



Научная статья

УДК 662.749.33

DOI: 10.52957/2782-1900-2024-5-4-35-42

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ СРЕДНЕТЕМПЕРАТУРНОГО ЭЛЕКТРОДНОГО ПЕКА НА ВЫХОД КАРБОНИЗАТА

Р. Ю. Ковалев

Родион Юрьевич Ковалев, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник
Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН, Кемерово, Россия,
kovaleviuhm@yandex.ru

Ключевые слова:

n-толуидин, малеиновый ангидрид, (2z)-4-(метиланилино)-4-оксобут-2-еновая кислота, ИК- и ЯМР¹H-спектроскопия, потенциометрическое титрование, метрологические характеристики

Аннотация.

Каменноугольный пек – остаток разгонки каменноугольной смолы, который имеет широкое применение в качестве связующего в производстве электродов и анодной массы. Научный и прикладной интерес представляет получение пековых карбонизатов и разработка методик для повышения значения его выхода. В данной работе проведены эксперименты по термообработке в окислительной среде среднетемпературного электродного пекка категории БсТ_р = 71,5 °С (АО «Алтай-Кокс»). Процесс термообработки пекка происходил в реакторе объемом 5,6 л, который нагревался с помощью встроенной электронагревательной системы. Для усиления роста Т_р во время термообработки продукты из газовой фазы откачивались насосом из реактора в сборник, где конденсировались. Термообработка происходила при Т > 400 °С с термоокислением пекка, так и откачкой дистиллятов. Окислительная среда создавалась путем подачи воздуха компрессором к расплавленному пекку. Процесс подачи воздуха происходил при достижении температуры выдержки, которая задавалась терморегулятором. Определены выходы продуктов термоокисления. Также определены температуры размягчения Т_р и выходы летучих Х для полученных продуктов. Получены пекки с Т_р = 140 °С и 158 °С. Также данная термообработка существенно снижала выход летучих веществ в конечных продуктах. Термообработанные пекки карбонизировались при Т = 650 °С и Т = 850 °С, определены выходы карбонизата. Также карбонизация проходила при дополнительных выдержках при 450 °С и 650 °С. Установлено, что термообработка увеличивала выход карбонизата на 10%. Выдержки при 450 °С и 650 °С также количественно увеличивали выход карбонизата.

Для цитирования:

Ковалев Р.Ю. Исследование влияния термообработки среднетемпературного электродного пекка на выход карбонизата // *От химии к технологии шаг за шагом*. 2024. Т. 5, вып. 4. С. 35-42
URL: <https://chemintech.ru/ru/nauka/issue/5563/view>



Введение

Каменноугольный пек (КП) – остаток разгонки каменноугольной смолы на фракции: легкая фракция ($T < 170$ °С); фенольная фракция ($T = 170–210$ °С); нафталиновая фракция ($T = 210–230$ °С); поглотительная фракция ($T = 230–270$ °С); антраценовая фракция ($270–360$ °С); каменноугольный пек ($T < 360$ °С). Пек – многокомпонентная структура, состоящая из следующих фракций: γ -фракция, растворимая в гексане, изооктане; β -фракция, нерастворимая в гексане, но растворимая в толуоле; α -фракция, нерастворимая в толуоле, делится на растворимую в хинолине α_2 -фракцию и нерастворимую в хинолине α_1 -фракцию [1].

Основные продукты карбонизации пеков: мезофазный пек ($400–450$ °С) [2-6]; пековый полукокс ($450–800$ °С) [3, 7] и пековый кокс (> 800 °С) [4, 6].

Мезофазные пеки (МП) имеют широкое применение в получении игольчатого кокса [4, 6] и углеродных волокон [8-10]. Также МП могут применяться в получении:

- конструкционных материалов [11];
- пеноуглерода [12-13];
- электрода в литийионном аккумуляторе [14].

Из более ранних работ известно, что полноценный МП получают путем низкотемпературной карбонизации (НТК) как каменноугольных пеков [1-5], так и синтетических пеков [10, 15], нефтяных пеков [6, 11, 16] и нефтекаменноугольных пеков [17].

В большинстве зарубежных работ НТК проводилась путем нагрева [2, 5, 10] или термостатирования пека, либо другого углеводородного сырья [3-6, 15-17] в интервале температур $400–450$ °С. Установлено, что процессы формирования мезофазы в пеках заканчиваются при температуре 540 °С [18].

В работе [19] анизотропные полукоксы получали нагревом до 500 °С в атмосфере аргона и выдержке при данной температуре в течение 1 часа. В работе [20] каменноугольный пек модифицировали полиэтиленгликолем с добавлением катализатора в виде *n*-толуолсульфокислоты, при термообработке ($T = 800$ °С) данной модификации получали пековый полукокс. В работе [21] полукоксы получались термообработкой при температуре до 470 °С в течение 4 часов.

В работе [22] показано, что в результате карбонизации пека и пека с добавками пенографита при $800–900$ °С получают материалы, рентгеноструктурные характеристики которых близки к графитовым характеристикам. В работе [23] при карбонизации электродного пека категории $T = 900$ °С определен выход карбонизата – 64%. Выход карбонизата – 60-64% был при термообработке пека при $T = 900$ °С. С выдержками по 1 ч при $320, 400, 450, 500$ и 600 °С выход карбонизата составлял величину 60-64% и выход карбонизата 50-53% при той же конечной температуре, но с выдержками по 1 ч при 320 °С и 3 ч при 600 °С [24].

При карбонизации пеков путем нагрева при температурах выше 300 °С происходит рост α_1 -фракции в пеке согласно [25-26], при температурах $400–500$ °С происходят мезофазные превращения согласно работам [2-3, 10], в данном температурном интервале может происходить усиленный рост α_1 -фракции согласно результатам работы [10], при температурах выше 500 °С происходят процессы полукоксования и коксования



пеков [3, 4, 19]. Из вышесказанного можно предположить, что α_1 -фракция может играть большую роль при карбонизации пеков и количественно увеличивать его выход.

Согласно работам [27, 28] при карбонизации преобладают реакции дегидрогенизационной полимеризации с последующей дегидроциклизацией. В результате этих реакций происходит сшивание, которое в конечном итоге приводит к образованию кокса. Это совпадает с данными, полученными в работе [29], где установлено, что пековый кокс или карбонизат является конечным продуктом реакций полимеризации, проходящих при $T > 500$ °С.

Особый интерес представляет установление влияния термообработки пека в температурном интервале ($T = 400$ – 500 °С) низкотемпературной карбонизации на выход карбонизата ($T = 850$ °С). В данной работе проводили эксперимент по установлению влияния термообработки среднетемпературного каменноугольного пека категории Б на выход карбонизата. Вышесказанное и определяет новизну данной работы.

Цель работы: установить влияние предварительной термообработки среднетемпературного электродного пека в окислительной среде при $T > 400$ °С на выход пекового карбонизата.

Основная часть

В качестве исходного сырья использовали среднетемпературный электродный пек категории Б (АО «Алтай-Кокс»). Выбранный пек имел следующие характеристики: температура размягчения $T_p = 71,5$ °С, выход летучих веществ $X = 61,1\%$, зольность = $0,2\%$, содержание нерастворимых в толуоле веществ $\alpha = 25,8\%$, содержание нерастворимых в хинолине веществ $\alpha_1 = 4,5\%$.

На рис. 1 представлена схема термообработки пека в окислительной среде.

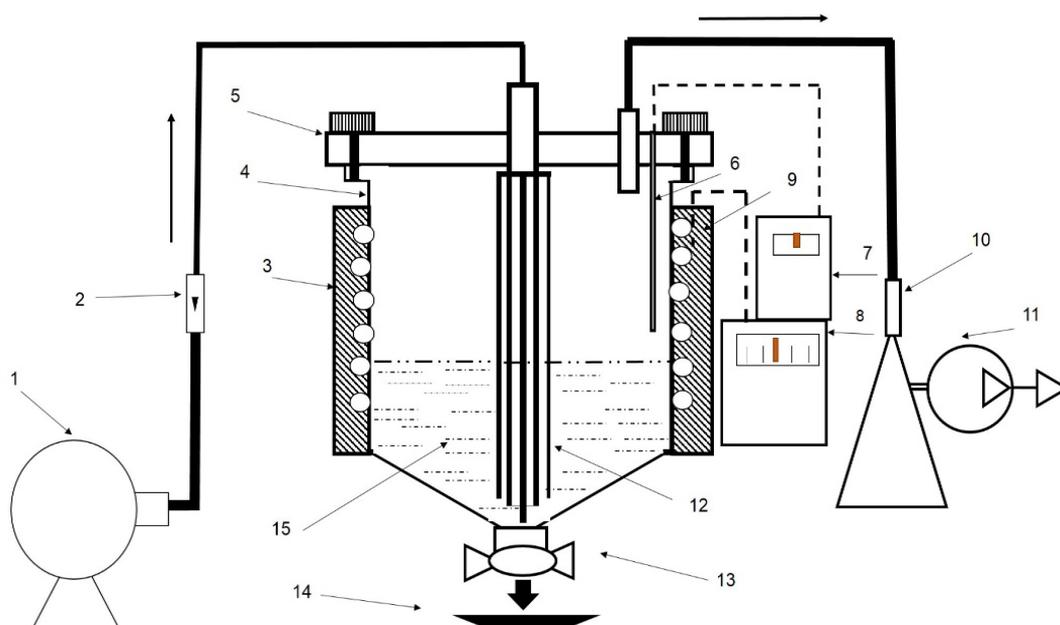


Рис. 1. Схема установки термообработки пеков в окислительной среде:

1 – компрессор; 2 – ротаметр; 3 – электронагрев; 4 – реактор; 5 – крышка реактора; 6 – термопара для измерения температуры в реакторе; 7 – вторичный прибор; 8 – терморегулятор; 9 – термопара для измерения температуры нагрева; 10 – колба Бунзена; 11 – насос; 12 – узел подачи воздуха состоящий из 6 трубок диаметром 3 мм; 13 – сливной вентиль; 14 – противень; 15 – пек.



Навеска пека массой 100 г. загружалась в реактор (4) из нержавеющей стали объемом 5,6 л, который закрывался металлической крышкой (5). Крышка реактора крепилась плотно к корпусу винтами. Нагрев пека в реакторе осуществлялся с помощью электронагревательной системы (3), температура в реакторе повышалась до заданного значения на терморегуляторе (8). Измерение температуры в реакторе происходило с помощью термопары (6), показания которой отображались на вторичном приборе (7). Для перемешивания пека до однородной массы подавался компрессором воздух, который поступал через узел подачи газа (12), состоящего из шести трубок диаметром 3 мм, вглубь объема расплавленного пека. Компрессор и насос включались в процессе термостатирования при заданной температуре. Откачка насосом легких компонентов пека требовалась для усиления роста T_p . Максимальная скорость расхода воздуха (30 л/ч) задавалась ротаметром (2). Под действием воздуха продукты из газовой фазы выходили из реактора через трубу в крышке реактора и с помощью насоса (11) перемещались в приемник в виде колбы Бунзена (10). После проведения эксперимента пек через сливной вентиль (13) сливался в противень из нержавеющей стали (14).

Электронагревательная система (3), терморегулирующий (термопара 9 и терморегулятор 8) и термоизмерительный блок (термопара 6 и вторичный прибор 7) установки позволяют проводить термообработку пека путем нагрева и термостатирования в интервале температур 400-500 °С.

Подача воздуха именно при заданном температурном режиме требуется для исключения реакций, проходящих в интервале температур 260-400 °С, приводящих к резкому увеличению α_2 и α_1 в пеке [30-31], и для использования воздуха с целью создания более экономичной окислительной среды низкотемпературной карбонизации. Выбранная оптимальная скорость расхода воздуха (30 л/ч) требовалась для обеспечения эффективного перемешивания расплавленного пека до получения однородного продукта, но с уменьшением возможности увеличения числа термоокислительных реакций в пеке. То есть пек термостатировался с обработкой воздухом, под действием которого происходило усиление отгона дистиллятов из реактора с откачкой их с помощью насоса в приемник. Для термообработанных пеков измеряли температуру размягчения T_p методом «Кольцо и стержень» согласно ГОСТ 9950-2020, выход летучих веществ X измерялся согласно ГОСТ 9951-2023. Зольность измеряли по ГОСТ 7846-73.

Термообработанные пеки (продукты термообработки) карбонизировали в тиглях с притертой крышкой в муфельной печи. Карбонизация происходила в следующих режимах: *режим 1*: нагрев до температуры $T = 850$ °С и выдержка в течение 1 часа; *режим 2*: нагрев до 650 °С и выдержка в течение 1 часа; *режим 3*: нагрев до 450 °С и выдержка в течение 1 часа с дальнейшим нагревом до 850 °С и вторичной выдержкой также в течение 1 часа; *режим 4*: нагрев до 450 °С и выдержкой в течение 1 часа, с дальнейшим нагревом до 650 °С и выдержкой также в течение 1 часа, и нагревом до 850 °С и выдержкой в течение 1 часа. Определялся выход карбонизата K как процентное отношение массы полученного карбонизата к массе пека. Откачанные жидкие дистилляты представляли вязкую жидкость темно-коричневого цвета и полностью растворялись в хлороформе.



В табл. 1 представлены условия термообработки пека категории Б.

Таблица 1. Условия термообработки каменноугольного пека Б

Наименование	БТО-1	БТО-2
Температура процесса, °С	410	445
Длительность, мин	60	60
Скорость расхода воздуха, л/ч	30	30

Для продуктов (БТО-1 и БТО-2) термообработки среднетемпературного электродного пека категории Б получили значения T_p и X .

В табл. 2 представлены температура размягчения T_p , выход летучих веществ X для исходного пека и пеков после термообработки.

Таблица 2. Значение T_p и изменения выхода летучих веществ X для исходного пека и продуктов термообработки

№	Название	T_p , °С	X , %	Выход пека, %
1	пек Б	71,5	61,1	-----
2	БТО-1	158	36,2	62
3	БТО-2	140	44,1	67

Из табл. 2 видно, что значение X для БТО-2 выше, чем для БТО-1. Это может быть связано с тем, что откачка газообразных продуктов и дистиллятов при получении ПК-2 производилась при более высокой температуре 445 °С, чем при получении ПК-1. По-видимому, при $T > 410$ °С часть дистиллятов ушла в пек, о чем свидетельствует значение выхода пека БТО-2 (67%), которое выше, чем для выхода пека БТО-1 (62%). Зольность пека составляла величину 2%, что было идентично зольности исходного пека.

Для исходного электродного пека категории Б проведена карбонизация путем нагрева и термостатирования в течение 1 часа при 850 °С, выход карбонизата $K = 51\%$. При низкотемпературной карбонизации путем нагрева до 650 °С и выдержке при данной температуре в течение 1 часа выход карбонизата $K = 53,3\%$. В табл. 3 представлены результаты выходов карбонизата для БТО-1 и БТО-2 для разных режимов карбонизации.

Из табл. 3 видно, что значения K для БТО-1 немного выше, чем для БТО-2 для всех режимов карбонизации. Например, для *режима 1* выход карбонизата K (БТО-1) = 62,4%, что выше по значению, чем для БТО-2 (60,4%). Также можно прийти к выводу, что термообработка (при $T > 400$ °С) электродного пека категории Б в окислительной среде повышает значения K для продукта карбонизации при $T = 650$ °С на 14-16%. Также термообработка повышает значение K для продукта карбонизации при $T = 850$ °С на 9-10%. Также из данных по значениям K для режимов карбонизации 3 и 4 видно, что дополнительная выдержка при $T = 450$ °С и 650 °С, повышает значения K . Дополнительная выдержка при 450 °С в течение 1 часа (*режим 3*) увеличивает значения K при дальнейшей карбонизации при $T = 850$ °С с 62,4% до 69,3% для БТО-1 и с 60,4% до 65,2% для БТО-2. Двукратная дополнительная выдержка при 450 °С и 650 °С (*режим 4*) увеличивает значения K для БТО-1 (с 62,4% до 72,3%) и БТО-2 (с 60,4% до 68,1%) соответственно.

**Таблица 3.** Выходы карбонизатов при разных режимах карбонизации.

Режим карбонизации		К (БТО-1), %	К (БТО-2), %
1	Режим 1	62,4	60,4
2	Режим 2	69	67
3	Режим 3	69,3	65,2
4	Режим 4	72,3	68,1

Рост выхода карбонизата (табл. 3) может быть связан с тем, что термообработка пека при $T > 400$ °С приводит к заметному увеличению значения α_1 -фракции согласно [10]. Что и увеличивает значение К. Дополнительное термостатирование при 450 °С и 650 °С приводило к заметному повышению значения К. Можно предположить, что дополнительные выдержки увеличивали время протекания химических реакций (полимеризации согласно [27, 29]), что могло увеличить количественно выход карбонизата К. Также дополнительная выдержка при 450 °С могла дополнительно повысить значение α_1 -в пеке согласно [10], что существенно увеличивало значение К.

Для карбонизатов, полученных из БТО-1, определяли выход летучих веществ V^{daf} согласно ГОСТ Р 55660-2013. Для карбонизата, полученного путем карбонизации согласно режиму 1, выход летучих веществ $V^{daf} = 2,87\%$, для карбонизата, полученного согласно режиму 4, выход летучих веществ $V^{daf} = 1,88\%$. Для карбонизата (режим 1) исходного пека категории Б, выход летучих веществ $V^{daf} = 4,01\%$. Можно прийти к заключению, что термообработка в окислительной среде при 410 °С пека, приводит к уменьшению выхода летучих веществ в полученном карбонизате. Сочетание термоокислительной термообработки при 410 °С и многократной выдержки во время карбонизации снижает выход летучих веществ для конечного продукта на 50%. Это улучшает качество получаемого карбонизата.

Выводы

Термическая обработка среднетемпературного электродного пека категории Б в окислительной среде позволяет получать высокотемпературные пеки.

Предварительная термическая термообработка в окислительной среде среднетемпературного электродного пека категории Б повышает значение выхода карбонизата по сравнению со значением для исходного пека.

Предварительная термическая термообработка в окислительной среде среднетемпературного электродного пека категории Б снижает выход летучих веществ для карбонизата по сравнению со значением для исходного пека.

Список источников

1. Привалов В.Е., Степаненко М.А. Каменноугольный пек. Москва: Металлургия, 1981. 208 с.
2. Мочалов В.В., Пистрова П.Д., Зайдис Е.Г. Особенности низкотемпературной карбонизации пеков различной степени конденсированности // *Кокс и химия*. 1985. № 1. С. 31-35.
3. Montes-Moránab M.A., Crespoa J.L., Youngb R.J., Garcíaa R., Moinele S.R. Mesophase from a coal tar pitch: a Raman spectroscopy study // *Fuel Processing Technology*. 2002. V. 77-78. P. 207-212. URL: [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(02\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(02)00079-6) (дата обращения 06.08.2024).



4. **Lia L., Lina X., Zhanga Y., Daib J., Xua D., Wang Y.** Characteristics of the mesophase and needle coke derived from the blended coal tar and bio-mass tar pitch // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2020. V. 150. P. 104889. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104889> (дата обращения 06.08.2024).
5. **Cheng X., Zha Q., Li X., Yang X.** Modified characteristics of mesophase pitch prepared from coal tar pitch by adding waste polystyrene // *Fuel Processing Technology*. 2008. V. 89, I. 12. P. 1436-1441. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2008.07.003> (дата обращения 16.08.2024).
6. **Cheng X.L., Zha Q.F., Zhong J.T., Yang X.J.** Needle coke formation derived from co-carbonization of ethylene tar pitch and polystyrene. // *Fuel*. 2009. V. 88. P. 2188-2192. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.05.006> (дата обращения 16.08.2024).
7. **Svitilova J., Machovic V., Kolar F.** 9,10-bis(chlormethyl)anthracene - Curing agent of coal tar pitch // *Acta Geodyn. Geomater.* 2006. Vol. 3, No. 2 (142). P. 57-62.
8. **Xu H-t., Guo J-g., Li W-l, Li X-k.** The effect of the molecular structure of naphthalene-based mesophase pitch on the properties of carbon fibers derived from it. *New Carbon Mater.* 2023. V. 38, №2. P. 369-377. URL: [https://doi.org/10.1016/S1872-5805\(23\)60709-7](https://doi.org/10.1016/S1872-5805(23)60709-7) (дата обращения 26.08.2024).
9. **Cao Y., Zang C., Zhang J., Gao F., Liu Y.** High thermal-conductivity mesophase pitch-based graphite fiber with circular cross-section through a spinneret with a Y-shaped spinning hole // *Carbon Trends*. 2023. V. 10. P. 100244. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cartre.2022.100244> (дата обращения 06.08.2024).
10. **Yuan G., Xue Z., Cui Z., Westwood A., Dong Z., Cong Y., Zhang J., Zhu H., Li X.** Constructing the Bridge from Isotropic to Anisotropic Pitches for Preparing Pitch-Based Carbon Fibers with Tunable Structures and Properties // *ACS Omega*. 2020. V.5, I. 34. P. 21948-21960. URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03226> (дата обращения 04.08.2024).
11. Пат. 2709446 Р.Ф. Способ получения мезофазного пека / **Кондрашева Н К., Бойцова А.А., Строкин С.В.** опубл. 17.12.2019.
12. **Wang Y., Li M., Zhao Z., Xu G.** Preliminary exploration of the mechanism governing the cell structure variation of mesophase coal pitch/carbon black composite carbon foam // *Diamond and Related Materials*. 2023. V. 136. P. 110077. URL: <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.110077> (дата обращения 03.08.2024).
13. **Hlabathe T., Shiba N., Liu X.** Mesophase pitch derived carbon foams with high compressive strengths and thermal conductivities as cobalt support // *Materials Today Communications*. 2023. V. 35. P. 105537. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105537> (дата обращения 06.08.2024).
14. **Gong X., Lou B., Yu R., Zhang Z., Guo S., Li G., Wu B., Liu D.** Carbonization of mesocarbon microbeads prepared from mesophase pitch with different anisotropic contents and their application in lithium-ion batteries // *Fuel Processing Technology*. 2021. V. 217. P. 106832. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2021.106832> (дата обращения 26.08.2024).
15. **Alvarez P., Granda M., Sutil J., Santamaría R.I., Ricardo Santamaría, Blanco C., Menéndez R.** A unified process for preparing mesophase and isotropic material from anthracene oil-based pitch // *Fuel Processing Technology*. 2011. V. 92, I. 3. P. 421-427. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2010.10.004> (дата обращения 06.08.2024).
16. **Lou B., Liu D., Qiu Y., Y. Fu, Guo S., Yu R., Gong X., Zhang Z., He X.** Modified effect on properties of mesophase pitch prepared from various two-stage thermo-treatments of FCC decant oil // *Fuel*. 2021. V. 284. P. 119034. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119034> (дата обращения 06.08.2024).
17. **Santamaría R., Blanco C., Granda Ferreira M.** Mesophase development in petroleum and coal-tar pitches and their blends // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2003. V. 68-69: P. 409-424. URL: [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(03\)00034-2](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(03)00034-2) (дата обращения 16.08.2024).
18. **Тарахно Е.В., Шустиков В.И., Пинтюлин И.Н., Берман Д.Д., Гамазина Г.А., Пырин А.И.** Исследование мезофазных превращений в каменноугольных мягких пеках // *Кокс и химия*. 1992. № 11. С. 25-29.
19. **Lü X.-J., Xu J., Li J., Lai Y.-Q., Liu Y.-X.** Thermal-Treated Pitches as Binders for TiB₂/C Composite Cathodes // *Metallurgical and Materials Transactions*. 2012.V. 43. P. 219–227. URL: <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0821-x> (дата обращения 06.08.2024).



20. Xie X.-l., Zhao C.-x., Zhang H.-p., Cao Q. The effect of coal-tar pitch modification with polyethylene glycol on its properties and the semi-coke structure derived from it // *Carbon*. 2014. V. 76. P. 473. URL: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.04.046> (дата обращения 06.08.2024).
21. Kumar R., Jain H., Chaudhary A., Kumari S., Mondal D.P., Srivastava A.K. Thermal conductivity and fire-retardant response in graphite foam made from coal tar pitch derived semi coke. // *Composites Part B: Engineering*. 2019. 172. P. 121–130. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.036> (дата обращения 06.08.2024).
22. Хохлова Г. П., Барнаков Ч. Н., Малышева В. Ю., Попова А.Н. Влияние режима термообработки на каталитическую графитацию каменноугольного пека // *Химия твердого топлива*. 2015 № 2 С. 10-16. URL: <https://doi.org/10.7868/S002311771502005X> (дата обращения 06.08.2024).
23. Хохлова Г. П., Малышева В. Ю., Барнаков Ч. Н., Попова А.Н., Исмагилов З.Р. Влияние природы и количества катализатора на фазовую структуру углеродного полученного низкотемпературной каталитической графитизации каменноугольного пека // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2013. № 5, 99. С. 21-24.
24. Хохлова Г. П., Барнаков Ч. Н., Хицова Л. М., Малышева В.Ю., Исмагилов З.Р. Особенности термопревращения каменноугольного пека в условиях низкотемпературной каталитической графитации при разных режимах термообработки // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2014 № 1, 101. С. 89-94.
25. Twigg A.N. Relationship between chemical structure and secondary quinoline insoluble formation in electrode binder pitches // *Fuel*. 1987. V. 66, Issue 11. P. 1540-1543. URL: [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(87\)90015-9](https://doi.org/10.1016/0016-2361(87)90015-9) (дата обращения 06.08.2024).
26. Гайсаров М.Г., Мальцев Л.Д., Мочалов В.В. О природе α_1 -фракции пека и ее влиянии на качество углеродистых изделий // *Кокс и химия*. 1981. № 10. С. 37-39.
27. Marsh H., Heintz E.A., Rodriguez-Reinoso F. Introduction to Carbon Technologies. Alicante: Universidad de Alicante, 1997. P. 669.
28. Zander. M. Die Chemie der Pyrolyse von aromatischen Kohlenwasserstoffen in der Gas- und Flüssigphase // *Erdöl-Erdgas-Kohle*. 1989. V. 105. P. 373.
29. Lewis I. Chemistry of carbonization // *Carbon*. 1982. V. 20. P. 519-529. URL: [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(82\)90089-6](https://doi.org/10.1016/0008-6223(82)90089-6) (дата обращения 06.08.2024).
30. Сидоров О.Ф., Селезнев А.Н. Перспективы производства и совершенствования потребительских свойств каменноугольных электродных пеков // *Российский химический журнал*. 2006. V. 1, l. 1. P. 16-24.
31. Ковалев Р. Ю., Гаврилюк О. М., Никитин А. П., Исмагилов З. Р. Исследование термоокислительной обработки электродного каменноугольного пека // *Кокс и химия*. 2023. № 7. С. 14-18. URL: https://doi.org/14-18.10.52351/00232815_2023_07_14 (дата обращения 06.08.2024).

Поступила в редакцию 02.08.2024

Одобрена после рецензирования 19.09.2024

Принята к опубликованию 23.09.2024