым ДТГ и ТГ определяли температуру максимума и температурные интервалы основного термического разложения для каждого угля. Значения $T_{н.}$ и $T_{к.}$ – характеризуют температуру начала и окончания основного эндозффекта на кривой ДТГ, а $T_{мак.}$ – температуру максимума этого эфффекта; потерю массы образцом угля рассчитывали по методике [8].

Пиролиз углей проводили следующим образом. Навеску угля 5-7 г (фракция $> 0,5$ мм) загружали в реактор с неподвижным слоем (20 см³), вакуумировали и нагревали со скоростью 25 °С/мин до температуры максимума основного термического разложения угля ($T_{мак.}$), предварительно определенную для каждого исследуемого образца методом дериватографии [6-7] и выдерживали при конечной температуре в течение 10 мин (таблица 2). Это время было достаточным, чтобы образующиеся при данных условиях эксперимента парогазовые продукты пиролиза полностью вышли из зоны реакции [9]. По окончании эксперимента весовым методом определяли материальный баланс пиролиза (ГОСТ 3168-93 ИСО 647-74) [10].

Запись ИК-спектров первичной смолы осуществляли на спектрофотометре UR-20 в области поглощения 3600-400 см⁻¹. Исследования проводили в тонком слое, помещая образец между двумя прозрачными пластинами, содержащих 2,5 мг смолы. Отнесение полос поглощения проводили в соответствии с литературными данными [11-12].

¹H ЯМР-спектры первичной смолы записывали на спектрометре «Gemini 200» фирмы «Varian». Для этого навеску смолы 20 мг растворяли в 0,6 мл растворителя – CDCl₃; спектр записывали с рабочей частотой 200,0 МГц. В качестве внутреннего эталона использовали тетраметилсилан (ТМС). Интерпретацию спектров проводили по значениям химических сдвигов протонов (δ) согласно [13-14], которые определяли с точностью $\pm 0,5$ м. д.

Таблица 2. Результаты дериватографического анализа углей разного ГТВ

Образец	Данные ДТГ, °С			Потеря массы (Δm), мг/г, daf	
	$T_{н.}$	$T_{макс.}$	$T_{к.}$	$T_{н.-T_{к.}}$	T_{max}
ДI ₂ «В»	305	405	480	132,0	33,0
ДI ₄ «а»	320	405	480	146,0	32,0
ГI ₃ «В»	295	425	550	151,0	29,0
ГI ₁ «а»	335	425	510	140,0	31,0
Жк ₈ «В»	365	445	545	178,0	58,0
ЖI ₁ «а»	360	440	550	129,0	46,0

Результаты и обсуждение

Из таблицы 2 видно, что температура T_{max} растет с увеличением C^{daf} в ряду и практически одинакова для всех изученных пар углей. При этом ширина температурного интервала основного эндоэффекта ($T_{н.}-T_{к.}$) зависит от структурных особенностей исследуемого образца и смещается в сторону более высоких температур с увеличением C^{daf} в ряду. Потеря массы (Δm) углем также имеет тенденцию к увеличению в ряду и несколько выше для углей восстановленного типа «В».

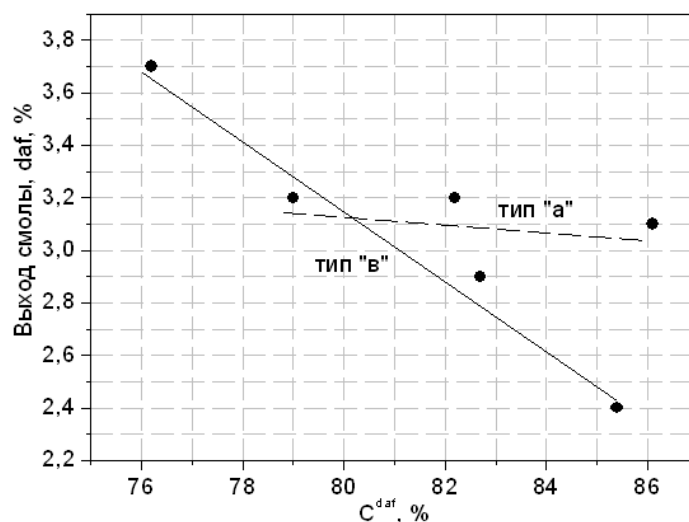


Рисунок 1. Взаимосвязь между содержанием C^{daf} и выходом первичной смолы из углей разного ГТВ

На рисунке 1 приведены кривые, которые позволяют проследить за количественным выходом первичной смолы (температуре T_{max}) из углей разного ГТВ.

Видно, что угли марки Д и Г (тип «в») характеризуются повышенным выходом смолы по сравнению с углями (тип «а»); для пары углей марки Ж такая тенденция не выявлена. Установлено, что выход смолы (тип «в») имеет тенденцию к резкому снижению от угля марки Д до Ж, тогда как выход смолы (тип «а») снижается незначительно с увеличением C^{daf} в угле.

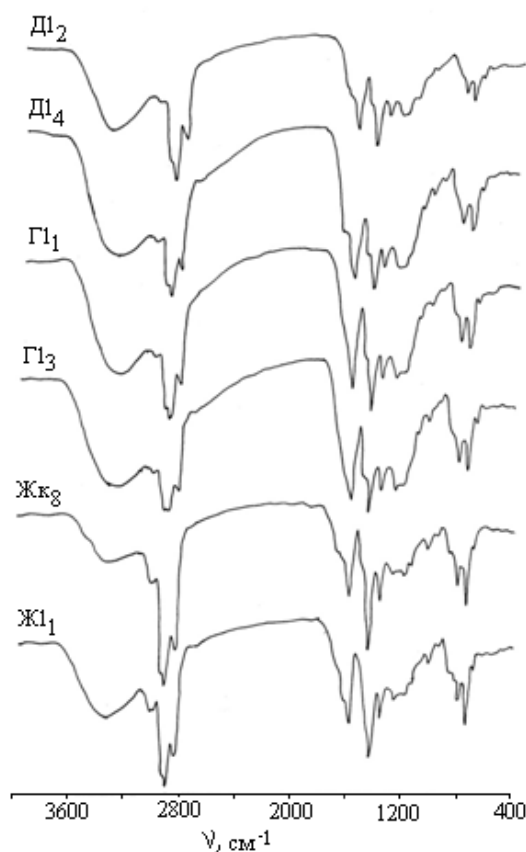


Рисунок 2. ИК-спектры первичной смолы, полученной при пиролизе углей разного ГТВ

При рассмотрении ИК-спектров первичной смолы (рисунок 2) можно отметить, что все спектры имеют полосы поглощения в области спектра $3600\text{--}3100\text{ см}^{-1}$ (наличие в смолах OH -групп фенолов и карбоксилов, а также соединений, содержащих связи N-H и S-H групп). Область спектра $2940\text{--}2850\text{ см}^{-1}$ и $1450\text{--}1380\text{ см}^{-1}$ свидетельствует о наличии в их составе большого числа алифатических соединений. Интенсивность полосы при 1700 см^{-1} также существенно снижается в ряду за счет снижения в смоле карбоновых кислот и альдегидов.

Высокая интенсивность полосы при 1600 см^{-1} и полос при $870\text{--}750\text{ см}^{-1}$ ($\text{C}_{\text{ар}}\text{--H}$ связь) подтверждает наличие в смоле ароматических фрагментов. Полосы поглощения в области спектра $1270\text{--}1200\text{ см}^{-1}$ и при 1100 см^{-1} свидетельствует, прежде всего, о наличии C--O связи фенолов, эфиров и карбоксильных групп, содержание которых в составе всех смол значительное.

Можно отметить, что прослеживается закономерное увеличение интенсивности полос при 810 и 750 см^{-1} ($\text{C}_{\text{ар}}\text{--H}$ связь) в смоле углей в ряду C^{daf} . При этом смола, полученная из углей типа «в» имеют более высокую интенсивность для полос поглощения при 2920 и 1450 см^{-1} ($\text{C}_{\text{ал}}\text{--H}$ связь) и при 810 см^{-1} ($\text{C}_{\text{ар}}\text{--H}$ связь). Высокая интенсивность полос в области спектра $1270\text{--}1100\text{ см}^{-1}$ и при 1030 см^{-1} указывает на наличие в смоле (тип «а») большое содержание C--O связи фенолов, эфиров и карбоксильных групп. Также определено, что, смола, полученная углей

типа «в» имеет более высокую интенсивность полосы при 1700 см^{-1} (C–O связь карбонила), тогда как интенсивность полосы при 1500 см^{-1} (C=C связь) выше для смолы, полученной из углей типа «а».

Анализ ^1H ЯМР-спектров первичной смолы показал, что все спектры имеют две области сигналов с химическими сдвигами, которые характеризуют наличие в смоле алифатических (5,0-0,3 м. д.) и ароматических (9,0-6,0 м. д.) протонов. Для количественной оценки данных ^1H ЯМР-спектроскопии была составлена общая таблица сигналов с химическими сдвигами протонов в области спектра 9,0-0,3 м. д. Интегральная интенсивность сигналов, выраженная в процентах, позволила оценить долю ароматических и алифатических фрагментов и кислородсодержащих групп и соотношение $N_{\text{ар}}/N_{\text{ал}}$ в изученных смолах (таблица 3).

Таблица 3. Распределение протонов (H) в первичной смоле пиролиза по данным ^1H ЯМР-спектроскопии

Образец	Диапазоны химических сдвигов протонов, м. д. (%)							
	9,0-8,2	8,2-6,0	6,0-5,0	5,0-3,0	3,0-2,0	2,0-1,5	1,5-1,0	1,0-0,3
Дl ₂ «в»	0,6	22,6	9,2	3,9	21,1	8,2	22,3	15,1
Дl ₄ «а»	0,4	23,0	5,6	1,7	23,9	6,1	25,4	13,9
Гl ₃ «в»	4,1	19,7	5,7	4,5	23,2	5,6	24,9	12,4
Гl ₁ «а»	1,3	24,6	3,8	1,4	27,8	6,2	23,8	11,1
Жк ₈ «в»	4,4	20,3	2,6	2,4	23,4	6,7	27,4	15,2
Жl ₁ «а»	2,2	20,6	2,0	2,2	27,5	6,8	23,2	11,5

Из таблицы 3 видно, что смолы, полученные из углей типа «в» состоят из двух и более ароматических колец (9,0-8,2 м. д.), содержащих большое число протонов фенольных гидроксидов (6,0-5,0 м. д.) и концевых CH_3 – алифатических групп (1,0-0,3 м. д.). Также данные смолы характеризуются наличием большого числа протонов в диапазоне химических сдвигов 5,0-3,0 м. д., что указывает на наличие ароматических колец, связанных между собой $\text{CH}_2 =$ группами. Видно, что смолы, полученные из углей типа «а», представлены, в большей степени, одним ароматическим кольцом (8,2-6,0 м. д.), содержащими $\text{CH}_2 =$ и CH – группы в длинных алифатических цепях (3,0-2,0 м. д.). Первичная смола (тип «а» и «в») содержат сигналы химических сдвигов в диапазоне 2,0-1,5 и 1,5-1,0 м. д., которые указывают на наличие длинных алифатических цепей, содержащих метиленовые и метиновые группы.

Обнаружено, что интенсивность сигналов с химическими сдвигами протонов в области 9,0-6,0 м.д. и 3,0-2,0 м.д. усиливается одновременно с увеличением содержания C^{daf} в угле и свидетельствует об изменениях в их структурно-групповом составе.

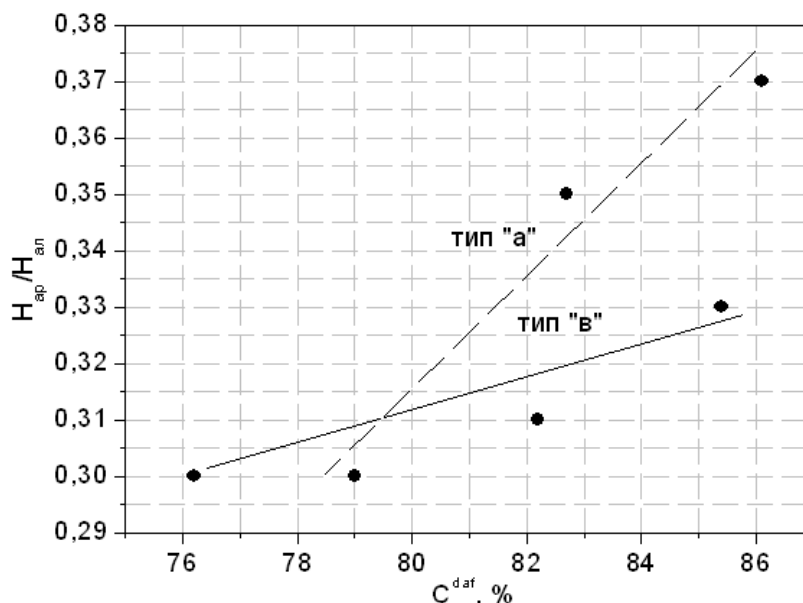


Рисунок 3. Соотношение H_{ar}/H_{al} в первичной смоле углей разного ГТВ

Согласно рисунку 3 величина H_{ar}/H_{al} в первичной смоле растет с увеличением содержания C^{daf} в угле. Видно, что смола, полученная из углей маловосстановленного типа «а» более ароматичная, по сравнению со смолой, полученной из углей восстановленного типа «в».

Одним из основных показателей, позволяющих охарактеризовать структуру исходного угля, является степень ароматичности углерода (f_a). Для определения данного показателя в данной работе был применен метод определения параметра f_a по данным 1H ЯМР-спектроскопии первичной смолы (температуре T_{max}) в сочетании с данными элементного анализа исходного угля. Для определения f_a по вышеуказанной методике, было использовано уравнение Брауна-Ладнера [15]:

$$f_a = \frac{C/H - H_{al}/2}{C/H},$$

где C/H – атомное отношение в исходном образце по данным элементного анализа; H_{al} – интегральная интенсивность области 1H ЯМР спектра смолы, характеризующая содержание алифатических протонов с химическими сдвигами 6,0-0,3 м. д.

На основании вышеизложенного был рассчитан структурный параметр f_a и определена взаимосвязь между содержанием C^{daf} в угле и параметром f_a ($R = 872$), рисунок 4.

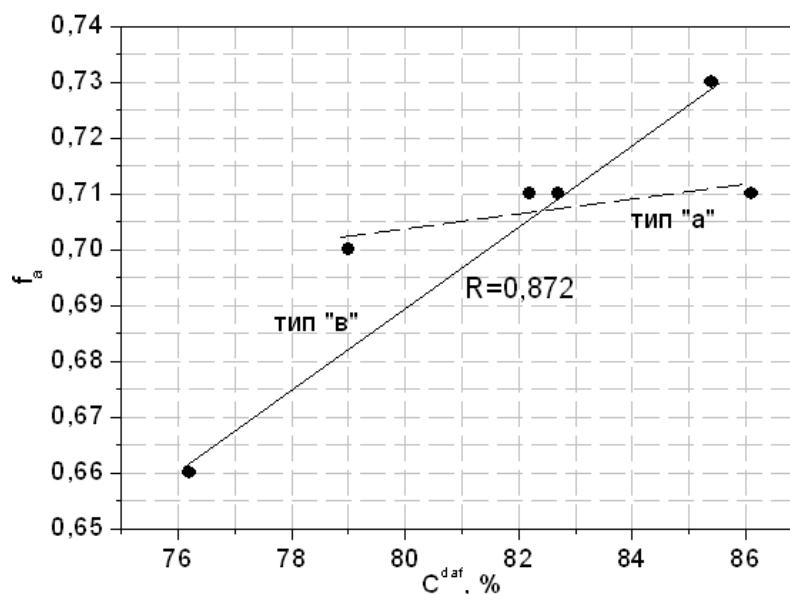


Рисунок 4. Взаимосвязь между содержанием C^{daf} в углях разного ГТВ и параметром f_a

Видно, что для смолы, полученной из углей (тип «в») величина параметра f_a , имеет тенденцию к резкому росту (от 0,66 до 0,73) от угля марки Д до Ж, тогда как для смолы, полученной из углей (тип «а»), величина параметра f_a изменяется незначительно (0,70-0,71) с увеличением в C^{daf} в угле.

Исходя из вычисленного параметра f_a , были определены и другие основные структурные параметры углей разного ГТВ, значения которых приведены в табл. 5: C_{ar} – содержание ароматического углерода; H_{ar}/H – «ароматичность водорода»; S_{ar} – «индекс ароматического замещения»; R_{ar} – среднее число ароматических колец; R – среднее число ароматических и нафтеновых колец; $\frac{2R-1}{C}$ – «индекс кольцевой конденсации».

Таблица 4. Рассчитанные основные структурные параметры углей разного ГТВ

Образец	H_{ar}/H	$\frac{2R-1}{C}$	C_{ar}	S_{ar}	R_{ar}	$R_{общ}$
Дl ₂ «в»	0,232	0,52	52,58	0,73	14,15	20,81
Дl ₄ «а»	0,234	0,51	55,30	0,74	14,81	21,15
Гl ₃ «в»	0,238	0,50	58,36	0,74	15,32	21,58
Гl ₁ «а»	0,258	0,51	58,72	0,72	15,90	22,09
Жк ₈ «в»	0,250	0,54	62,34	0,75	18,10	24,08
Жl ₁ «а»	0,267	0,53	61,13	0,72	17,15	23,82

Из данных таблицы 4 видно, что с увеличением C^{daf} в угле растет параметр $R_{общ}$ величина которого выше для углей восстановленного типа («в»). Одновременно с этим растет величина параметра R , который, например, может судить о

спекающейся способности угля, и который несколько выше для углей типа «в». Также можно, например, оценить состав получаемой смолы на основании параметра H_{ap}/H , величина которого выше для смолы, полученной из углей типа «а».

Таким образом, методами ИК- и 1H ЯМР-спектроскопии проведен анализ первичной смолы и выявлены сходства и различия в ее составе. Полученные данные дают возможность охарактеризовать структурно-групповой состав изученной смолы и на ее основе рассчитать основные структурные параметры углей разного ГТВ.

Заключение

1. Методом дериватографии (кривая ДТГ) была определена температура T_{max} и интервал основного эндозффекта для углей разного ГТВ в ряду $C^{daf} = 76,2-86,1 \%$. Проведенный пиролиз (T_{max}) позволил получить первичную смолу и установить влияние серы (S^d_t) на ее количественный выход из углей разного ГТВ. Определено, что угли восстановленного типа «в» характеризуются большим выходом смолы по сравнению с углями маловосстановленного типа «а» (угли Д и Г).

2. Метод ИК-спектроскопии позволил полуколичественно охарактеризовать состав первичной смолы и проследить за изменением формой связи для основных полос поглощения. Показано, что смола, полученная из углей типа «в» характеризуются более интенсивными полосами поглощения при 2920 см^{-1} ($C_{ал}-H$ связь) и при $870-750 \text{ см}^{-1}$ ($C_{ap}-H$ связь).

3. Методом ЯМР-спектроскопии прослежено за изменением содержания ароматических (H_{ap}) и алифатических ($H_{ал}$) в диапазоне химических сдвигов $9,0-0,3 \text{ м. д.}$ и рассчитано отношение $H_{ap}/H_{ал}$ в смоле углей разного ГТВ. Предложен комплексный подход по вычислению основных структурных параметров углей разного ГТВ с использованием уравнения Брауна-Ладнера. Выявлена взаимосвязь между степенью ароматичности углерода (f_a) и содержанием C^{daf} в угле.

Список литературы

1. Маценко Г. П. Микрокристаллические включения пирита как петрографический показатель типов по восстановленности донецких углей // Химия твердого топлива. 1983. 1. 13-19.
2. Kizilshtein L. Y., Kholodkov Y. I. Ecologically hazardous elements in coals of the Donetsk Basin // International Journal of Coal Geology. 1999. 40. 189-197. DOI: 10.1016/S0166-5162(98)00068-8
3. Kulakova V., Butuzova L., Andrade J. M., Shevkoplyas V., Turchanina O. Characterization of sulfur coal-derived liquids as a source of hydrocarbons to produce chemicals and synthetic fuels // Fuel. 2016. 184. 314-324. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.07.005
4. Бутузова Л. Ф., Шевкопляс В. Н., Кулакова В. О., Ошовский В. В., Бутузов Г. Н. Перспективы получения и использования полукоксового газа из сернистых углей // Инновационные перспективы Донбасса: материалы 2-й Международной научно-практической конференции, Донецк, 25–26 мая 2016 года. Т. 4. Донецк, Донецкий национальный технический университет, 2016. С. 11-15.

5. Бутузова Л. Ф., Колбаса В. А., Бутузов Г. Н., Шевкопляс В. Н. Структурные показатели для оценки целесообразности переработки углей методом полукоксования // Вестник Донецкого национального технического университета. 2018. 1(11). 53-59.
6. Шевкопляс В. Н., Лящук С. Н., Бутузова Л. Ф. Новый показатель для оценки качества углей // Химия твердого топлива. 2006. 4. 12-21.
7. Шевкопляс В. Н., Лящук С. Н., Бутузова Л. Ф. Оценка качественных характеристик углей по данным дериватографии и пиролиза // Вопросы химии и химические технологии. 2005. 3. 180-184.
8. Скляр М. Г., Тютюнников Ю. Б. Химия твердых горючих ископаемых: учебное пособие для вузов по спец. «Химическая технология твердого топлива». Киев, Выща школа, 1985. 247 с.
9. Аронов С. Г., Скляр М. Г., Тютюнников Ю. Б. Комплексная химико-технологическая переработка углей. Киев, Техника, 1968. 262 с.
10. ГОСТ 3168-96 (ИСО 647-74). Топливо твердое минеральное. Методы определения выхода продуктов полукоксования = Solid mineral fuels. Methods for determination of the yield of products by low temperature distillation: межгосударственный стандарт: взамен ГОСТ 3168-66: введен 01.01.97. Разработан Госстандартом Украины. Киев, Изд-во стандартов, 1996. 17 с.
11. Смит А. Прикладная ИК-спектроскопия: основы, техника, аналитическое применение. Москва, Мир, 1982. 327 с.
12. Landais P., Rochdi A. In situ examination of coal macerals oxidation by micro-FT-i.r. spectroscopy // Fuel. 1993. 72(10). 1393-1401. DOI: 10.1016/0016-2361(93)90415-X
13. Гордон А., Форд Р. Спутник химика: физико-химические свойства, методики, библиография. Москва, Мир, 1976. 541 с.
14. Ионин Б. И., Ершов Б. А., Кольцов А. И. ЯМР-спектроскопия в органической химии. Ленинград, Химия, 1983. 269 с.
15. Choudhury D., Sanyal P. K., Banerjee A. K. Stepwise fragmentation of coal by H₂O₂ – trifluoroacetic acid oxidation // Fuel. 1988. 67. 177-181.

References

1. Matsenko G. P. Mikrokristallicheskiye vklyucheniya pirita kak petrograficheskiy pokazatel' tipov po vosstanovlennosti donetskikh ugley [Microcrystalline pyrite inclusions as a petrographic indicator of the types of recovery of Donetsk coals] // Solid Fuel Chemistry. 1983. 1. 13-19.
2. Kizilshtein L. Y., Kholodkov Y. I. Ecologically hazardous elements in coals of the Donetsk Basin // International Journal of Coal Geology. 1999. 40. 189-197. DOI: 10.1016/S0166-5162(98)00068-8
3. Kulakova V., Butuzova L., Andrade J. M., Shevkoplyas V., Turchanina O. Characterization of sulfur coal-derived liquids as a source of hydrocarbons to produce chemicals and synthetic fuels // Fuel. 2016. 184. 314-324. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.07.005
4. Butuzova L. F., Shevkoplyas V. N., Kulakova V. O., Oshovsky V. V., Butuzov G. N. Perspektivy polucheniya i ispol'zovaniya polukoksovogo gaza iz sernistyykh ugle [Prospects for obtaining and using semi-coke gas from sulfur coals] // Innovatsionnyye perspektivy Donbassa [Innovative prospects of Donbass]: materials of the 2nd International Scientific and Practical Conference, Donetsk, May 25–26, 2016. Vol. 4. Donetsk, Donetsk National Technical University, 2016. P. 11-15.
5. Butuzova L. F., Kolbasa V. A., Butuzov G. N., Shevkoplyas V. N. Strukturnyye pokazateli dlya otsenki tselesoobraznosti pererabotki ugley metodom polukoksovaniya

[Structural indicators for assessing the feasibility of coal processing by semi-coking] // Vestnik Donetsk National Technical University. 2018. 1(11). 53-59.

6. Shevkoplyas V. N., Lyashchuk S. N., Butuzova L. F. Novyy pokazatel' dlya otsenki kachestva ugley [New indicator for assessing the quality of coals] // Solid Fuel Chemistry. 2006. 4. 12-21.

7. Shevkoplyas V. N., Lyashchuk S. N., Butuzova L. F. Otsenka kachestvennykh kharakteristik ugley po dannym derivatografii i piroliza [Evaluation of qualitative characteristics of coals according to derivatography and pyrolysis data] // Voprosy khimii i khimicheskoye tekhnologii. 2005. 3. 180-184.

8. Sklyar M. G., Tyutyunnikov Yu. B. Khimiya tverdykh goryuchikh iskopayemykh: uchebnoye posobiye dlya vuzov po spets. «Khimicheskaya tekhnologiya tverdogo topliva» [Chemistry of solid fossil fuels: a textbook for universities on special. "Chemical technology of solid fuels"]. Kiev, Vyscha Shkola Publ., 1985. 247 p.

9. Aronov S. G., Sklyar M. G., Tyutyunnikov Yu. B. Kompleksnaya khimiko-tekhnologicheskaya pererabotka ugley [Complex chemical and technological processing of coal]. Kiev, Tekhnika Publ., 1968. 262 p.

10. GOST 3168-96 (ISO 647-74). Solid mineral fuels. Methods for determination of the yield of products by low temperature distillation: interstate standard: instead of GOST 3168-66: introduced 01.01.97. Developed by the State Standard of Ukraine. Kiev, Publishing House of Standards, 1996. 17 p.

11. Smith A. Prikladnaya IK-spektroskopiya: osnovy, tekhnika, analiticheskoye primeneniye [Applied IR spectroscopy: fundamentals, technique, analytical application]. Moscow, Mir Publ., 1982. 327 p.

12. Landais P., Rochdi A. In situ examination of coal macerals oxidation by micro-FT-i.r. spectroscopy // Fuel. 1993. 72(10). 1393-1401. DOI: 10.1016/0016-2361(93)90415-X

13. Gordon A., Ford R. Sputnik khimika: fiziko-khimicheskoye svoystva, metodiki, bibliografiya [The Chemist's Companion: physico-chemical properties, methods, bibliography]. Moscow, Mir Publ., 1976. 541 p.

14. Ionin B. I., Ershov B. A., Koltsov A. I. Sputnik khimika: fiziko-khimicheskoye svoystva, metodiki, bibliografiya [NMR spectroscopy in organic chemistry]. 2nd ed., rev. Leningrad, Khimiya Publ., 1983. 269 p.

15. Choudhury D., Sanyal P. K., Banerjee A. K. Stepwise fragmentation of coal by H₂O₂ – trifluoroacetic acid oxidation // Fuel. 1988. 67. 177-181.

Информация об авторах

Шевкоплас Владимир Николаевич – кандидат химических наук, ставший научный сотрудник, Институт физико-органической химии и углехимии имени Л. М. Литвиненко (Донецк, Россия), ORCID: 0009-0003-5595-9470, vladim.shevk@yandex.ru

Семенова Римма Григорьевна – кандидат химических наук, ставший научный сотрудник, Институт физико-органической химии и углехимии имени Л. М. Литвиненко (Донецк, Россия), ORCID: 0009-0004-2873-2112, reemma2010@yandex.ru

Макарова Раиса Александровна – кандидат химических наук, ставший научный сотрудник, Институт физико-органической химии и углехимии имени Л. М. Литвиненко (Донецк, Россия), ORCID: 009-0007-1050-3487, makarova.ra@yandex.ru