



Научная статья

УДК 662.749.33

DOI: 10.52957/2782-1900-2025-6-1-55-64

ВЛИЯНИЕ ТЕРМООКИСЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДНОГО ПЕКА НА ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО СОСТАВА И СВОЙСТВ

Р.Ю. Ковалев

Родион Юрьевич Ковалев, канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник

¹ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты СО РАН», 650991, Россия, Кемерово, Советский проспект, д. 18, Kovaleviuhm@yandex.ru

Ключевые слова:

каменноугольный пек, термоокисление, температура размягчения, выход пек, фракционный состав, связующий пек.

Аннотация. В работе проведена серия экспериментов по получению пеков с повышенной температурой размягчения $T_p = 110-120$ °С методом низкотемпературного термоокисления (до 300 °С) электродного каменноугольного пек категории В ($T_p = 91$ °С). Определены условия термоокисления, при которых получены данные типы пек. Также установлены зависимости температуры размягчения и выходы продуктов термоокисления от длительности процесса и скорости расхода воздуха.

Для цитирования:

Ковалев Р.Ю. Влияние термоокисления электродного пек на изменения его состава и свойств // *От химии к технологии шаг за шагом*. 2025. Т. 6, вып. 1. С. 55-64. URL: <https://chemintech.ru/ru/nauka/issue/5879/view>

Введение

Каменноугольный пек - 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 ($T = 270-360$ °С); каменноугольный пек ($T < 360$ °С)). Изучение структуры и свойств каменноугольного пек, методов его получения имеет большие перспективы для получения новых технологий в производстве электродного пек [1].

Основное применение каменноугольных пек - связующее для электродных изделий и анодной массы. В качестве связующего для анодной массы применяют в основном электродные пеки категорий Б1, В [2]. Большую перспективу имеют в качестве связующего, пеки с повышенной температурой размягчения $T_p > 100$ °С и высокотемпературные пеки. За рубежом в качестве связующего для анодной массы применяется пек с $T_p = 110-115$ °С [3, 4]. Данный тип связующего хорошо себя зарекомендовал в получении электродов и анодной массы согласно результатам, представленным в работе [4].

В работах [5-7] установлено, что пеки с повышенной температурой размягчения снижают разрушаемость анодной массы, а именно для пек с температурой



размягчения $T_p = 100-110$ °С анодная масса имеет максимум прочности сжатия и минимум удельного электрического сопротивления. Экспериментально показано в работах [5-7], что для пеков с $T_p = 110-120$ °С значение вязкости было выше по сравнению с электродными пеками. Установлено, что при $T = 140$ °С для данных типов пека происходит рост вязкости с 200 до 500 Па·с, а также увеличение поверхностного натяжения с 46 до $48 \cdot 10^{-3}$ Н·м и повышение выхода кокса с 87 до 90,6% [5-7]. Для пеков с $T_p = 105-120$ °С содержание α_2 и β -фракций, определяющих вязущие свойства пека, имело максимальные значения [5-7]. Также согласно исследованиям авторов в работах [5-7], снижение прочности для данных пеков связано с ростом α_1 -фракции. В работе [8] показано, что шихта для анодной массы, представленная в виде пекококсовой композиции на основе связующего из высокотемпературного пека, имела высокую пластичность и вязкость по сравнению с пекококсовыми композициями на основе электродных пеков.

Существует множество работ, посвященных получению данных пеков. В работах [9, 10] пек-связующее получен методом термического окисления антраценовой фракции с добавками углей 2Б (8,3%) и Д (4,8%). Пеки имели температуры размягчения 111 °С – для пека, полученного из антраценовой фракции с добавками угля марки 2Б, и 120 °С – для пека с добавками угля марки Д [9, 10].

В работе [11] получен пек-связующее с $T_p = 112$ °С методом термического окисления каменноугольной смолы с добавлением резиновой крошки -5% по массе. В работе [12] пек связующее с $T_p = 114$ °С, $\alpha = 43,7$, $\alpha_1 = 7,8$ получен экстрагированием угля ГЖ в антраценовом масле в соотношении 1/2. В работе [13] получены пеки связующие методом термического растворения углей Г и Ж в антраценовом масле с последующим термоокислением. Кроме того, получен пек с $T_p = 119$ °С из угля марки Г и пек с $T_p = 111$ °С из угля марки Ж соответственно [13].

Следует также отметить перспективы получения пеков-связующих из смолы полукоксования. В работе [14] получен пек с $T_p = 120$ °С, $\alpha = 34,8\%$ и $\alpha_1 = 0,2\%$ методом дистилляции смолы полукоксования до 410 °С и выдержкой при данной температуре в течение часа. Единственным недостатком данного пека был высокий выход летучих веществ 64% [14]. В работе [15] методом термоокисления смолы полукоксования в течение 30 мин расход воздуха 20 л/кг получен пек-связующее с $T_p = 104$ °С с содержанием бенз[а]пирена в 20 раз ниже, чем у каменноугольного электродного пека.

Особый интерес и перспективу применения в качестве связующего представляют пеки, полученные смешением продуктов коксохимической промышленности с нефтепродуктами. В [16-19] показано, что нефтяные и нефтекаменноугольные пеки имеют низкое содержание бенз[а]пирена по сравнению с каменноугольными пеками. В работе [19] получены связующие нефтекаменноугольные пеки, пек с $T_p = 116$ °С получен при смешении каменноугольного и нефтяного в соотношении 70/30, а пек с $T_p = 119$ °С получен в соотношении компонентов 55/45. В работе [20] получен пек с $T_p = 110$ °С в результате смешения каменноугольной смолы и тяжелой смолы пиролиза



85:15% с дистилляцией до 410 °С и последующим термоокислением при $T = 275$ °С в течение 4-х часов и скоростью расхода воздуха 26,4 л/кг.

В работах [7, 21] пеки-связующие получали методом термоокисления среднетемпературных пеков. В работе [22] пек с $T_p = 111$ °С получали термопрепарированием (температура процесса 410 °С, длительность 3 часа) пека с температурой размягчения 65,8 °С при низкотемпературном термоокислении данного пека в течение 3 часов, в результате был получен пек с температурой размягчения 117 °С. Результаты указывают на преимущество метода термоокисления среднетемпературного пека над другими методами в получении пеков-связующих.

Следует уделить внимание получению данных пеков с помощью термоокисления низкотемпературных или мягких пеков. В работе [23] методом термического окисления низкотемпературного пека с $T_p = 46$ °С в течение 4 часов при температуре 350 °С получен пек с $T_p = 112$ °С и содержанием $\alpha = 37,1\%$. Данные результаты показывают перспективу получения пеков-связующих методом термического окисления низкотемпературных и среднетемпературных пеков.

В данной работе будет проведен ряд экспериментов по низкотемпературному термоокислению электродного пека категории В для получения пеков с $T_p = 110-120$ °С. Известно, что при данном типе термоокисления снижается содержание бенз[а]пирена в конечном продукте согласно результатам работ [24, 25]. Данные утверждения определяют актуальность работы.

Впервые определены оптимальные условия получения пека с повышенной $T_p = 110-120$ °С путем термоокисления электродного пека категории В. Впервые установлены зависимости T_p и выходов получаемых пеков от длительности и скорости расхода воздуха при термоокислении электродного пека категории В. Приведенные выше утверждения определяют новизну данной работы.

Цели данной работы: Получить зависимости выходов пеков и их температуры размягчения от длительности низкотемпературного термоокисления электродного пека категории В. Определить условия, при которых методом низкотемпературного термоокисления электродного пека категории В можно получить пеки с $T_p = 110-120$ °С. Определить данные технического анализа для полученных пеков с повышенной температурой размягчения.

Описание материалов, экспериментальной установки и методов исследования

В данной работе пеки будут термообработываться под воздействием воздуха на установке, показанной на рис. 1. Ранее данная установка использовалась для получения высокотемпературного пека в работах [26, 27].

Пек помещали в цилиндрический реактор объемом 4 л, высотой 15 см, диаметром 10 см (5). Воздух подавался компрессором (1) и проходил через цилиндрическую трубку (4) диаметром 9 мм для окисления и перемешивания расплавленного пека с отгонкой дистиллятов. Под действием воздуха из трубки (4) происходило термоокисление пека, и отработанные газы-дистилляты удалялись из реактора.

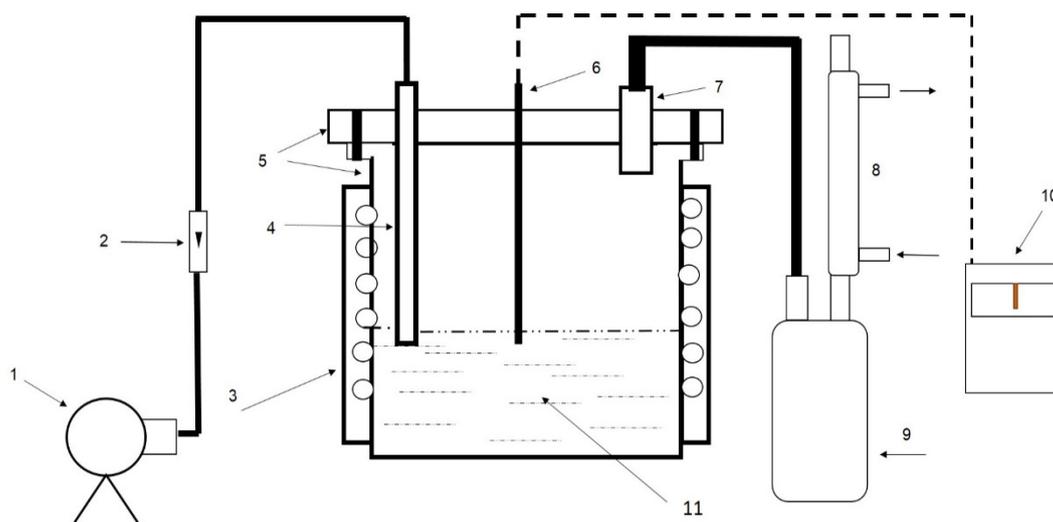


Рис.1 Схема установки по термоокислению пека [27].

1 – компрессор; 2 – ротаметр; 3 – электрическая печь; 4 – цилиндрическая трубка для окисления; 5 – цилиндрический реактор с прикрепленной к нему винтами крышкой; 6 – термопара; 7 – отводная труба для выхода отработанных газов и дистиллятов; приемник дистиллятов; 8 – холодильник; 9 – сборник дистиллятов; 10 – терморегулятор; 11 – пек.

Использовался электродный каменноугольный пек категории В (АО «Алтай-Кокс») с температурой размягчения $T_p = 91$ °С. Проведены серии экспериментов с разными длительностями процесса термоокисления до максимальной температуры процесса 300 °С и скоростями расхода воздуха Q (расход воздуха рассчитывали по следующей формуле: $q = \frac{Q}{t \times m}$, где t – длительность термоокисления, m – масса навески пека).

Из результатов фракционного состава полученных пеков определены параметры продуктов термического окисления электродного пека категории В. Температуру размягчения T_p полученных пеков определяли по методу «Кольцо и стержень» (ГОСТ 9950-83), а содержание нерастворимых в толуоле веществ α -фракции по ГОСТ 7847. Содержание нерастворимой в толуоле и хинолине α_1 -фракции определяли по ГОСТ 10200 методом центрифугирования. Содержание α_2 -фракции определяли по следующей формуле: $\alpha_2 = \alpha - \alpha_1$. Технический анализ проводили по известным методикам, выход летучих веществ X определяли по ГОСТ 9951-73, зольность пеков определяли по ГОСТ 7846-73.

Получение пеков с повышенной температурой размягчения

Эксперименты по получению пеков с повышенной температурой размягчения $T_p = 110-120$ °С проводились на установке рис. 1. Для получения пека использовалась навеска $m = 250$ г. Начальная температура эксперимента – 25-27 °С, при достижении температуры нагрева 260 °С подавался воздух с компрессора. Окислительная трубка находилась в непосредственном контакте с образцом. В опытах происходило перемешивание с воздухом расплавленного пека, что обеспечивало однородность исходного продукта. Заданы скорости расхода воздуха Q равные 40; 70; 100 л/час. Получены зависимости выходов пека W от длительности процесса термоокисления (рис. 2).

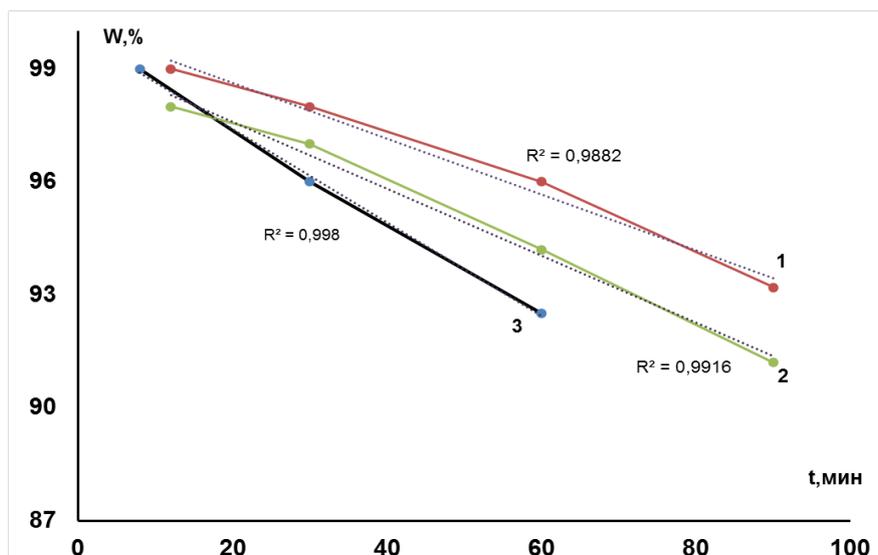


Рис. 2. Зависимость выходов пека W после низкотемпературного термоокисления от длительности процесса для разных скоростей расхода воздуха: 1 – $Q = 40$ л/ч; 2 – $Q = 70$ л/ч; 3 – $Q = 100$ л/ч.

Из рис. 2 видно, что с увеличением длительности термоокисления происходит уменьшение выхода пека. Также выход пека уменьшался с увеличением скорости расхода воздуха. Минимальное значение $W = 92,5\%$ соответствовало $Q = 100$ л/ч и длительности 60 мин. При длительностях процесса $t > 40$ мин зависимости для $Q = 70$ и 100 л/ч (кривые 2 и 3) монотонно убывали, и зависимость от длительности была линейной. Зависимость W для кривой 1 имела резкий спад при $t = 60$ мин, связанный с уменьшением значения W с 96 до 93% при увеличении длительности до 90 мин.

Для подробного исследования рассмотрим зависимость выхода пека от расхода воздуха. На рис. 3 представлена зависимость выхода пека после низкотемпературного термоокисления от расхода воздуха q .

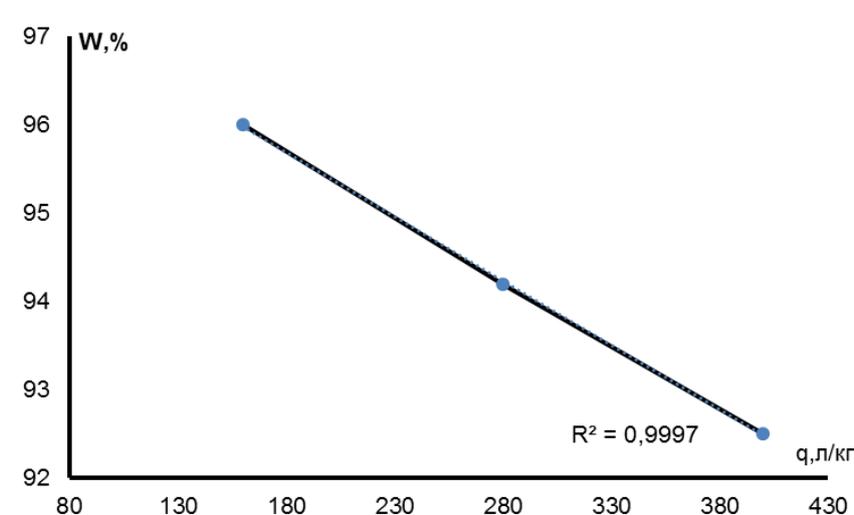


Рис. 3. Зависимость выходов пека W после низкотемпературного термоокисления (длительность 1 ч) от расхода воздуха q .

Из рис. 3 видно, что выход пеков W при термоокислении электродного пека категории В в течение 1 часа линейно уменьшался с 96 до 92,5% при увеличении расхода воздуха с 160 до 400 л/кг.



На рис. 4 представлена зависимость T_p от длительности термоокисления.

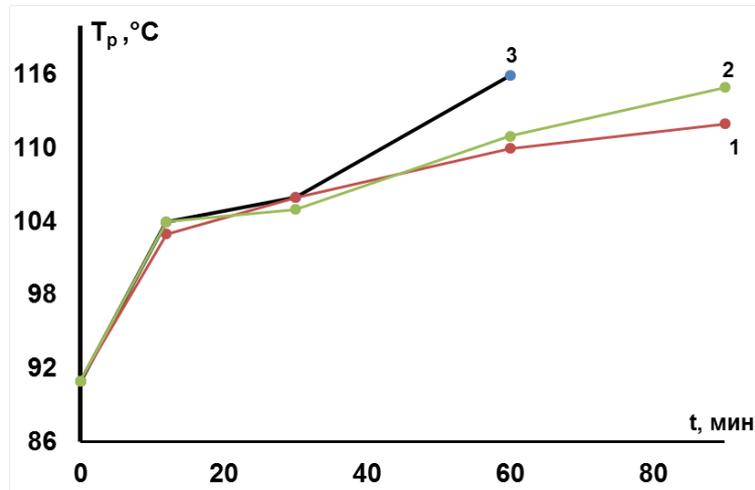


Рис. 4. Зависимость температуры размягчения продуктов низкотемпературного термоокисления от длительности процесса: 1 – $Q = 40$ л/ч; 2 – $Q = 70$ л/ч; 3 – $Q = 100$ л/ч.

Из рис. 4 виден резкий рост T_p от 91 до 103 °C для $Q = 40$ л/ч и до 104 °C для $Q = 70$ и 100 л/ч. Увеличение T_p от 104 до 106 °C при длительности от 12 до 30 мин слабо зависело от скорости расхода воздуха. Для $Q = 100$ л/ч и увеличении длительности процесса до 60 мин наблюдается резкий рост T_p до 116 °C, в то время как при $Q = 40$ и 70 л/ч температуры размягчения составляли 110 и 111 °C соответственно. При увеличении длительности с 60 до 90 мин происходило увеличение T_p до 115 °C при $Q = 70$ л/ч. Для данной длительности при $Q = 40$ л/ч T_p составляла 112 °C.

Также для детального рассмотрения изменений значения T_p от скорости расхода воздуха следует обратить внимание на зависимость от величины расхода воздуха. На рис. 5 представлена зависимость T_p после низкотемпературного термоокисления электродного пека В от расхода воздуха q .

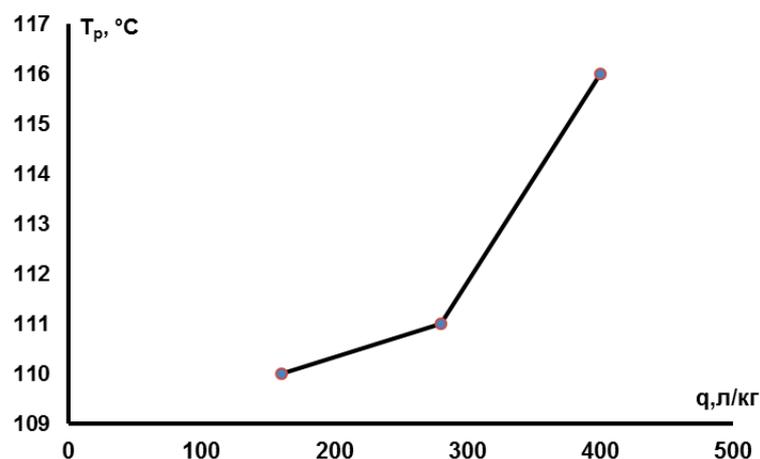


Рис. 5. Зависимость T_p для пеков после низкотемпературного термоокисления (длительность 1 ч) от расхода воздуха q .

Из рис. 5 видно, что значение T_p увеличивалось с 110 °C до 116 °C при увеличении расхода воздуха с 160 до 400 л/кг при термоокислении электродного пека категории В в течение 1 часа.



Получены интересующие нас пеки при термоокислении 90 мин со скоростью расхода воздуха 40 л/ч (пек В_{Т1}) и 70 л/ч (пек В_{Т2}). И пеки В_{Т3}, В_{Т4} и В_{Т5} полученные термоокислением длительностью 60 мин, со скоростями расхода воздуха 40, 70 и 100 л/ч.

Таблица 1. Данные пеков, полученных низкотемпературным ТО среднетемпературного пека

№	Название	t, мин	Q, л/ч	W, %	T _p , °C	α ₁ , %	X, %
1	Электродный пек В				91	7,5	53,0
2	В _{Т1}	90	40	93,0	112	7,6	49,6
3	В _{Т2}	90	70	91,2	115	7,5	45,1
4	В _{Т3}	60	40	96,0	110	7,5	49,8
5	В _{Т4}	60	70	94,2	111	7,6	45,3
6	В _{Т5}	60	100	92,5	116	7,5	45,5

Как видно из табл. 1, содержание α₁-фракции для всех пеков оставалось практически неизменным по сравнению с исходным электродным пеком вне зависимости от скорости расхода воздуха и длительности процесса. Для пека В_{Т1} определяли содержание α-фракции. Установлено, что по сравнению с исходным пеком, рост α-фракции (рост α₂-фракции с 26,8 до 34) был невысоким от 34,3 до 41,5%. Рост α₂-фракции в свою очередь увеличивает суммарное значение β+α₂-фракций, определяющих вязущие свойства пеков.

Выход летучих веществ X уменьшался с 53,0% до ~ 49% для В_{Т1} и В_{Т3} при термоокислении с Q = 40 л/ч. Также значение X уменьшалось с 53 до ~ 45% для В_{Т2}, В_{Т4} и В_{Т5} при термоокислении с Q = 70 и 100 л/ч. Значение зольности в процессе термоокисления не менялось и оставалось идентичным значению для исходного пека ~ 0,15%.

Пеки В_{Т2} и В_{Т5} получали при минимальной длительности 60 мин, но с высокой скоростью расхода воздуха 70 и 100 л/ч. Увеличение Q до 70 и 100 л/ч дает возможность получать пеки с T_p = 115 °C и T_p = 116 °C при сокращении t до 60 мин.

Обсуждение и заключение

Рассмотрим зависимость изменения T_p от длительности низкотемпературного термоокисления (рис. 4). При длительности t = 12 мин происходит резкое увеличение T_p до 104 °C. Также рост T_p до величин 101 °C и 103 °C наблюдался при термоокислении до T = 275 °C, в первом случае за время t = 5 мин и Q = 40 л/ч, во втором случае за t = 3 мин и Q = 100 л/ч соответственно. Для пека в первом случае содержание α-фракции увеличивалось с 34 до 37%, а содержание α₂ увеличивалось с 26,5% до 29,5%.

Пеки с T_p = 110 °C и 111 °C получены при низкотемпературном термоокислении длительностью 60 мин при Q = 40 и 70 л/ч. Увеличение Q от 40 до 70 л/ч для данного периода термоокисления приводило к увеличению интенсивности размешивания расплавленного пека, отделению дистиллятов (о чем может свидетельствовать уменьшение выхода пека W с 96 до 94% (рис. 2) и уменьшению выхода летучих веществ X (см. табл. 1)), но не способствовало увеличению интенсивности химических реакций. Исходя из этого для повышения T_p для продукта термоокисления при Q = 70 л/ч требуется увеличение длительности термоокисления t с 60 до 90 мин.



Увеличение t до 90 мин для $Q = 70$ л/ч приводило к увеличению T_p для пека B_{T_2} ($T_p = 115$ °С) по сравнению с пеком B_{T_1} ($T_p = 112$ °С), полученном при $Q = 40$ л/ч. Увеличение Q до 100 л/ч обеспечивало эффективность размешивания расплавленного пека и способствовало увеличению числа реакций $\gamma \rightarrow \alpha_2$ в газовой фазе (согласно [28, 29]), что приводило к увеличению T_p до 116 °С в конечном продукте B_{T_5} . Отсутствие роста α_1 -фракции связано с тем, что при низкотемпературном термоокислении не происходит разрыва С-С связей и нет возможности протекания реакций в жидкой фазе следующего типа $\beta \rightarrow \alpha_2 \rightarrow \alpha_1$, приводящих к заметному росту вторичной α_1 -фракции, связанной с мезофазой [28, 29]. Аналогичный результат наблюдался ранее при термоокислении электродного пека В путем подачи воздуха к пеку через окислительный узел в [30]. Согласно результатам работ [30, 31], рост T_p в процессе термоокисления был связан с увеличением α_2 -фракции и уменьшением выхода летучих веществ Х.

Повышение расхода воздуха с 160 до 400 л/кг при термоокислении электродного пека категории В уменьшало выход пека с 98 до 92% (рис. 3) и приводило к уменьшению выхода летучих веществ Х с 49 до 45%.

Выводы

1. Получена зависимость температуры размягчения продуктов (пеков) термоокисления электродного пека категории В от длительности процесса.
2. Установлено, что T_p увеличивается, а выход пека уменьшается при увеличении расхода воздуха термоокисления электродного пека В.
3. Определены условия получения пеков с $T_p = 110-120$ °С путем термоокисления электродного пека категории В.
4. Экспериментально показано, что у пеков, полученных после низкотемпературного термоокисления пека категории В, не происходило увеличения содержания α_1 -фракции при увеличении времени термоокисления до 90 мин, но происходило увеличение T_p .
5. Получен пек с $T_p = 112$ °С и содержанием α -фракции 41,5% с помощью низкотемпературного термоокисления пека категории В.
6. Пек с $T_p = 116$ °С получали при минимальной длительности 1 час, но при максимальной скорости расхода воздуха 100 л/ч.

Работа выполнена в рамках государственного задания ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр угля и углехимии Сибирского отделения Российской академии наук» проект № 1022041700072-4.

Список источников

1. Карпин Г. М., Вшивцев В. Г., Тесаловская Т. М., Заболотный А.И., Грабовский А.Э., Егоров В.Н. АС № 1765162 СССР. Способ переработки каменноугольной смолы, 1992.
2. Utkin Y.A., Yanko E.A., Soloveichik E.Y., Strakhov V.M. Assessing coal pitch as a binder in anode production. *Coke Chem.*, 2012, 55(9), 342-346. DOI: 10.3103/S1068364X12090098.



3. **Meier M.W.** Anodes: The Impact of Raw Material Quality and Anode Manufacturing Parameters on the Behaviour in Electrolysis. In The 23rd International Course on Process Metallurgy of Aluminium, Trondheim, 2004, P. 203.
4. **Бойтлер М., Пульс К.К.** Пат. РФ № 2288251. Связующее для электродов и анодов и способ его получения, 2006.
5. **Янко Э.Я.** Исследование качества анодной массы, приготовленной на высокотемпературных пеках. *Цветмет*, 1981, 12, 73-76.
6. **Ицков М.Л., Свобода Р.В., Фролов В.И.** Влияние температуры размягчения связующих материалов на эксплуатационные характеристики анодной массы. *Цветмет*, 1983, 12, 33-35.
7. **Ицков М.Л., Дыблина Н.П., Денисенко В.И., Вегнер А.А., Сергин Е.И.** О влиянии альфа-фракции каменноугольного пека на эксплуатационные характеристики анодной массы. *Цветмет*, 1986, 8, 51-54.
8. **Шеррлюбе В.Г., Селезнев А.Н., Апалькова Г.Д.** Вязкопластические свойства масс на основе пеков с различной температурой размягчения. *Химия твердого топлива*, 2003, 5, 17-21.
9. **Barnakov C.N., Khokhlova G.P., Usov O.M.** New Materials for Binder-Pitch Production. *Coke Chem.*, 2019, 62(10), 464-467. DOI: 10.3103/S1068364X1910003X.
10. **Barnakov C.N., Vershinin S.N., Khokhlova G.P., Samarov A.P., Kozlov A.P.** Production of coal pitch by the oxidation of coal extracts in anthracene. *Coke Chem.*, 2016, 59(8), 313-315. DOI: 10.3103/S1068364X16080020.
11. **Barnakov C.N., Khokhlova G.P., Usov O.M., Naumushina T.M.** Pitch Production from Mixtures of Coal Tar and Rubber Crumbs. *Coke Chem.*, 2018, 61(8), 305-307. DOI: 10.3103/S1068364X18080033.
12. **Фризоргер В.К., Пингин В.В., Маракушина Е.Н., Крак М.И., Довженко Н.Н., Бурюкин Ф.А.** Пат. РФ № 2614445. Способ получения угольного пека-связующего для производства анодной массы углеродных электродов, 2017.
13. **Marakushina E.N., Frizorger V.K., Lazarev D.G., Krak M.I., Kuznetsov P.N., Buryukin F.A.** Study of Alternative Methods for Preparing the Pitch Binder for the Anode Paste. *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.*, 2016, 9(5), 714-723. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-5-714-723.
14. **Фризоргер В.К., Пингин В.В., Маракушина Е.Н., Гурьев Н.Н., Крак М.И., Лазарев Д.Г., Андрейков Е.И., Диковинкина Ю.А.** Пат. РФ № 2601766. Способ получения компаундного электродного пека для изготовления углеродных материалов и изделий из них, 2016.
15. **Фризоргер В.К., Пингин В.В., Маракушина Е.Н., Крак М.И., Лазарев Д.Г., Барнаков Ч.Н., Самаров А.В., Вершинин С.Н., Хохлова Г.П., Козлов А.П., Исмагилов З.Р.** Пат. РФ № 2586135. Способ получения связующего пека, 2016.
16. **Вершинина Е.П., Гильдебрандт Э.М., Селина Е.А.** Тенденции развития производства связующего для анодов алюминиевых электролизеров. *Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии*, 2012, 5(7), 752-759.
17. **Cutshall E., Mailet L.** Vertical stud Soderberg emissions using a petroleum pitch blend. *Light Met.*, 2006, 547-552.
18. **Perez M., Granda M., Garcia R., Menendez R., Romero E.** Preparation of binder pitches by blending coal-tar and petroleum pitches. *Light Met.*, 2001, 38, 573-579.
19. **Perez M., Granda M., Garcia R., Moinelo S.R., Romero M.E.** Petroleum derivatives as an alternative to binder coal-tar pitches. *Light Met.*, 2000, 531-536.
20. **Фризоргер В.К., Маракушина Е.Н., Пингин В.В., Крак М.И.** Пат. РФ № 2582411. Способ получения связующего для изготовления углеродных материалов и изделий из них, 2016.
21. **Чешко Ф.Ф., Шустиков В.И., Клешня Г.Г., Скрипченко Н.П.** Изучение влияния отдельных технологических факторов на процесс термоокислительной обработки среднетемпературного пека. *Углекимический журнал*, 2018, 5, 7-16.
22. **Petrovykh A.P., Moskalev I.V., Kisel'kov D.M., Valcifer V.A., Strelnikov V.N.** Analysis and comparison of properties of air-blown and of thermally treated pitches. *Coke Chem.*, 2015, 58(1), 23-31. DOI: 10.3103/S1068364X1501007X.
23. **Choi 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 reactions. *Carbon*, 2023, 203, 377-385. DOI: 10.1016/j.carbon.2022.11.022.



24. **Bermejo J., Fernández A.L., Prada V., Granda M. Menéndez R.** Monitoring the synthesis of new pitches from coal tar and its fractions by chromatography and related techniques. *J. Chromatogr. A*, 1999, 849(2), 507-519. DOI: 10.1016/S0021-9673(99)00608-1.
25. **Сидоров О.Ф.** Канцерогенная активность каменноугольных пеков в зависимости от технологии их получения. *Кокс и химия*, 2006, 6, 36-39.
26. **Ковалев Р.Ю., Гаврилюк О.М.** Оптимизация технологии получения высокотемпературного пека. Инновационный конвент "Кузбасс: образование, наука, инновации": Материалы XII Инновационного конвента. Кемерово: Кемеровский государственный университет, 2024. С. 356-357.
27. **Ковалев Р.Ю., Никитин А.П.** Установка по получению высокотемпературного пека. Инновационные технологии и решения в промышленности: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). Ишимбай-Стерлитамак: ФГБОУ ВО "Уфимский университет науки и технологий", 2024. С. 396-398.
28. **Сидоров О.Ф.** Современные представления о процессе термоокисления каменноугольных пеков. 1. Механизм взаимодействия кислорода с углеводородами пека. *Кокс и химия*, 2002, 9, 35-43.
29. **Сидоров О.Ф.** Современные представления о процессе термоокисления каменноугольных пеков. Ч.3 Влияние условий окисления на характер термохимических превращений и структуру пека. *Кокс и химия*, 2004, 6, 24-30.
30. **Kovalev R.Yu., Gavriljuk O.M., Nikitin A.P., Ismagilov Z.R.** Thermal Oxidation of Electrode Coal Pitch. *Coke Chem.*, 2023, 66(7), 351-354. DOI: 10.3103/S1068364X23700941.
31. **Ковалев Р.Ю.** Исследование зависимости температуры размягчения продуктов низкотемпературного термоокисления электродного пека от их состава. *Химические проблемы современности 2024: Сборник материалов VIII Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых.* Донецк: ФГБОУ ВО «Донецкий государственный университет», 2024. С. 348-352.

Поступила в редакцию 23.10.2024

Одобрена после рецензирования 26.02.2025

Принята к опубликованию 13.03.2025