

Оригинальная статья

УДК: 662.749.33

DOI: 10.57070/2304-4497-2025-1(51)-63-71

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЭЛЕКТРОДНЫХ КАМЕННОУГОЛЬНЫХ ПЕКОВ И СМЕСЕЙ НА ИХ ОСНОВЕ

© 2025 г. Р. Ю. Ковалев, А. П. Никитин

Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук (Россия, 650000, Кемерово, пр. Советский, 18)

Аннотация. Каменноугольный пек – остаток разгонки каменноугольной смолы, который имеет широкое применение в качестве связующего при производстве электродов и анодной массы. Особый интерес представляет получение пековых карбонизатов с максимальным значением выхода для разработки высокоэффективной технологии. Показано влияние термической обработки электродного пека категории Б на выход карбонизата. На примере пека категории В показано, что термическое окисление повышает выход карбонизатов высокоплавкого и высокотемпературного пеков, добавление которых в массу пека категории Б повышает выход его карбонизата. Например, введение добавки высокотемпературного пека (температура размягчения $T_p = 148$ °С, массовая доля добавки $\omega = 31,8$ %) в электродный пек категории Б снижает выход летучих веществ и увеличивает выход карбонизата с 50,8 до 54,0 %. Введение такого же количества добавки высокоплавкого пека ($T_p = 202$ °С) увеличивает выход карбонизата на 10 %. В обоих случаях выход летучих веществ уменьшается. Показаны результаты по влиянию термической обработки электродного пека категории Б на выход карбонизата. Установлены зависимости выхода карбонизата от температуры термической обработки. Впервые показано, что термическая обработка электродного пека категории Б при температуре 350 °С увеличивает выход карбонизата на 7 %. Получена зависимость выхода карбонизата от выхода летучих веществ для пеков после термической обработки. Показано, что при нагреве до 300 °С выход карбонизата не зависит от уменьшения выхода летучих веществ исходного пека.

Ключевые слова: электродный пек, высокоплавкий пек, термическая обработка, выход летучих веществ, выход карбонизата

Финансирование. Работа выполнена в рамках реализации государственного задания ИУХМ ФИЦ УУХ СО РАН №124041100047-4.

Для цитирования: Ковалев Р.Ю., Никитин А.П. Термическая обработка электродных каменноугольных пеков и смесей на их основе. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2025;1(51):63–71. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-63-71](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-63-71)

Original article

**HEAT TREATMENT OF ELECTRODE COAL PITCHES AND MIXTURES
BASED ON THEM**

© 2025 R. Yu. Kovalev, A. P. Nikitin

Federal State Budget Scientific Centre «The Federal Research Center of Coal and Coal-Chemistry of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences» (18 Sovetsky Av., Kemerovo, 650000, Russian Federation)

Abstract. Coal tar is a residue of coal tar distillation, which is widely used as a binder in the production of electrodes and anode paste. Of particular interest is the production of pitch carbonates with a maximum yield value for the development of a highly efficient technology. The paper shows the effect of heat treatment of a category B electrode pitch on the yield of carbonizate. Using the example of category C pitch, it is shown that thermal oxidation increases the yield of carbonates of high-melting and high-temperature pitches. The addition of inclusions of high-melting and high-temperature pitches of category C to the mass of pitch of category B increases

the yield of its carbonizate. For example, the introduction of a high-temperature pitch additive (softening temperature $T_{sp} = 148\text{ }^{\circ}\text{C}$, mass fraction of the additive $\omega = 31.8\%$) into a category B electrode pitch reduces the yield of volatile substances and increases the yield of carbonate from 50.8 to 54.0 %. For example, the introduction of a category B electrode pitch, 31.8 % in the form of a high-temperature pitch ($T_{sp} = 148\text{ }^{\circ}\text{C}$), reduces the yield of volatile substances and increases the yield of carbonizate from 50,8 % to 54,0 %. The introduction of the same amount of high-melting pitch additive ($T_{sp} = 202\text{ }^{\circ}\text{C}$) increases the yield of carbonizate by 10 %. In both cases, the yield of volatile substances decreases. The results on the effect of heat treatment of the electrode pitch of category B on the yield of carbonizate are shown. The dependences of the yield of carbonizate on the temperature of heat treatment are established. It was shown for the first time that heat treatment of a category B electrode pitch at $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ increases the yield of carbonizate by 7 %. The dependence of the yield of carbonizate on the yield of volatile substances for pitches after heat treatment was obtained. It is shown that when heated to $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, the yield of carbonizate does not depend on a decrease in the yield of volatile substances of the initial pitch.

Keywords: electrode pitch, high-melting pitch, heat treatment, volatile matter yield, carbonizate yield

Funding. Financial support was provided to the Institute of Coal Chemistry and Material Science, Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, with the framework of state project no. 124041100047-4.

For citation: Kovalev R.Yu., Nikitin A.P. Heat treatment of electrode coal pitches and mixtures based on them. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2025;1(51):63–71. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1\(51\)-63-71](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2025-1(51)-63-71)

Введение

Каменноугольный пек – высокотемпературный остаток разделения каменноугольной смолы на следующие фракции (T – температура дистилляции каменноугольной смолы):

- легкая ($T < 170^{\circ}\text{C}$);
- фенольная ($170^{\circ}\text{C} \leq T \leq 210^{\circ}\text{C}$);
- нафталиновая ($210^{\circ}\text{C} \leq T \leq 230^{\circ}\text{C}$);
- поглотительная ($230^{\circ}\text{C} \leq T \leq 270^{\circ}\text{C}$);
- антраценовая ($270^{\circ}\text{C} \leq T \leq 360^{\circ}\text{C}$);
- каменноугольный пек ($T > 360^{\circ}\text{C}$).

Каменноугольный пек (далее просто пек) является многокомпонентным материалом, состоящим из следующих фракций [1]:

- γ -фракция (растворимая в гексане, изооктане);
- β -фракция (нерастворимая в гексане, но растворимая в толуоле);
- α -фракция (нерастворимая в толуоле, которая в свою очередь состоит из α_2 -фракции (растворимая в хинолине) и α_1 -фракции (нерастворимая в хинолине)).

Согласно данным, представленным в работах [2; 3], γ -фракция состоит из хризена, пирена, антрацена, нафталина, карбазола, фенантрена, метилнафталина. Состав β -фракции представлен рядом полиароматических соединений: бензо[а]антрацен; бензо[а]пирен; циклопента[ghi]перилен; дибензо[b,d]тиофен и другие [3; 4]. Состав α -фракции включает в себя дифелиноксид, аценафтен, бензфлуорантен [4], а также в ее состав входят высокомолекулярные соединения переменного состава ($\text{C}_{62}\text{H}_{34}$; $\text{C}_{60}\text{H}_{28}$; $\text{C}_{64}\text{H}_{24}$; $\text{C}_{62}\text{H}_{20}$) [3].

Пек применяют как сырье при производстве электродов и анодной массы [5], а также для получения уникальных углеродных материалов путем его карбонизации. Например, при добавлении нефтяного пека в каменноугольный получают углеродные волокна, которые в дальнейшем подвергают стабилизации и карбонизации [6]. Одним из способов производства графитированного углерода является высокотемпературная ($T \approx 3000\text{ }^{\circ}\text{C}$) карбонизация пека с добавками эпоксидной смолы [7]. Низкотемпературная ($T \approx 800\text{ }^{\circ}\text{C}$) карбонизация пека с добавлением йода позволяет получить анодный материал для аккумуляторов [8]. Мезопористый углерод, легированный азотом, получен путем карбонизации пека при температуре $T \approx 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ с добавками смеси неорганических солей $\text{NaCl} - \text{KCl} - \text{NaF}$ [9]. В работе [10] анод для натрий-ионной батареи, состоящей из углеродных нанолитов, легированных фосфором, получали карбонизацией пека (при температуре $T \approx 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ в атмосфере аргона) с добавлением гипофосфита натрия. Синтетические мезофазные пеки как сырье для углеродных волокон получали путем смешивания нафталинового пека и термообработанной каменноугольной смолы при температуре $T \approx 430\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение нескольких часов [11].

Особый интерес представляют исследования влияния термической обработки пека на его состав и выход целевого продукта (карбонизата). Рассмотрим примеры экспериментов по термической обработке пеков и изменения их свойств.

В работе [12] пек подвергали термической обработке при различных температурах в течение

нескольких часов. Установлено, что рост температуры T_p размягчения пека связан с ростом содержания α -фракции с 30 до 60 % при увеличении максимальной температуры термической обработки с 360 до 390 °C (длительность 3 ч).

В работе [13] среднетемпературные электродные пеки термически обрабатывали при температуре 350 °C в течение нескольких часов. В результате происходил рост величины T_p и уменьшение выхода летучих веществ X . Для электродного пека категории Б рост параметра T_p происходил быстрее (доходил до 180 °C) по сравнению с пеком категории Б1 [13].

При термической обработки пек ($T_p = 110$ °C) при температуре 260 °C в течение 4 – 5 суток происходил рост параметра T_p до 157 °C и увеличение α -фракции с 26,4 до 68,6 %, α_1 -фракции с 4,7 до 5,6 % [14]. В работе [15] установлено, что повышение температуры термической обработки пека с 220 до 420 °C приводило к увеличению выхода кокса с 47,21 до 69,64 %. В работе [16] показано, что увеличение температуры термической обработки пека до 400 °C приводило к увеличению выхода полукокса и карбонизата, а также к повышению содержания α_1 -фракции в конечном продукте [16].

Наибольший фундаментальный и прикладной интерес для исследований представляет применение термической обработки пеков в потоке воздуха – термическое окисление (ТО), которое разделяется на низкотемпературное ($T < 300$ °C) и высокотемпературное ($T > 300$ °C) [17; 18]. При низкотемпературном ТО происходят следующие реакции в газовой фазе: $\gamma \rightarrow \alpha_2$ [17; 18]. Это экспериментально подтверждено в работе [19]. При высокотемпературном ТО кроме газофазных реакций происходят реакции в жидкой фазе по следующим схемам: $\gamma \rightarrow \beta \rightarrow \alpha_2 \rightarrow \alpha_1$ [17; 18] и $\beta \rightarrow \alpha_1$ [20]. В работе [21] показано, что при термическом окислении пека происходит полимеризация кислородных радикалов, превращение ароматических соединений в более стабильные конгенеры посредством радикальных реакций. В работе [22] при ТО ($T = 260 - 360$ °C; $\tau = 3$ ч; $v_{\text{воздуха}} = 80$ л/ч) электродного пека категории В с величиной $T_p = 91$ °C получен высокотемпературный пек ($T_p = 148$ °C). Образование мезофазных сфер в микроструктуре наблюдали в изотропном нафталиновом пеке после термического окисления при температуре $T = 410$ °C [23].

Большую перспективу имеет сочетание ТО и термической обработки пека. В работе [24] пек ($T_p = 114$ °C) получен путем термического окисления при температуре 260 – 320 °C электродного пека категории В (использовали исходный пек [22]), далее нагревали в среде собственных газов до температуры 410 °C в течение 28 мин.

При использовании пека категории В получили высокоплавкий пек ($T_p = 202$ °C) путем ТО ($T = 260 - 320$ °C; $\tau = 32$ мин; $v_{\text{воздуха}} = 100$ л/ч), далее нагревали от 320 до 400 °C в течение 43 мин, проводили выдержку при $T = 400$ °C в течение 40 мин, далее ТО ($T = 400 - 430$ °C; $\tau = 50$ мин; $v_{\text{воздуха}} = 40$ л/ч) [24].

Согласно результатам работ [12; 13] можно сделать вывод, что при термическом окислении рост параметра T_p , увеличение α -фракции пека происходит быстрее чем при термической обработке. Рассматриваемый факт может повлиять на количественный выход карбонизата.

Из работ [25; 26] известно, что при нагревании пеков выше 300 °C происходит рост α_1 -фракции. При температурах 400 – 500 °C происходят мезофазные превращения согласно полученным результатам после термической обработки и карбонизации пека [27; 28]. В рассматриваемом температурном интервале происходит усиленный рост α_1 -фракции [23]. При температурах выше 500 °C происходят процессы полукоксования [29] и коксования пеков [16]. Из выше сказанного можно предположить, что α_1 -фракция может оказывать влияние на процесс карбонизации и количественно увеличивать выход конечного продукта. Карбонизат пека является продуктом реакций полимеризации, происходящих во время карбонизации [30].

Научный и практический интерес представляет исследование влияния добавок в виде пеков с температурой $T_p > 100$ °C в электродный пек категории Б, а также установление влияния термической обработки электродного пека категории Б на выход карбонизата. Полученные экспериментальные данные дадут большой вклад в развитие технологии получения пековых карбонизатов и пековых коксов, что и определяет актуальность настоящей работы. Установление влияния термической обработки электродного пека категории Б и наличие добавок высокотемпературного и высокоплавкого пека на выход карбонизата проводится впервые.

Целью настоящей работы является установление влияния добавок продуктов термического окисления электродного пека категории В, на выход карбонизата электродного пека категории Б, а также определение влияния термической обработки электродного пека категории Б на выход карбонизата.

Методы и принципы исследования

В качестве объектов исследования использовали пек категории Б с температурой размягчения 71,5 °C (АО «ЕВРАЗ ЗСМК», г. Новокузнецк) и продукты термического окисления электродного пека категории В (АО «Алтай Кокс», г. Заринск) с разными температурами размягчения:

1 – пек с $T_p = 114\text{ }^{\circ}\text{C}$ (П) [24];

2 – высокотемпературный пек (ВТП) с $T_p = 148\text{ }^{\circ}\text{C}$ [22];

3 – высокоплавкий пек (ВПП) с $T_p = 202\text{ }^{\circ}\text{C}$ [24].

Термическую обработку пека Б проводили в сушильном шкафу по методике, описанной в работе [13]. Образцы пеков нагревали до температур 250, 300, 350 $^{\circ}\text{C}$ с последующей выдержкой при конечных температурах в течение 30 мин. Для полученных материалов измеряли выход летучих веществ X по ГОСТ 9951 – 2023.

Получили смеси на основе пека категории Б с добавками продуктов ТО пека категории В (П, ВТП, ВПП). Пеки измельчали механическим способом, далее просеивали через сито размером менее 200 мкм для получения аналитической пробы. В измельченные навески электродного пека категории Б вносили по отдельности добавки аналитических проб П, ВТП, ВПП (массовая доля добавки $\omega = 31,7\%$). Дополнительно приготовили смесь с меньшим содержанием добавки пека ВПП ($\omega = 12,0\%$). Смеси тщательно размешивали металлическим шпателем и помещали в керамический тигель с притертой крышкой. Далее смеси нагревали до температуры 240 $^{\circ}\text{C}$ и выдерживали в течение 30 мин. Нагрев обеспечивал получение однородного продукта без отделения легких компонентов пека, о чем свидетельствует отсутствие жидких дистиллятов и сажи на керамической крышке тигля.

Полученные после термической обработки пеки и смесевые составы карбонизировали в тиглях с притертой крышкой в муфельной печи путем нагрева до температуры 850 $^{\circ}\text{C}$ и выдержки в течение 60 мин. Далее определяли выход карбонизата (K) как процентное отношение массы полученного карбонизата к массе навески пека или смесевого состава.

Основные результаты

В табл. 1 представлены данные о выходе летучих веществ для электродного пека категории В и его продуктов, полученных методом ТО.

Для образцов П термическое окисление ($T = 260 - 320\text{ }^{\circ}\text{C}$) и нагрев до температуры 410 $^{\circ}\text{C}$ приводили к незначительному росту величины K . В результате ТО в сочетании с термической обработкой электродного пека В (образцы ВПП) происходит снижение выхода летучих веществ с 53 до 33 % [24]. Значение K после термической обработки увеличивается до 77,90 %. Полученный эффект можно объяснить следующим образом: термическое окисление при температуре 260 – 320 $^{\circ}\text{C}$ электродного пека категории В приводит к росту α - и α_1 -фракций [24], термическая обработка и ТО в области низкотемпературной карбонизации (при $T \leq 400\text{ }^{\circ}\text{C}$) – к существенному росту α_1 -фракции [23]. Сочетание термообработки и ТО может привести к заметному увеличению значения K .

Для образцов ВТП, полученных путем ТО электродного пека категории В в интервале температур 260 – 360 $^{\circ}\text{C}$, приводит к росту α - и α_1 -фракции, что также могло увеличить значение K [17; 18].

Состав образцов ВПП и П в соотношении 1:1 имел выход карбонизата 61 %. Это определяет перспективу применения высокоплавких пеков в качестве добавок в электродный пек для увеличения выхода карбонизата.

В табл. 2 представлены характеристики электродного пека категории Б и смесевых составов на его основе.

Введение в электродный пек категории Б добавки П (31,8 %) приводило к увеличению количества K до 53,6 %. Добавки в электродный пек категории Б пеков ВТП (31,8 %) и ВПП (12 %) приводили к увеличению количества K до 54 %. Можно сделать вывод, что добавление высокоплавкого пека ВПП более эффективно влияет на выход конечного продукта. Увеличение процентного содержания ВПП до 31,6 % увеличивало количество K до 60 %. Внесение добавок в электродный пек категории Б приводит к уменьшению выхода летучих веществ X .

Т а б л и ц а 1

Характеристики электродного пека категории В и полученных продуктов ТО

Table 1. Characteristics of the electrode pitch of category C and the resulting products TO

Материал	X , %	K , %
В	53,0	48,00
П	47,7	49,00
ВПП	33,0	77,90
ВТП	42,6	63,17
ВПП:П (1:1)	33,0	61,00

Характеристики электродного пека Б и смесевых составов на его основе**Table 2. Characteristics of electrode pitch B and mixtures based on it**

Название	X, %	K, %
Б	54,30	50,84
Б + П (31,8 %)	50,30	53,60
Б + ВТП (31,8 %)	48,69	54,20
Б + ВПП (31,6 %)	36,70	60,10
Б + ВПП (12 %)	50,36	54,30

В табл. 3 представлена зависимость выхода летучих веществ от температуры термической обработки электродного пека категории Б. При температуре 250 °С значение X уменьшилось с 54,3 до 50,0 % (нагрев) и до 49,2 % (нагрев и термостатирование), разница между значениями X мало отличается от вида термической обработки, термостатирование длительностью 30 мин практически не влияет на уменьшение выхода летучих веществ. При термической обработке ($T = 350$ °С) величина $X = 47,8$ %, при нагреве и термостатировании – 48,4 %.

Получена зависимость величины K от температуры термической обработки (рис. 1). Нагрев до температуры 250 °С не приводит к увеличению параметра K по сравнению с исходным пеком (табл. 1). Термостатирование при температуре 250 °С в течение 30 мин приводит к увеличению значения K на 3 %. Повышение температуры термической обработки до 350 °С приводит к увеличению величины K с 50,8 до 58,0 % для обеих типов обработки. Для более высокотемпературных экспериментов выдержка играет незначительную роль, так как все основные изменения успевают происходить во время эксперимента в выбранном температурном интервале.

Из результатов видно (табл. 2), что введение в электродный пек категории Б добавок продуктов ТО со сниженным выходом летучих веществ X приводит к уменьшению этого параметра в конечном продукте. Частичное снижение значения

X может быть следствием предварительной термической обработки во время приготовления смесового состава. Введение добавок в электродный пек категории Б в виде продуктов ТО приводит к увеличению содержания α - и α_1 -фракций в конечном продукте, что увеличивает параметр K.

На рис. 2 представлена зависимость выхода карбонизата от выхода летучих веществ. Во время термической обработки при температуре 250 °С происходит отделение легких компонентов, что приводит к уменьшению значения X (рис. 2, кривая 1). При нагреве до 250 °С уменьшение выхода летучих веществ X с 54,3 до 50,2 % не повлияло на изменение параметра K (рис. 2, кривая 1), термостатирование в течение 30 мин при рассматриваемой температуре приводило к уменьшению значения X до 49,2 % и увеличению величины K на 3 % (рис. 2, кривая 2). Можно предположить, что реакции полимеризации, проходящие при термостатировании, могли увеличить выход карбонизата.

Выводы

Показано, что термическое окисление электродного пека категории В увеличивает выход карбонизата. Увеличение добавки в электродный пек категории Б с 12,0 до 31,6 % в виде высокоплавкого пека ВПП повышает выход карбонизата с 54,3 до 60,0 %. Повышение температуры термической обработки электродного пека Б с 250 до 350 °С увеличивает выход карбонизата до 58 %.

Выход летучих веществ электродного пека категории Б в зависимости от температуры и способа термической обработки**Table 3. The yield of volatile substances of the electrode pitch of category B depends on the temperature and the method of heat treatment**

T, °С	X, %	
	Без выдержки	Выдержка 30 мин
250	50,2	49,2
300	48,9	48,0
350	48,4	47,8

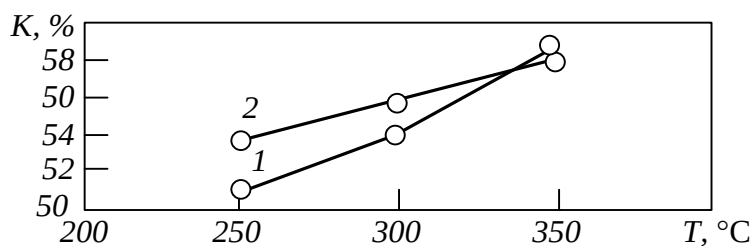


Рис. 1. Зависимость выхода карбонизата от температуры термической обработки пека категории Б:

1 – нагрев пека; 2 – нагрев пека с термостатированием 30 мин

Fig. 1. Dependence of the yield of carbonizate on the temperature of the heat treatment of the pitch of category B:

1 – heating of the pitch; 2 – heating of the pitch with thermostating duration of 30 minutes

Список литературы

1. Привалов В.Е., Степаненко М.А. *Каменно-угольный пек*. Москва: Металлургия. 1981:208.
2. Мальцева Л.Д., Гайсаров М.Г., Мочалов В.В. Исследование свойств пеков и их групповых составляющих. *Кокс и химия*. 1980;8:33–36.
3. Юркевич Я., Росинский С. *Углекислоты*. Москва: Металлургия. 1973:360.
4. Кекин Н.А., Степан А.А. О данных хроматографического анализа и составе каменно-угольных пеков. *Кокс и химия*. 1986;1:30–34.
5. Уткин Ю.А., Янко Э.А., Соловейчик Э.Я., Страхов В.М. Об оценке качества каменно-угольного пека как связующего в производстве анодов. *Кокс и химия*. 2012;9:17–21.
6. Rani S., Kumari K., Kumar P., Sanjay R. Dhakate S.R., Kumari S. Enhancing spinnability and properties of carbon fibers through modification of isotropic coal tar pitch precursor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2024;181:106566. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106566>.
7. Yang P.J., Li T.H., Li H., Dang A.L., Yuan L. Effect of coal tar pitch modification on the structure and char yield of pyrolysis epoxy resin carbons. *Diamond and Related Materials*. 2023;137:110099. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.110099>.
8. Fu S., Yang T., Song Y., Tian X., Wang C., Ma Z., Wu J., Li Z. Effect of iodine treatment on structural and electrochemical performance of coal tar pitch based carbon materials for sodium ion batteries. *Applied Surface Science*. 2024;657:159731. <https://doi.org/10.1016/j.apusc.2024.159731>.
9. Liu S., Wang L., Li X., Xue C. Coal tar pitch derived N-doped mesoporous carbon through «carbonization in air» strategy for high performance supercapacitor electrode. *Journal of Alloys and Compounds Available online*. 2024;175364. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.175364>.
10. Sun W., Sun Q., Lu R. et al. Sodium hypophosphite-assist pyrolysis of coal pitch to synthesis P doped carbon nanosheet anode for ultrafast and long-term cycling sodium-ion batteries. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;889:161678. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161678>.

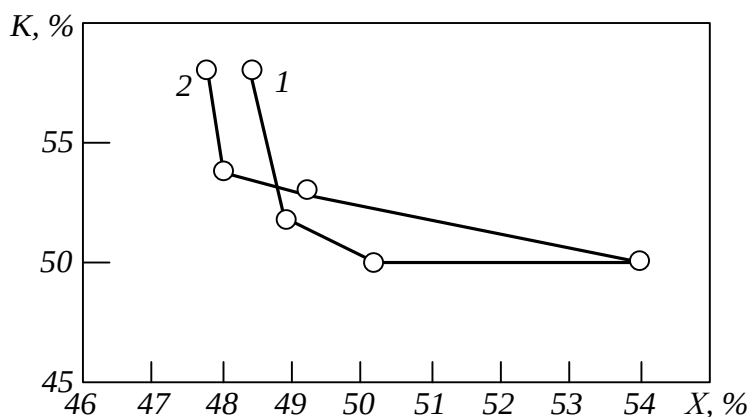


Рис. 2. Зависимость выхода карбонизата от выхода летучих веществ для пека категории Б после термической обработки:

1 – нагрев пеков; 2 – нагрев пека с термостатированием 30 мин

Fig. 2. Dependence of the yield of carbonizate on the yield of volatile substances for category B pitch after heat treatment:

1 – heating of the pitches; 2 – heating of the pitch with thermostating for 30 minutes

11. Zhao J., Zuo X., Long X., Cui Z., Yuan G., Dong Z., Zhang J., Cong Y., Li X. Accelerating the oxidative stabilization of pitch fibers and improving the physical performance of carbon fibers by modifying naphthalene-based mesophase pitch with C9 resin. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2021;154:105009. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.105009>.
12. Чистяков А.Н. Кинетика термического и термоокислительного превращения каменноугольного пека. *Кокс и химия*. 1978;11:38–40.
13. Ковалев Р.Ю., Наймушина Т.М., Никитин А.П. Термообработка среднетемпературных электродных каменноугольных пеков. В кн.: *Материалы во внешних полях. Труды XII Международного онлайн-симпозиума*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ. 2024:88–90.
14. Галигузов А.А., Малахо А.П., Авдеев В.В., Rogozin A.D. Сравнительные характеристики каменноугольных пеков: качественный анализ, стабильность свойств при хранении и термическая стабильность. *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2015;5(12):55–57.
15. Xiaojun L., Jian X., Yanqing L., Jie L., Zhao F., Yan S., Yexiang L. Effects of pitches modification on properties of TiB₂-C composite cathodes. *Magnesium Technology*. 2009:1–5.
16. 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;43:219–227. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0821-x>.
17. Сидоров О.Ф. Современные представления о процессе термоокисления каменноугольных пеков. Часть 1. Механизм взаимодействия кислорода с углеводородами пека. *Кокс и химия*. 2002;9:35–43.
18. Сидоров О.Ф. Современные представления о процессе термоокисления каменноугольных пеков. Часть 3. Влияние условий окисления на характер термохимических превращений и структуру пека. *Кокс и химия*. 2004;6:24–30.
19. Kovalev R.Yu., Gavriljuk O.M., Nikitin A.P., Ismagilov Z.R. Thermal Oxidation of Electrode Coal Pitch. *Coke and Chemistry*. 2023;66(7):351–354. <https://doi.org/10.3103/S1068364X23700941>.
20. Мочалов В.В. Особенности структуры каменноугольных электродных пеков. В кн.: *Сырьевые материалы электродного производства*. Москва: НИИГрафит. 1986:5–19.
21. Choia K.H., Lee S.-Y., Hong I., Son S., An J.-C., Kim S. Molecular-level investigation of coal-tar pitch treated by air blowing: Revealing the restructure of aromatic compounds via radical reaction. *Carbon*. 2023;203:377–385. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.11.022>.
22. Гаврилюк О. М., Ковалев Р.Ю., Исмагилов З.Р. Отработка технологии получения высоко-температурного пека. В кн.: *ХимРеактор-25. Сб. тезисов XXV международной конференции по химическим реакторам*. Институт катализа им. Г.К. Борескова СО РАН. 2023:306–307.
23. 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;5(3):21948–21960. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03226>
24. Ковалев Р.Ю., Наймушина Т.М. Термообработка электродного пека. В кн.: *Материалы во внешних полях. Труды XII Международного онлайн-симпозиума*. Новокузнецк: ИЦ СибГИУ. 2024:92–94.
25. 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;10:37–39.
26. Twigg A.N. Relationship between chemical structure and secondary quinoline insoluble formation in electrode binder pitches. *Fuel*. 1987;66(11):1540–1543. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(87\)90015-9](https://doi.org/10.1016/0016-2361(87)90015-9)
27. Kumari K., Rani S., Kumar P., Prakash S., Dhakate S.R., Kumari S. Study of mesophase pitch based carbon fibers: Structural changes as a function of anisotropic content. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2023;171:105961. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105961>.
28. Lia L., Lina X., Zharga Y., Daib J., Dua D., Wanga Y. Characteristics of the mesophase and needle coke derived from the blended coal tar and biomass tar pitch. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2020;150:104889. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104889>.
29. Montes-Moránab M.A., Crespoa J.L., Youngb R.J., Garciaa R., Moineo S.R. Mesophase from a coal tar pitch: a Raman spectroscopy study. *Fuel Processing Technology*. 2002;77-78:207–212. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(02\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(02)00079-6)
30. Lewis I. Chemistry of carbonization. *Carbon*. 1982;20:519–529. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(82\)90089-6](https://doi.org/10.1016/0008-6223(82)90089-6)

REFERENCES

1. Privalov V.E., Stepanenko M.A. *Coal pitch*. Moscow: Metallurgya, 1981:208. (In Russ.).
2. Maltseva L.D., Gaisarov M.G., Mochalov V.V. Investigation of the properties of pitches and their group components. *Koks i khimiya*. 1980;8:33–36. (In Russ.).

3. Yurkevich Ya., Rosinsky S. *Coal chemistry*. Moscow: Metallurgya, 1973:360. (In Russ.).
4. Kekin N.A., Stepan A.A. On chromatographic analysis data and composition of coal pitches. *Koks i khimiya*. 1986;1:30–34. (In Russ.).
5. Utkin Yu. A., Yanko E.A., Soloveitchik E.Ya., Strakhov V.M. On the assessment of the quality of coal pitch as a binder in the production of anodes. *Koks i khimiya*. 2012;9:17–21. (In Russ.).
6. Rani S., Kumari K., Kumar P., Sanjay R. Dhakate S.R., Kumari S. Enhancing spinnability and properties of carbon fibers through modification of isotropic coal tar pitch precursor. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2024;181:106566. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106566>.
7. Yang P.J., Li T.H., Li H., Dang A.L., Yuan L. Effect of coal tar pitch modification on the structure and char yield of pyrolysis epoxy resin carbons. *Diamond and Related Materials*. 2023;137:110099. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2023.110099>
8. Fu S., Yang T., Song Y., Tian X., Wang C., Ma Z., Wu J., Li Z. Effect of iodine treatment on structural and electrochemical performance of coal tar pitch based carbon materials for sodium ion batteries. *Applied Surface Science*. 2024;657:159731. <https://doi.org/10.1016/j.apusc.2024.159731>.
9. Liu S, Wang L., Li X., Xue C. Coal tar pitch derived N-doped mesoporous carbon through «carbonization in air» strategy for high performance supercapacitor electrode. *Journal of Alloys and Compounds Available online*. 2024;175364. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2024.175364>.
10. Sun W., Sun Q., Lu R. et all. Sodium hypophosphite-assist pyrolysis of coal pitch to synthesis P doped carbon nanosheet anode for ultrafast and long-term cycling sodium-ion batteries. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021;889:161678. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.161678>.
11. Zhao J., Zuo X., Long X., Cui Z., Yuan G., Dong Z., Zhang J., Cong Y., Li X. Accelerating the oxidative stabilization of pitch fibers and improving the physical performance of carbon fibers by modifying naphthalene-based mesophase pitch with C9 resin. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2021;154:105009. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.105009>.
12. Chistyakov A.N. Kinetics of thermal and thermo-oxidative pre-rotation of coal tar. *Koks i khimiya*. 1978;11:38–40. (In Russ.).
13. Kovalev R.Yu., Naimushina T.M., Nikitin A.P. Heat treatment of medium-temperature electrode coal pitches. In: *Materials in external fields. Proceedings of the XII International Online Symposium*. Novokuznetsk: Its SibGIU. 2024:88–90. (In Russ.).
14. Galiguzov A.A., Malakho A.P., Avdeev V.V., Rogozin A.D. Comparative characteristics of coal pitches: qualitative analysis, stability of properties during storage and thermal stability. *News of higher educational institutions. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2015;5(12):55–57. (In Russ.).
15. Xiaojun L., Jian X., Yanqing L., Jie L., Zhao F., Yan S., Yexiang L. Effects of pitches modification on properties of TiB₂-C composite cathodes. *Magnesium Technology*. 2009:1–5.
16. 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;43:219–227. <https://doi.org/10.1007/s11661-011-0821-x>.
17. Sidorov, O.F. Modern ideas about the process of thermal oxidation of coal pitches. Part 1. The mechanism of interaction of oxygen with pitch hydrocarbons. *Koks i khimiya*. 2002;9:35–43. (In Russ.).
18. Sidorov O.F. Modern ideas about the process of thermal oxidation of coal pitches. Part 3. The influence of oxidation conditions on the nature of thermochemical transformations and the structure of pitch. *Koks i khimiya*. 2004;6:24–30. (In Russ.).
19. Kovalev R.Yu., Gavriljuk O.M., Nikitin A.P., Ismagilov Z.R. Thermal Oxidation of Electrode Coal Pitch. *Coke and Chemistry*. 2023;66(7):351–354. <https://doi.org/10.3103/S1068364X23700941>.
20. Mochalov V.V. Features of the structure of carboniferous electrode pitches. In: *Collection of works. Raw materials of electrode production*. Moscow: Niigraphit. 1986:5–19. (In Russ.).
21. Choia K.H., Lee S-Y., Hong I., Son S., An J-C., Kim S. Molecular-level investigation of coal-tar pitch treated by air blowing: Revealing the restructure of aromatic compounds via radical reaction. *Carbon*. 2023;203:377–385. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.11.022>.
22. Gavriljuk O. M., Kovalev R.Yu., Ismagilov Z.R. Development of the technology of high-temperature pitch production. In: *Chemreaktor-25: Collection of abstracts of the XXV International Conference on Chemical reactors*. G.K. Boreskov Institute of Catalysis SB RAS. 2023:306–307. (In Russ.).
23. 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;5(34):21948–21960. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c03226>

24. Kovalev R.Yu., Naimushina T.M. Heat treatment of electrode pitch. In: *Materials in External fields: Proceedings of the XII International Online Symposium*. ITs SibGIU, 2024:92–94. (In Russ.).
25. Gaisarov M.G., Maltsev L.D., Mochalov V.V. On the nature of the α 1-fraction of pitch and its effect on the quality of carbonaceous products. *Koks i khimiya*. 1981;10:37–39. (In Russ.).
26. Twigg A.N. Relationship between chemical structure and secondary quinoline insoluble formation in electrode binder pitches. *Fuel*. 1987;66(11):1540–1543. [https://doi.org/10.1016/0016-2361\(87\)90015-9](https://doi.org/10.1016/0016-2361(87)90015-9).
27. Kumari K., Rani S., Kumar P., Prakash S., Dhakate S.R., Kumari S. Study of mesophase pitch based carbon fibers: Structural changes as a function of anisotropic content. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2023;171:105961. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2023.105961>.
28. Lia L., Lina X., Zharga Y., Daib J., Dua D., Wanga Y. Characteristics of the mesophase and needle coke derived from the blended coal tar and biomass tar pitch. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2020;150:104889. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104889>.
29. Montes-Moránab M.A., Crespoa J.L., Youngb R.J., Garciaa R., Moinelo S.R. Mesophase from a coal tar pitch: a Raman spectroscopy study. *Fuel Processing Technology*. 2002;77–78: 207–212. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(02\)00079-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(02)00079-6)
30. Lewis I. Chemistry of carbonization. *Carbon*. 1982.20:519–529. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(82\)90089-6](https://doi.org/10.1016/0008-6223(82)90089-6)

Сведения об авторах

Родион Юрьевич Ковалев, к.ф.-м.н., научный сотрудник лаборатории термических превращений угля, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН

E-mail: Kovaleviuhm@yandex.ru

ORCID: 0009-0001-7776-7440

SPIN-код: 8244-8479

Андрей Павлович Никитин, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник лаборатории термических превращений угля, Федеральный исследовательский центр угля и углехимии СО РАН

E-mail: nikitinandreyp@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-2187-2281

SPIN-код: 2980-7637

Information about the authors

Rodion Yu. Kovalev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Researcher at the Laboratory of Thermal Coal Conversions. Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS

E-mail: Kovaleviuhm@yandex.ru

ORCID: 0009-0001-7776-7440

SPIN-код: 8244-8479

Andrey P. Nikitin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior researcher at the Laboratory of Thermal Coal Conversions. Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry SB RAS

E-mail: nikitinandreyp@yandex.ru

ORCID: 0000-0003-2187-2281

SPIN-код: 2980-7637

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 28.10.2024

После доработки 11.11.2024

Принята к публикации 20.11.2024

Received 28.10.2024

Revised 11.11.2024

Accepted 20.11.2024