

## Исследование возможности использования нефтяного кокса в производстве дробленых углеродных сорбентов

Василий А. Стрелков	<sup>1</sup>	<a href="mailto:vasia.str@ya.ru">vasia.str@ya.ru</a>	 0009-0009-5165-8666
Егор А. Першин	<sup>1</sup>	<a href="mailto:egorpershin96@gmail.com">egorpershin96@gmail.com</a>	 0009-0002-9989-6523
Елена А. Фарберова	<sup>1</sup>	<a href="mailto:elenafarb@gmail.com">elenafarb@gmail.com</a>	 0000-0002-9166-7761
Антон С. Ширкунов	<sup>1</sup>	<a href="mailto:sas@pstu.ru">sas@pstu.ru</a>	 0009-0000-6620-6907
Валерий Г. Рябов	<sup>1</sup>	<a href="mailto:rvg@pstu.ru">rvg@pstu.ru</a>	 0000-0002-8897-7371

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр-т, 29, г. Пермь, 614990, Россия

**Аннотация.** В настоящее время процессы нефтяной промышленности ориентированы на углубление переработки нефти. Одним из способов достижения данной цели является применение процесса замедленного коксования, одним из вторичных продуктов которого является нефтяной кокс. На текущий момент суммарная производительность установок замедленного коксования увеличивается, при этом растет и выход нефтяного кокса с высоким содержанием серы, что не позволяет найти его применение в типичной отрасли потребления – металлургии. В связи с этим, исследователи активно прорабатывают возможность квалифицированного альтернативного применения нефтяного кокса. Одним из перспективных направлений является использование нефтяного кокса в качестве сырья для получения активированных углей, что позволит существенно расширить сырьевую базу их производства. В настоящей работе проведены исследования возможности получения дробленых активированных углей на основе нефтяного кокса марки КЭС. В ходе экспериментов получены образцы дробленых активированных углей путем одно- и двухстадийной термической обработки (карбонизация в инертной атмосфере и активация в среде перегретого водяного пара), а также определены характеристики их пористой структуры. Результаты исследований показали, что дробленый активированный уголь, полученный путем двухстадийной термической обработки, обладает достаточно высокой удельной поверхностью (446 м<sup>2</sup>/г) и предельным объемом сорбционного пространства (0,264 см<sup>3</sup>/г). Таким образом, предложенный метод переработки нефтяного кокса в дробленый активированный уголь может служить одним из путей расширения его квалифицированного использования, а также открывает альтернативные сырьевые возможности в технологии получения активированных углей.

**Ключевые слова:** нефтяной кокс, дробленый активированный уголь, карбонизация, активация.

## Research of the possibility of using petroleum coke in the production of crushed carbon sorbents

Vasily A. Strelkov	<sup>1</sup>	<a href="mailto:vasia.str@ya.ru">vasia.str@ya.ru</a>	 0009-0009-5165-8666
Egor A. Pershin	<sup>1</sup>	<a href="mailto:egorpershin96@gmail.com">egorpershin96@gmail.com</a>	 0009-0002-9989-6523
Elena A. Farberova	<sup>1</sup>	<a href="mailto:elenafarb@gmail.com">elenafarb@gmail.com</a>	 0000-0002-9166-7761
Anton S. Shirkunov	<sup>1</sup>	<a href="mailto:sas@pstu.ru">sas@pstu.ru</a>	 0009-0000-6620-6907
Valeriy G. Ryabov	<sup>1</sup>	<a href="mailto:rvg@pstu.ru">rvg@pstu.ru</a>	 0000-0002-8897-7371

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky Av., 29, Perm, 614990, Russia

**Abstract.** Currently, the processes of the oil industry are focused on deepening oil refining. One of the ways to deepen oil refining is to obtain petroleum cokes at delayed coking plants. At the moment, the total productivity of delayed coking plants is increasing, while the output of petroleum coke with a high sulfur content is also growing, which does not allow it to be used in a typical consumption industry – the metallurgical industry. In this regard, researchers are actively exploring the possibility of qualified alternative use of petroleum coke. One of the promising directions is the use of petroleum coke as a raw material for the production of activated carbons, which will significantly expand the raw material base of their production. In this paper, studies have been conducted on the possibility of obtaining crushed activated carbons based on KES grade petroleum coke. During the experiments, samples of crushed activated carbons were obtained by single- and double-stage heat treatment (carbonation in an inert atmosphere and activation in an environment of superheated water vapor), and the characteristics of their porous structure were determined. The research results have shown that activated carbon obtained by two-stage heat treatment has a sufficiently high specific surface area (446 m<sup>2</sup>/g) and a maximum volume of sorption space (0.264 cm<sup>3</sup>/g). Thus, the proposed method of processing petroleum coke obtained by delayed coking into activated carbon can serve as one of the ways to expand its qualified use, and also opens up alternative raw material opportunities in the technology of activated carbon production.

**Keywords:** petroleum coke, crushed activated carbon, carbonization, activation.

Для цитирования

Стрелков В.А., Першин Е.А., Фарберова Е.А., Ширкунов А.С., Рябов В.Г. Исследование возможности использования нефтяного кокса в производстве дробленых углеродных сорбентов // Вестник ВГУИТ. 2023. Т. 85. № 1. С. 249–254. doi:10.20914/2310-1202-2023-1-249-254

For citation

Strelkov V.A., Pershin E.A., Farberova E.A., Shirkunov A.S., Ryabov V.G. Research of the possibility of using petroleum coke in the production of crushed carbon sorbents. Vestnik VGUIT [Proceedings of VSUET]. 2023. vol. 85. no. 1. pp. 249–254. (in Russian). doi:10.20914/2310-1202-2023-1-249-254

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License

## Введение

В настоящее время мировая экономика ориентирована на развитие процессов, углубляющих переработку нефти. Несмотря на то, что ряд передовых предприятий реализует практически безотходные технологии переработки нефти, по средней глубине переработки, составляющей 74%, Россия уступает многим развитым странам [1].

Одним из наиболее эффективных способов углубления переработки нефти является применение процесса замедленного коксования, позволяющего перерабатывать практически любые виды нефтяных остатков (гудроны, полугудроны, смолы пиролиза, крекинг-остатки, экстракты селективной очистки, асфальты, и др.) с получением фракций моторных топлив и нефтяного кокса [2, 3].

В остаточных продуктах нефтепереработки содержится многоядерные ароматические соединения, смолисто-асфальтеновые вещества, карбены и карбоиды, их наличие способствует образованию твердого продукта – кокса. Поэтому фактически, большинство тяжелых продуктов идут на коксование.

Формирование кокса – это высокотемпературный процесс, протекающий при 450–520 °С без доступа кислорода.

Качество кокса зависит от состава сырья, условий ведения процесса, скорости нагрева сырья, продолжительности выдержки реакционной смеси в камерах и количества вносимых присадок, которые добавляются в ходе коксования [4–8].

В мировой нефтепереработке самым распространенным процессом получения кокса является процесс замедленного коксования. Несмотря на то, что данный процесс является полупериодическим, именно он позволяет получать кокс довольно высокого качества, при этом дополнительно получать светлые фракции нефтепродуктов. Нефтяные коксы, как правило, содержат более 99 мас. % углерода, что позволяет рассматривать их как перспективное альтернативное сырьё для получения дроблённых активированных углей [9–20].

Исследования в области разработки методов модифицирования нефтяных коксов с целью получения сорбционных углеродных материалов в настоящее время актуальны и позволят расширить возможности квалифицированного применения нефтяных остатков.

## Материалы и методы

В настоящей работе в качестве объекта исследования использован промышленный нефтяной кокс марки КЭС, полученный методом замедленного коксования, который был подвергнут дроблению и рассеву для получения фракции с размером частиц от 1,0 до 2,0 мм. Характеристики исходного кокса приведены в таблице 1.

Таблица 1.

Характеристики исходного нефтяного кокса марки КЭС

Table 1.

Characteristics of the original petroleum coke brand KES

Показатель Parameter	Значение Value
Массовая доля воды при 100°C, % Mass fraction of water at 100°C, %	0,48
Массовая доля зольных компонентов, % Mass fraction of ash, %	0,17
Массовая доля серы, %   Mass fraction of sulfur, %	3,67
Степень кристалличности, % Degree of crystallinity, %	12,52
Истинная плотность ( $\rho_{ист}$ ), г/см <sup>3</sup> True Density ( $\rho_{ист}$ ), g/cm <sup>3</sup>	1,387
Кажущаяся плотность ( $\rho_{каж}$ ), г/см <sup>3</sup> Envelope density ( $\rho_{каж}$ ), g/cm <sup>3</sup>	1,163
Пористость, %   Porosity, %	16,08
Суммарный объём пор, см <sup>3</sup> /г Total pore volume, cm <sup>3</sup> /g	0,138
Предельный объём сорбционного пространства, см <sup>3</sup> /г The limiting sorption pore volume, cm <sup>3</sup> /g	0,001
Удельная площадь поверхности, м <sup>2</sup> /г Specific surface area, m <sup>2</sup> /g	1,64
Выход летучих веществ, мас. % Yield of volatile substances, wt%	8,17–8,63

В ходе проведённых исследований для изучения фазового состава кокса применяли рентгеновский дифрактометр Shimadzu XRD-7000.

Определение влажности образцов исходного материала и готовых сорбентов проводили с использованием анализатора влажности Excellence plus HX204 (Mettler Toledo).

Характеристики пористой структуры получаемых образцов сорбентов изучали с использованием анализатора сорбции газов Quantachrome Nova-1200e путем адсорбции азота при температуре его конденсации.

## Результаты и обсуждение

Технология получения дроблённых активированных углей (ДАУ) включает две стадии термического модифицирования исходного углеродного материала: термическая обработка сырья при температурах 400–700 °С инертной атмосфере (карбонизация) и вторая стадия активации карбонизованного полупродукта при температурах 800–900 °С в атмосфере перегретого водяного пара. Такая последовательность операций обеспечивает формирование развитой системы пор в получаемом сорбенте. Принимая во внимание, что нефтяные коксы проходят процесс термического крекинга при высоких температурах в инертной атмосфере, сделано

предположение о возможности проведения их активации без предварительной стадии карбонизации. В процессе активации образцов исходного кокса фиксировали степень обгара при термообработке и определяли величину удельной поверхности по методу БЭТ ( $S_{\text{BET}}$ ). Активацию в атмосфере перегретого водяного пара проводили для образцов исходных дроблёных коксов

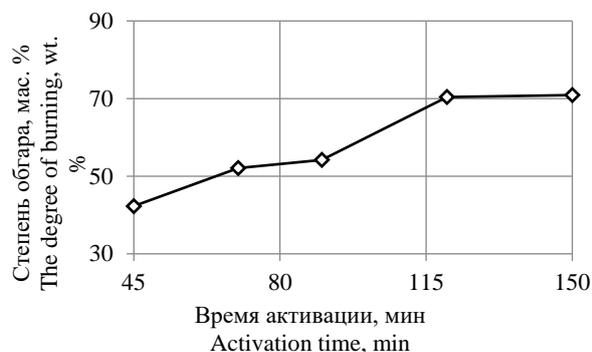


Рисунок 1. Зависимость степени обгара от времени активации исходного нефтяного кокса

Figure 1. Dependence of the degree of burning on the activation time of the initial petroleum coke

Как следует из представленной на рисунок 2 зависимости, величина удельной площади поверхности получаемого сорбента достигает лишь  $250 \text{ м}^2/\text{г}$  при проведении процесса активации в течение 2 часов. Дальнейшее увеличение продолжительности процесса не приводит к значительному развитию пористости сорбента и существенно снижает выход готового продукта.

Недостаточное развитие удельной поверхности образцов нефтяных коксов, прошедших активацию без предварительной карбонизации, указывает на необходимость исследования возможности увеличения пористости углеродного сорбента за счёт введения предварительной стадии термического модифицирования.

Стадию карбонизации образцов нефтяных коксов проводили путем выдерживания образцов при температурах  $500\text{--}800 \text{ }^\circ\text{C}$  в муфельной печи в закрытой емкости без доступа воздуха в течение заданного времени (3 ч). Карбонизация обеспечивает удаление летучих веществ из образца кокса и образование первоначальной пористости, которая в дальнейшем развивается на основной стадии термического модифицирования – активации. На рисунке 3 представлена зависимость степени обгара образцов нефтяного кокса от температуры процесса карбонизации продолжительностью (3 час.)

(фракции с размером частиц  $1\text{--}2 \text{ мм}$  при температуре  $800\text{--}820 \text{ }^\circ\text{C}$ , продолжительность процесса составляла от 45 до 150 мин. (рисунок 1).

Из полученных данных видно, что для образца кокса при активации без предварительной термообработки оптимальная степень обгара ( $40\text{--}60\%$ ) достигается при продолжительности процесса активации  $45\text{--}100$  мин.

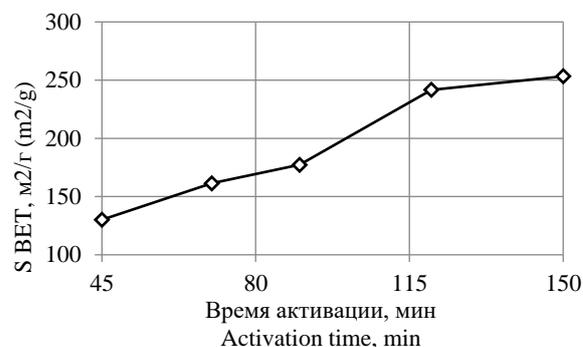


Рисунок 2. Зависимость удельной поверхности активированного нефтяного кокса (без предварительной карбонизации) от времени активации

Figure 2. Dependence of the specific surface area of activated petroleum coke (without pre-carbonization) on the activation time

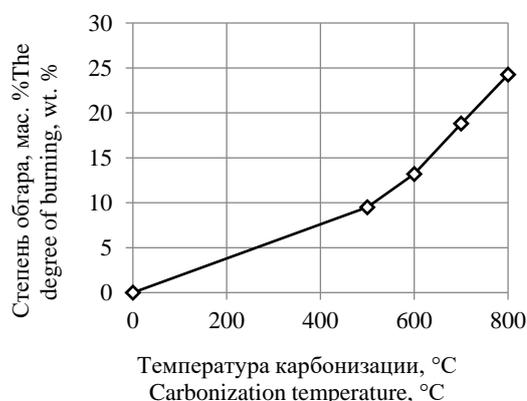


Рисунок 3. Зависимость степени обгара от температуры карбонизации нефтяного кокса

Figure 3. The dependence of the degree of burning on the carbonization temperature of petroleum coke

В интервале температур от  $100$  до  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ , потеря массы составляет  $10\text{--}12\%$ , повышение температуры до  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  приводит к росту скорости удаления летучих веществ и росту степени обгара образцов до  $20\%$ . Повышение температуры карбонизации до  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  приводит к постепенному замедлению процесса удаления летучих веществ.

Предварительно карбонизованные при температуре  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  образцы нефтяного кокса подвергали активации в среде перегретого водяного пара при температуре  $800\text{--}820 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Для полученных образцов ДАУ определили удельную площадь поверхности по БЭТ. На рисунок 4 явно наблюдается обратная зависимость выхода продукта и удельной поверхности от времени активации. Для получения образца дробленого АУ с развитой поверхностью требуется длительное время активации при этом выход продукта снижается. Установлено положительное влияние предварительной карбонизации на развитие пористой структуры готового ДАУ.

При длительной активации (90 мин.) образца нефтяного кокса после предварительной карбонизации при 700 °С свойства получаемого сорбента резко улучшаются. Предельный объем адсорбционного пространства достигает значения 0,264 см<sup>3</sup>/г, из которых 0,183 см<sup>3</sup>/г могут быть отнесены к микропорам. Площадь поверхности микропор возрастает до 446 м<sup>2</sup>/г. Однако выход такого сорбента в данном случае составил лишь 12,9 мас. %.

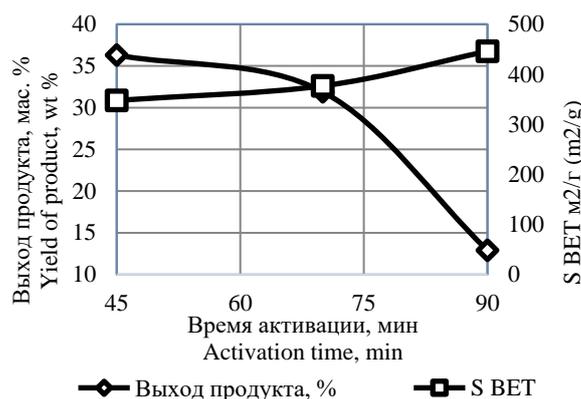


Рисунок 4. Влияние времени активации на свойства ДАУ на основе нефтяного кокса

Figure 4. Influence of activation time on the properties of CAC based on petroleum coke

Параметры пористой структуры образцов ДАУ на основе нефтяного кокса марки КЭС

Таблица 2

Parameters of the porous structure of CAC samples based on petroleum coke grade KES

Table 2

Режим карбонизации   Carbonization mode	-	700 °С, 3 ч
Режим активации   Activation mode	800 °С, 45 мин	800 °С, 90 мин
Удельная площадь поверхности по БЭТ, м <sup>2</sup> /г   BET specific surface area, m <sup>2</sup> /g	164,6	446,0
Площадь поверхности микропор по методу Дубинина-Радушкевича, м <sup>2</sup> /г   Micropore surface area according to the Dubinin-Radushkevich method, m <sup>2</sup> /g	188,8	516,0
Предельный объем адсорбционного пространства, см <sup>3</sup> /г   The limiting sorption pore volume, cm <sup>3</sup> /g	0,091	0,264
Объем микропор по методу Дубинина-Радушкевича, см <sup>3</sup> /г   Micropore volume according to the Dubinin-Radushkevich method, cm <sup>3</sup> /g	0,067	0,183
Объем мезопор, см <sup>3</sup> /г   Mesopore volume, cm <sup>3</sup> /g	0,024	0,081
Полуширина микропор по методу Дубинина-Радушкевича, нм   Micropore half-pore width according to the Dubinin-Radushkevich method, nm	0,69	0,74
Характеристическая энергия адсорбции по методу Дубинина-Радушкевича, кДж/моль   Characteristic adsorption energy according to the Dubinin-Radushkevich method, kJ/mol	18,76	17,50

Введение предварительной стадии карбонизации образцов нефтяного кокса перед их активацией позволило увеличить удельную площадь поверхности получаемых образцов ДАУ в 2–3 раза по сравнению с образцами ДАУ, полученными только одностадийным методом термической обработки (парогазовой активации).

### Заключение

В результате исследований нефтяного кокса как перспективного сырья для получения углеродных сорбентов, показана возможность развития пористой структуры материала путем применения двухступенчатой термической обработки с предварительным термическим модифицированием.

Исследовано влияние условий термического модифицирования нефтяного кокса на характер пористой структуры получаемого дробленного активированного угля. Показано, что двухстадийная термическая обработка нефтяного кокса КЭС при условиях: I стадия – карбонизация

в инертной атмосфере при T = 700 °С, в течении 180 минут; II стадия – активация в атмосфере перегретого водяного пара при T = 800 °С, в течении 90 минут, является оптимальной для получения ДАУ; приводит к получению ДАУ оптимальной пористой структуры – предельный объем адсорбционного пространства для образцов, активированных после предварительной карбонизации, достигает значения 0,264 см<sup>3</sup>/г, из которых 0,183 см<sup>3</sup>/г могут быть отнесены к микропорам; площадь поверхности микропор возрастает до 516 м<sup>2</sup>/г.

Таким образом, данный подход может служить одним из путей расширения квалифицированного использования нефтяного кокса.

### Благодарности

Работа выполнена с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования «Центр наукоемких химических технологий и физико-химических исследований» и научно-образовательного центра технологии сорбентов и катализаторов ПНИПУ.

## Литература

- 1 Чёботова В.И. Глубина переработки нефти в России, Европе и США // Устойчивое развитие науки и образования. 2020. № 3. С. 42–45.
- 2 Рудин М.Г. Переработки нефти в России. Состояние и перспективы // Нефтехимия. 2007. Т. 47. № 4. С. 269–275.
- 3 Теляшев Э.Г., Хайрудинов И.Р., Ахметов М.М. Нефтяной кокс в России – перспективные технологии // Нефтепереработка. 2006. № 4. С. 66–71.
- 4 Твердохлебов В.П., Храменко С.А., Бурюкин Ф.А., Павлов И.В. и др. Нефтяной кокс для алюминиевой промышленности. Технология и свойства // Журнал Сибирского Федерального университета. Серия: Химия. 2010. Т. 3. № 4. С. 369–386.
- 5 Шакиев Р.К., Касенов А.Ж. Применение нефтяного кокса в зависимости от его свойств // Путь науки. 2016. № 1. С. 11–13.
- 6 Красюков А.Ф. Нефтяной кокс. Москва: Химия, 1966. 264 с.
- 7 Сюняев З.И. Производство, облагораживание и применение нефтяного кокса. Москва: Химия, 1973. 296 с.
- 8 Глаголева О.Ф., Капустин В.М., Гюльмисарян Т.Г., Чернышева Е.А. и др. Технология переработки нефти. Часть первая. Первичная переработка нефти. Москва: Химия, 2006. 400 с.
- 9 Тагиров М.А., Жирнов Б.С., Гостьков Е.В., Фаткуллин М.Р. и др. Динамика активирования нефтяных коксов с целью получения носителей для катализаторов // Кокс и химия. 2011. № 10. С. 32–36.
- 10 Фарберова Е.А., Максимов А.С., Ширкунов А.С., Рябов В.Г. и др. Исследование возможности переработки нефтяного кокса с повышенным содержанием летучих веществ в углеродные сорбенты // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2021. Т. 64. № 4. С. 92–99.
- 11 Стрелков В.А., Ширкунов А.С., Рябов В.Г., Чучалина А.Д. и др. Влияние характеристик связующих на параметры пористой структуры гранулированных активных углей на базе нефтяных коксов // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. 2021. № 1. С. 66–81.
- 12 Bai R., Yang M., Hu G., Xu L. et al. A new nanoporous nitrogen-doped highly-efficient carbonaceous CO<sub>2</sub> sorbent synthesized with inexpensive urea and petroleum coke // Carbon. 2015. V. 81. P. 465-473. doi: 10.1016/j.carbon.2014.09.079
- 13 Huo Q., Wang Y., Chen H., Han L. et al. ZnS/AC sorbent derived from the high sulfur petroleum coke for mercury removal // Fuel Processing Technology. 2019. V. 191. P. 36-43. doi: 10.1016/j.fuproc.2019.03.025
- 14 Yang J., Yue L., Lin B., Wang L. et al. CO<sub>2</sub> Adsorption of nitrogen-doped carbons prepared from nitric acid preoxidized petroleum coke // Energy & Fuels. 2017. V. 31. № 10. P. 11060-11068. doi: 10.1021/acs.energyfuels.7b01795
- 15 Yang M., Guo L., Hu G., Hu X. et al. Adsorption of CO<sub>2</sub> by petroleum coke nitrogen-doped porous carbons synthesized by combining amoxidation with KOH activation // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2016. V. 55. № 3. P. 757-765. doi: 10.1021/acs.iecr.5b04038
- 16 Xiao Y., Pudasainee D., Gupta R., Xu Z. et al. Bromination of petroleum coke for elemental mercury capture // Journal of hazardous materials. 2017. V. 336. P. 232-239. doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.04.040
- 17 Rao L. et al. Single-step synthesis of nitrogen-doped porous carbons for CO<sub>2</sub> capture by low-temperature sodium amide activation of petroleum coke // Energy & Fuels. 2018. V. 32. № 12. P. 12787-12794. doi: 10.1021/acs.energyfuels.8b03473
- 18 Trujillo P., González T., Brito J.L., Briceño A. et al. Surface recognition directed selective removal of dyes from aqueous solution on hydrophilic functionalized petroleum coke sorbents. A supramolecular perspective // Industrial & Engineering Chemistry Research. 2019. V. 58. № 32. P. 14761-14774. doi: 10.1021/acs.iecr.9b02020
- 19 Sun Z., Ma A., Zhao S., Luo H. et al. Research progress on petroleum coke for mercury removal from coal-fired flue gas // Fuel. 2022. V. 309. P. 122084. doi: 10.1016/j.fuel.2021.122084
- 20 Liu D., Li C., Wu J., Liu Y. Novel carbon-based sorbents for elemental mercury removal from gas streams: A review // Chemical Engineering Journal. 2020. V. 391. P. 123514. doi: 10.1016/j.cej.2019.123514

## References

- 1 Chyobotova V.I. Oil refining depth in Russia, Europe and USA. Sustainable development of science and education. 2020. no. 3. pp. 42–45. (in Russian).
- 2 Rudin M.G. Oil refining in Russia. Status and prospects. Petrochemistry. 2007. vol. 47. no. 4. pp. 269–275. (in Russian).
- 3 Telyashev E.G., Hairudinov I.R., Ahmetov M.M. Petroleum coke in Russia – promising technologies. Oil Refining. 2006. no. 4. pp. 66–71. (in Russian).
- 4 Tverdohlebov V.P., Hramenko S.A., Buryukin F.A., Pavlov I.V. et al. Petroleum coke for the aluminum industry. Technology and properties. Journal of the Siberian Federal University. Series: Chemistry. 2010. vol. 3. no. 4. pp. 369–386. (in Russian).
- 5 Shakenev R.K., Kasenov A.G. The use of petroleum coke depending on its properties. The Path of Science. 2016. no. 1. pp. 11–13. (in Russian).
- 6 Krasnyukov A.F. Petroleum coke. Moscow, Khimiya, 1966. 264 p. (in Russian).
- 7 Syunyaev Z.I. Production, refining and application of petroleum coke. Moscow, Khimiya, 1973. 296 p. (in Russian).
- 8 Glagoleva O.F., Kapustin V.M., Gyl'misaryan T.G., Chernisheva E.A. et al. Oil refining technology. Part one. Primary oil refining. Moscow, Khimiya, 2006. 400 p. (in Russian).
- 9 Tagirov M.A., Zhirnov B.S., Gost'kov E.V., Fatkulmin M.R. et al. Dynamics of activation of petroleum cokes in order to obtain carriers for catalysts. Coke and Chemistry. 2011. no. 10. pp. 32–36 (in Russian).
- 10 Farberova E.A., Maksimov A.S., Shirkunov A.S., Ryabov V.G. et al. Investigation of the possibility of processing petroleum coke with a high content of volatile substances into carbon sorbents. Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. 2021. vol. 64. no. 4. pp. 92–99. (in Russian).
- 11 Strelkov V.A., Shirkunov S.A., Ryabov V.G., Chuchalina A.D. et al. Influence of binder characteristics on the parameters of the porous structure of granular activated carbons based on petroleum cokes. Bulletin of PNRPU. Chemical technology and biotechnology. 2021. no. 1. pp. 66–81. (in Russian).

12 Bai R., Yang M., Hu G., Xu L. et al. A new nanoporous nitrogen-doped highly-efficient carbonaceous CO<sub>2</sub> sorbent synthesized with inexpensive urea and petroleum coke. *Carbon*. 2015. vol. 81. pp. 465-473. doi: 10.1016/j.carbon.2014.09.079

13 Huo Q., Wang Y., Chen H., Han L. et al. ZnS/AC sorbent derived from the high sulfur petroleum coke for mercury removal. *Fuel Processing Technology*. 2019. vol. 191. pp. 36-43. doi: 10.1016/j.fuproc.2019.03.025

14 Yang J., Yue L., Lin B., Wang L. et al. CO<sub>2</sub> Adsorption of nitrogen-doped carbons prepared from nitric acid preoxidized petroleum coke. *Energy & Fuels*. 2017. vol. 31. no. 10. pp. 11060-11068. doi: 10.1021/acs.energyfuels.7b01795

15 Yang M., Guo L., Hu G., Hu X. et al. Adsorption of CO<sub>2</sub> by petroleum coke nitrogen-doped porous carbons synthesized by combining ammoxidation with KOH activation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2016. vol. 55. no. 3. pp. 757-765. doi: 10.1021/acs.iecr.5b04038

16 Xiao Y., Pudasainee D., Gupta R., Xu Z. et al. Bromination of petroleum coke for elemental mercury capture. *Journal of hazardous materials*. 2017. vol. 336. pp. 232-239. doi: 10.1016/j.jhazmat.2017.04.040

17 Rao L. et al. Single-step synthesis of nitrogen-doped porous carbons for CO<sub>2</sub> capture by low-temperature sodium amide activation of petroleum coke. *Energy & Fuels*. 2018. vol. 32. no. 12. pp. 12787-12794. doi: 10.1021/acs.energyfuels.8b03473

18 Trujillo P., González T., Brito J.L., Briceño A. et al. Surface recognition directed selective removal of dyes from aqueous solution on hydrophilic functionalized petroleum coke sorbents. A supramolecular perspective. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2019. vol. 58. no. 32. pp. 14761-14774. doi: 10.1021/acs.iecr.9b02020

19 Sun Z., Ma A., Zhao S., Luo H. et al. Research progress on petroleum coke for mercury removal from coal-fired flue gas. *Fuel*. 2022. vol. 309. pp. 122084. doi: 10.1016/j.fuel.2021.122084

20 Liu D., Li C., Wu J., Liu Y. Novel carbon-based sorbents for elemental mercury removal from gas streams: A review. *Chemical Engineering Journal*. 2020. vol. 391. pp. 123514. doi: 10.1016/j.cej.2019.123514

#### Сведения об авторах

**Василий А. Стрелков** аспирант, кафедра химических технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр-т, 29, г. Пермь, 614990, Россия, vasia.str@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0009-5165-8666>

**Егор А. Першин** аспирант, кафедра химии и биотехнологии, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр-т, 29, г. Пермь, 614990, Россия, egorpershin96@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0002-9989-6523>

**Елена А. Фарберова** к.х.н., доцент, кафедра химии и биотехнологии, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр-т, 29, г. Пермь, 614990, Россия, elenafarb@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-9166-7761>

**Антон С. Ширкунов** к.т.н., доцент, кафедра химических технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр-т, 29, г. Пермь, 614990, Россия, sas@pstu.ru

 <https://orcid.org/0009-0000-6620-6907>

**Валерий Г. Рябов** д.т.н., профессор, кафедра химических технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Комсомольский пр-т, 29, г. Пермь, 614990, Россия, rvg@pstu.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8897-7371>

#### Вклад авторов

Все авторы в равной степени принимали участие в написании рукописи и несут ответственность за плагиат

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Information about authors

**Vasily A. Strelkov** graduate student, chemical technologies department, Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky Av., 29 Perm, 614990, Russia, vasia.str@ya.ru

 <https://orcid.org/0009-0009-5165-8666>

**Egor A. Pershin** graduate student, chemistry and biotechnology department, Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky Av., 29 Perm, 614990, Russia, egorpershin96@gmail.com

 <https://orcid.org/0009-0002-9989-6523>

**Elena A. Farberova** Cand. Sci. (Chem.), associate professor, chemistry and biotechnology department, Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky Av., 29 Perm, 614990, Russia, elenafarb@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-9166-7761>

**Anton S. Shirkunov** Cand. Sci. (Engin.), associate professor, chemical technologies department, Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky Av., 29 Perm, 614990, Russia, sas@pstu.ru

 <https://orcid.org/0009-0000-6620-6907>

**Valeriy G. Ryabov** Dr. Sci. (Engin.), professor, chemical technologies department, Perm National Research Polytechnic University, Komsomolsky Av., 29 Perm, 614990, Russia, rvg@pstu.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8897-7371>

#### Contribution

All authors are equally involved in the writing of the manuscript and are responsible for plagiarism

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила 12/01/2023	После редакции 07/02/2023	Принята в печать 02/03/2023
Received 12/01/2023	Accepted in revised 07/02/2023	Accepted 02/03/2023