

**ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ И СТРУКТУРНЫХ
ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВИРОВАННОГО ВЫСОКОПОРИСТОГО
УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА НА ОСНОВЕ
ДЕКСТРИНА И ОКСИДА ГРАФЕНА**

И. Н. Шубин¹✉, А. А. Попова²

*Кафедра «Техника и технологии производства нанопродуктов»,
i.shubin77@yandex.ru, ФГБОУ ВО «ТГТУ» (1), Тамбов, Россия;
департамент по корпоративным коммуникациям,
АО «ПРОГРЕСС» (2), Липецк, Россия*

Ключевые слова: высокопористый углеродный материал; гранулометрический состав; диагностика; структура материала; химическая активация.

Аннотация: Химическая активация углеродного материала является широко используемым процессом повышения его физико-химических характеристик, прежде всего, оказывает влияние на увеличение удельной поверхности и объема пор, являющихся ключевыми параметрами для различных материалов, например, для сорбентов. Однако фактическое отсутствие информации по влиянию отдельных этапов технологического процесса на углеродный материал заставляет проводить большой объем экспериментальных исследований по определению оптимальных значений режимных параметров активации. В рамках работы представлены результаты экспериментальных исследований по определению ряда параметров активированного углеродного материала, таких как гранулометрический состав и структура, применительно к удельной поверхности и пористости, после различных вариантов активации.

Введение

В современной промышленности широко используются различные дисперсные материалы, в том числе нанодисперсные, имеющие самые разнообразные физико-механические и физико-химические характеристики, учет которых необходим при разработке и использовании как различного технологического оборудования, так и при проведении технологических процессов. Причем, чаще всего, проводятся работы по определению исходных или конечных характеристик дисперсных материалов и не рассматриваются характеристики, обусловленные отдельными этапами обработки – будь то физическое или химическое воздействия, физические или структурные параметры материалов (которым характерны радикальные изменения). На этом принципе, в частности, основаны такие широко применяемые в химии, энергетике и ряде других отраслей процессы, как функционализация и активация [1 – 3]. В реальном же производстве изменения параметров обрабатываемых материалов напрямую сказываются на производительности, продолжительности процесса, энергозатратах и ряде других показателей.

При этом непосредственно учету характеристик дисперсных материалов при обработке посвящено небольшое количество публикаций. Авторы работ [4 – 7], в которых исследуются физико-механические характеристики различных дисперсных материалов применительно к технологическому оборудованию, отмечают, что на данный момент исследования процесса взаимодействия между дисперсным материалом и применяемым оборудованием во многих случаях характеризуются накоплением знаний, необходимых для понимания основных закономерностей, отсутствием однозначности в понимании протекающих процессов, а также единой терминологии. Это приводит к тому, что результаты экспериментальных исследований различных авторов часто затруднительно сравнивать, а так как любой из исследуемых процессов еще имеет и свои особенности, то в итоге это затрудняет или делает невозможным практическое применение результатов исследований [5, 8].

Рассматривая процесс активации углеродного материала, можно выделить такие его этапы, как предварительную карбонизацию различного углеродного сырья и затем последующую химическую активацию [9 – 14]. При этом активированный карбонизат и активированные углеродные материалы представляют собой типовой тонко и нанодисперсный сыпучий материал, проявляющий соответствующие ему свойства [15, 16].

При этом для углеродного материала многими авторами рассматриваются лишь отдельные его характеристики, в основном применительно к лабораторным исследованиям, и не учитываются изменения параметров материалов, зависящих от особенностей прилагаемых воздействий, а также условий реального использования. Так, например, во многих работах рассматриваются влияние электростатических свойств на процесс переработки, общие физико-механические характеристики отдельных частиц, законы их движения, гигроскопичность и плотность, что говорит об отсутствии попытки комплексного анализа свойств или хотя бы групп отдельных параметров углеродных материалов, способных оказывать влияние на конечные характеристики [7 – 11, 15, 16].

Важность информации о свойствах и структуре позволяет решить большой объем задач, которые появляются при проектировании аппаратно-технологического оформления любого технологического процесса и тем более настолько сложного, как высокотемпературная химическая активация. Так, например, информация о структуре активированного углеродного материала может позволить оптимизировать режимные параметры процесса, такие как температура, продолжительность, применение различных активаторов, вид и объем рабочих сред и т.д. А знание базовых свойств материалов (физико-механических характеристик) позволит рационально спроектировать технологическое оборудование, учитывающее особенности именно конкретного материала или дисперсной смеси (насыпную плотность, углы откоса и обрушения, текучесть, адгезию, гигроскопичность, сводообразование и др.)

Цель работы – комплексное определение физико-химических и структурных характеристик активированного углеродного материала при различных режимах активации.

Объекты и методы исследования

Литературные источники и экспериментальные исследования, проведенные авторами ранее, позволили установить, что высокотемпературная химическая активация может быть проведена на основе нескольких вариантов, причем в ходе проведения лабораторных исследований установлены наиболее рациональные технологические режимы, обеспечивающие получение активированного углерод-

ного материала с необходимыми свойствами [18, 19]. Согласно *первому* варианту активации, процесс протекал в два этапа, при ступенчатом нагреве смеси из карбонизированного углеродного сырья и щелочи в инертной среде (исходный карбонизат – композиция декстрина и оксид графена + гидроксид калия) до 400 и 750 °С и выдержке в один час и два или три соответственно. *Второй* вариант реализации данного процесса отличался температурой на втором этапе – 600 °С и подачей водяного пара (второго активатора) в объем реактора. Причем было установлено, что продолжительность процесса может быть уменьшена на более чем 30 % – до двух часов – для варианта активации с одним активатором, а температура протекания процесса активации с 750 до 600 °С – для варианта активации с двумя активаторами.

Эффективность проведения процесса активации оценивалась по характеристикам полученного углеродного материала (удельной поверхности и пористости), определяемым на аналитическом комплексе Nova Quantachrome E 1200. Для определения удельной поверхности использовался многоточечный метод BET, а для пористости – метод DFT, так как данные модели анализа наилучшим образом отвечают параметрам исследуемых материалов. Результаты диагностики полученного материала представлены в табл. 1.

В рамках проведения дополнительных исследований структурных характеристик активированного углеродного материала проведен анализ его структуры с помощью рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ARL Equinox 1000 – на первом этапе, а также анализ гранулометрического состава (размер частиц и их объем) методом динамического рассеяния света с помощью анализатора частиц Nicomp 380 ZLS – на втором, причем на обоих этапах исследования проводились в сравнении с параметрами исходного карбонизата.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ полученных результатов по вариантам реализации процесса активации позволил уточнить оптимальные технологические режимы процесса (температуру, продолжительность процесса и др.) для получения высокопористого углеродного материала [18, 19]. Однако наибольший практический интерес, в рамках данной работы, представляют результаты серии дополнительных исследований материалов активированных по различным вариантам активации применительно к уже полученным результатам. Так, на первом этапе дополнительных исследований (исследование структуры углеродного материала) получены рентгенограммы, представленные на рис. 1.

Таблица 1

Характеристики углеродного материала при различных вариантах активации

Режим активации	$S_{\text{BET}}, \text{ м}^2/\text{г}$	$V_{\Sigma\text{DFT}}, \text{ см}^3/\text{г}$	$V_{\text{микропор}}, \text{ см}^3/\text{г}$
В течение 3 ч	2500...2600	1,2...1,3	0,9...1,0
В течение 2 ч	2700...2800	1,2...1,3	1,1...1,2
С дополнительной обработкой паром	2600...2700	1,3...1,4	0,8...0,9

Примечание: приведены усредненные диапазоны значений серий экспериментов.

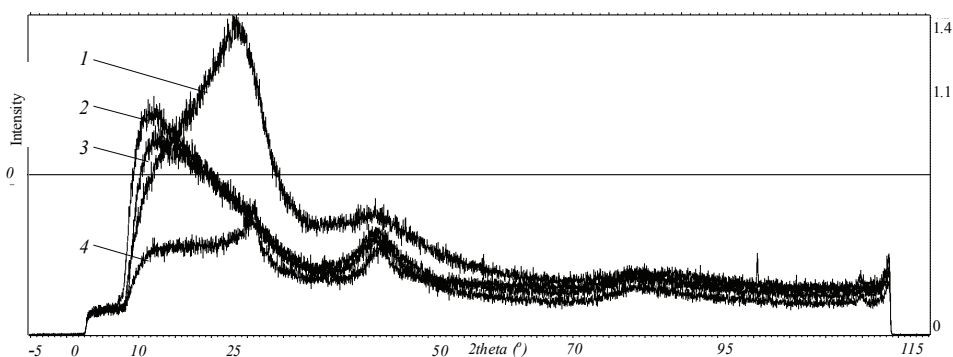


Рис. 1. Результаты рентгеноструктурного анализа образцов:

1 – исходный карбонизат; 2, 3 и 4 – активация соответственно в течение 3 ч, 2 ч и с дополнительным воздействием паром

Полученные рентгенограммы отражают асимметричность рефлексов в дифракционной картине анализируемых образцов, они могут быть разделены на составляющие, которые позволят охарактеризовать структуру углерода с различной степенью упорядоченности. На рентгенограмме (см. рис. 1, а), которая соответствует исходному карбонизату, отмечены два пика, расположенные под углами $20 \dots 25^\circ$ и $40 \dots 45^\circ$. Это характерные (при данных углах) пики, соответствующие типовой картине углерода, находящегося в аморфном состоянии, что полностью соответствует неупорядоченной аморфной структуре исходного карбонизата.

Асимметричный пик (см. рис. 1, б, в) показывает наличие дефектов, то есть неупорядоченной структуры углерода, и указывает на графитовую природу исследуемых материалов, что коррелируется с проведенной активацией образцов, после которой аморфный углерод превращается в графит в процессе активации.

Изменение вида рентгенограммы (см. рис. 1, г, по сравнению с рис. 1, а – в) связано со значительной интенсификацией протекания процесса активации под действием синергетического эффекта от применения двух активаторов. Это приводит к повышению асимметрии пиков, ширина которых указывает на нанокристаллическую или неоднородную аморфную структуру, что подтверждается более развитой пористостью образцов.

Анализируя результаты второго дополнительного этапа исследований, на котором определен фракционный состав, как активированного по двум вариантам углеродного материала, так и исходного карбонизата, можно также сделать ряд выводов по изменению его параметров (табл. 2).

Исходный размер карбонизата получается принудительно за счет размола, и, таким образом, его параметры – размер частиц и, соответственно, их объем можно принять за точку отчета, относительно которой фиксируются изменения характеристик гранулометрического состава углеродного материала в процессе проведения активации различной продолжительности и с использованием разных активаторов.

Из полученных результатов видно, что увеличение неоднородности материала связано с увеличением воздействующих факторов и в процессе активации углеродный материал демонстрирует склонность к образованию агломератов при наличии ярко выраженной нанодисперсной фракции. Это может указывать на прогрессирующую неоднородность материала под действием режимных параметров активации, вследствие разрушения его структуры, и потенциальное снижение его эксплуатационных характеристик.

Таблица 2

Результаты гранулометрического анализа образцов

Фракция	Количество частиц			Объем частиц		
	Средний размер, нм	Отклонение, нм (%)	Содержание, %	Средний размер, нм	Отклонение, нм (%)	Содержание, %
<i>Исходный карбонизат</i>						
Фракция 1	155,7	26,5 (17,0)	84,9	170,4	32,1 (18,8)	18,4
Фракция 2	430,7	81,0 (18,8)	15,1	483,8	92,3 (19,1)	81,6
<i>Активированный углеродный материал (2 ч)</i>						
Фракция 1	191,2	30,4 (15,9)	90,4	210,2	32,6 (15,5)	30,9
Фракция 2	541,8	92,5 (17,1)	9,6	617,7	99,8 (16,2)	69,1
<i>Активированный углеродный материал (3 ч)</i>						
Фракция 1	50,3	6,6 (13,2)	99,3	54,3	9,2 (16,9)	5,7
Фракция 2	277,7	48,2 (17,4)	0,7	322,9	93,6 (16,6)	94,3
<i>Активированный углеродный материал (с дополнительной обработкой паром)</i>						
Фракция 1	229,2	55,7 (24,3)	83,2	266,7	52,2 (19,6)	4,0
Фракция 2	1112,9	174,2 (15,7)	17,7	1214,7	212,7 (17,5)	96,0

Пр и м е ч а н и е : приведены усредненные значения серий экспериментов.

Заключение

Несмотря на то что результаты проведенных исследований в целом неоднозначны и отчасти противоречивы, сопоставляя их с результатами ранее проведенных авторами исследований по определению удельной поверхности и пористости, представляется возможным интерпретировать полученные результаты в ходе дополнительно проведенных исследований:

а) по результатам структурного анализа установлено:

– структура активированного углеродного материала при продолжительности процесса активации 2 и 3 часа в целом аналогична, что подтверждает возможность сокращения продолжительности процесса химической активации;

– форма рефлексов может говорить о наличии изменений в материале при активации с образованием развитой наноразмерной структуры (в микро- и мезодиапазонах);

– интенсификация протекания процесса активации за счет дополнительного воздействия пара приводит к изменению структуры углеродного материала с увеличением удельной поверхности и пористости в микро- и мезодиапазонах, причем при более низких температурах;

б) в качестве вывода по гранулометрическому анализу можно заключить, что увеличение факторов воздействия приводит к усилению неоднородности, а также образованию агломератов вследствие разрушения структуры активируемого углеродного материала.

Результаты проведенных исследований позволят снизить неопределенность и неоднозначность при определении факторов, влияющих на определение наиболее рациональных режимных параметров реализации высокотемпературной активации по получению высокопористого углеродного материала (на основе декстрина и оксида графена) с большой удельной поверхностью и значительным объемом пор, приходящихся на нанометровый диапазон.

Список литературы

1. Дьячкова, Т. П. Методы функционализации и модифицирования углеродных нанотрубок / Т. П. Дьячкова, А. Г. Ткачев – М. : ИД Спектр, 2013. – 152 с.
2. Popova, A. A. Apparatus and Technological Design of the Production Process of Activated Highly Porous Carbon Material / A. A. Popova, I. N. Shubin // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2021. – Vol. 1942. – P. 012025. doi: 10.1088/1742-6596/1942/1/012025
3. Оптимизация пористой структуры активированных углей в процессе технологического производства / В. Ф. Олонцев, Е. А. Фарберова, А. А. Минькова [и др.] // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Химическая технология и биотехнология*. – 2015. – № 4. – С. 9 – 23.
4. Основы технологии подготовки дисперсных материалов при переработке энергетических конденсированных систем: в 2 ч. Ч. 1. Изучение свойств и подготовка дисперсных материалов / Н. А. Симбирцев [и др.]. – М. : Архитектура-С, 2006. – 191 с.
5. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. – М. : Машиностроение, 1973. – 216 с.
6. Попова, А. А. Анализ влияния свойств нанодисперсных систем на конструкции технологического оборудования / А. А. Попова, И. Н. Шубин // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*. – 2020. – № 7(724). – С. 3 – 12. doi: 10.18698/0536-1044-2020-7-3-12
7. Попова, А. А. Особенности поведения движущегося слоя нанодисперсного материала и их учет при проектировании технологического оборудования / А. А. Попова, И. Н. Шубин // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2020. – Т. 26, № 2. – С. 323 – 335. doi: 10.17277/vestnik.2020.02.pp.323-335
8. Андрианов, Е. И. Методы определения структурно-механических характеристик порошкообразных материалов / А. И. Андрианов. – М. : Химия, 1982. – 256 с.
9. Popova, A. A. Features of Nanoporous Carbon Material Synthesis / A. A. Popova, R. E. Aliev, I. N. Shubin // *Advanced Materials & Technologies*. – 2020. – No. 3(19). – P. 28 – 32. doi: 10.17277/amt.2020.03.pp.028-032
10. Zgrzebnicki, M. Sorption and Textural Properties of Activated Carbon Derived from Charred Beech Wood / M. Zgrzebnicki, A. Kałamaga, R. Wrobel // *Molecules*. – 2021. – Vol. 26, No. 24. – P. 7604. doi: 10.3390/molecules26247604
11. Prauchner, M. J. Chemical versus physical activation of coconut shell: A comparative study / M. J. Prauchner, F. Rodriguez-Reinoso // *Microporous and Mesoporous Materials*. – 2012. – No. 152. – P. 163 – 171. doi: 10.1016/j.micromeso.2011.11.040
12. Preparation of activated carbon from cherry stones by physical activation in air. Influence of the chemical carbonisation with H₂SO₄ / M. Olivares-Marín, C. Fernández-González, A. Macías-García, V. Gómez-Serrano // *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. – 2012. – No. 94. – P. 131 – 137. doi: 10.1016/j.jaap.2011.11.019
13. Activated Carbon from Rubber Wood Sawdust by Carbon Dioxide Activation / M. A. F. Mazlan, Y. Uemura, S. Yusup, F. Elhassan, A. Uddin, A. Hiwada, M. Demiya // *Procedia Engineering*. – 2016. – No.148. – P. 530 – 537. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.549
14. Effect of pyrolysis conditions on the improvement of the physicochemical structure of activated carbon obtained from Jixi bituminous coal / D. D. Liu, B. Y. Jia, S. Li, L. J. Dong, J. H. Gao, Y. K. Qin // *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*. – 2019. – Vol. 14, No. 15. doi: 10.1002/apj.2289
15. Определение углов и коэффициентов трения углеродных наноматериалов / В. Ф. Першин, Т. Х. К. Алсайяд, Т. В. Пасько, А. А. Пасько // *Ползуновский вестник*. – 2018. – № 4. – С. 184 – 188.

16. Мищенко, С. В. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение / С. В. Мищенко, А. Г. Ткачев. – М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.

17. К вопросу промышленного использования углеродных наноматериалов / С. В. Першина, В. Ф. Першин, А. Г. Ткачев, А. И. Шершукова // Приборы. – 2007. – № 10(88). – С. 57 – 60.

18. Попова, А. А. Исследование технологических параметров активации, влияющих на характеристики нанопористого углеродного материала / А. А. Попова, И. Н. Шубин // Материаловедение. – 2022. – № 11. – С. 3 – 8. doi: 10.31044/1684-579X-2022-0-11-3-8

19. Попова, А. А. Исследование процесса высокотемпературной щелочной активации углеродного материала с дополнительным воздействием водяным паром / А. А. Попова, И. Н. Шубин // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2022. – Т. 28, № 3. – С. 476 – 486. doi: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.476-486

A Study of Physical and Structural Characteristics of Activate High-Porous Carbon Material Based on Dextrin and Graphene Oxide

I. N. Shubin¹✉, A. A. Popova²

Department of Equipment and Technology of Manufacturing Nanoproducts, TSTU, i.shubin77@yandex.ru (1); Tambov, Russia;

Department of Corporate Communications, JSC PROGRESS (2), Lipetsk, Russia

Keywords: chemical activation; highly porous carbon material; diagnostics; granulometric composition; material structure.

Abstract: Chemical activation of a carbon material is a widely used process for improving its physicochemical characteristics, primarily an increase in the specific surface area and pore volume, which are key parameters for various materials, such as sorbents. However, the actual lack of information on the effect of individual stages of the technological process on the carbon material makes it necessary to carry out a large amount of experimental research to determine the optimal values of the operating parameters of activation. The study presents the results of experimental studies to determine a number of parameters of the activated carbon material, such as particle size distribution and structure in relation to the specific surface area and porosity after various activation options. The authors made an attempt, after analyzing the obtained values, to find patterns and dependencies that will reduce the uncertainty and increase the efficiency of the implementation of the process of high-temperature chemical activation as a whole.

References

1. Dyachkova, T.P., Tkachev A.G. *Metody funktsionalizatsii i modifitsirovaniya uglerod-nykh nanotrubok* [Methods of functionalization and modification of carbon nanotubes], Moscow: Spektr, 2013, 152 p. (In Russ.)

2. Popova A.A., Shubin I.N. Apparatus and Technological Design of the Production Process of Activated Highly Porous Carbon Material, *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1942, pp. 012025. doi: 10.1088/1742-6596/1942/1/012025

3. Olontsev V.F. [Optimization of the porous structure of activated carbons in the process of technological production], *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Khimicheskaya tekhnologiya i*

biotekhnologiya [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Chemical technology and biotechnology], 2015, no. 4, pp. 9-23. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Simbirtsev N.A. [et al.] *Osnovy tekhnologii podgotovki dispersnykh materialov pri pererabotke energeticheskikh kondensirovannykh sistem: v 2 ch. part 1. Izucheniye svoystv i podgotovka dispersnykh materialov* [Fundamentals of technology for the preparation of dispersed materials in the processing of energy condensed systems: in 2 hours, part 1. Study of the properties and preparation of dispersed materials], Moscow: Arkhitektura-S, 2006, 191 p. (In Russ.)

5. Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Apparatus for mixing bulk materials], Moscow: Mashinostroenie, 1973, 216 p. (In Russ.)

6. Popova A.A., Shubin I. N. [Analysis of the influence of the properties of nanodispersed systems on the design of technological equipment], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye* [News of higher educational institutions. Engineering], 2020, no. 7(724), pp. 3-12. doi: 10.18698/0536-1044-2020-7-3-12 (In Russ., abstract in Eng.)

7. Popova A.A., Shubin I. N. [Features of the behavior of a moving layer of nanodispersed material and their consideration in the design of technological equipment], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 2, pp. 323-335. doi: 10.17277/vestnik.2020.02.pp.323-335 (In Russ., abstract in Eng.)

8. Andrianov E.I. *Metody opredeleniya strukturno-mekhanicheskikh kharakteristik poroshkoobraznykh materialov* [Methods for determining the structural and mechanical characteristics of powdered materials], Moscow: Himiya, 1982, 256 p. (In Russ.)

9. Popova A.A., Aliev R.E., Shubin I.N. Features of Nanoporous Carbon Material Synthesis, *Advanced Materials & Technologies*, 2020, no. 3(19), pp. 28-32. doi: 10.17277/amt.2020.03.pp.028-032

10. Zgrzebnicki M., Kalamaga A., Wrobel R. Sorption and Textural Properties of Activated Carbon Derived from Charred Beech Wood, *Molecules*, 2021, vol. 26, no. 24, pp. 7604. doi: 10.3390/molecules26247604

11. Prauchner M.J., Rodriguez-Reinoso F. Chemical versus physical activation of coconut shell: A comparative study, *Microporous and Mesoporous Materials*, 2012, no. 152, pp. 163-171. doi: 10.1016/j.micromeso.2011.11.040

12. Olivares-Marin M., Fernández-González C., Macías-García A., Gómez-Serrano V. Preparation of activated carbon from cherry stones by physical activation in air. Influence of the chemical carbonisation with H₂SO₄, *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2012, no. 94, pp. 131-137. doi: 10.1016/j.jaap.2011.11.019

13. Mazlan M.A.F., Uemura Y., Yusup S., Elhassan F., Uddin A., Hiwada A., Demiya M. Activated Carbon from Rubber Wood Sawdust by Carbon Dioxide Activation, *Procedia Engineering*, 2016, no. 148, pp. 530-537. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.549

14. Liu D.D., Jia B.Y., Li S., Dong L.J., Gao J.H., Qin Y.K. Effect of pyrolysis conditions on the improvement of the physicochemical structure of activated carbon obtained from Jixi bituminous coal, *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 2019, vol. 14, no. 15. doi: 10.1002/apj.2289

15. Pershin V.F., Alsayyad T.Kh.K., Pas'ko T.V., Pas'ko A.A. [Determination of angles and coefficients of friction of carbon nanomaterials], *Polzunovskiy vestnik* [Polzunovsky Vestnik], 2018, no. 4, pp. 184-188. (In Russ., abstract in Eng.)

16. Mishchenko S.V., Tkachev A.G. *Uglerodnyye nanomaterialy. Proizvodstvo, svoystvo, primeneniye* [Carbon nanomaterials. Production, property, application], Moscow: Mashinostroyeniye, 2008, 320 p. (In Russ.)

17. Pershina S.V., Pershin V.F., Tkachev A.G., Shershukova A.I. [On the issue of industrial use of carbon nanomaterials], *Pribory* [Appliances], 2007, no. 10(88), pp. 57-60. (In Russ., abstract in Eng.)

18. Popova A.A., Shubin I.N. [Investigation of technological activation parameters affecting the characteristics of nanoporous carbon material], *Materialovedenie* [Materials Science], 2022, no. 11, pp. 3-8. doi: 10.31044/1684-579X-2022-0-11-3-8 (In Russ., abstract in Eng.)

19. Popova A.A., Shubin I.N. [Study of the process of high-temperature alkaline activation of carbon material with additional exposure to water vapor], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2022, vol. 28, no. 3, pp. 476-486 doi: 10.17277/vestnik.2022.03.pp.476-486. (In Russ., abstract in Eng.)

Untersuchung der physikochemischen und strukturellen Eigenschaften von aktiviertem hochporösem Kohlenstoffmaterial auf Basis von Dextrin und Graphenoxid

Zusammenfassung: Die chemische Aktivierung des Kohlenstoffmaterials ist ein weit verbreiteter Prozess zur Verbesserung seiner physikalisch-chemischen Eigenschaften, der vor allem die Erhöhung der spezifischen Oberfläche und des Porenvolumens beeinflusst, die Schlüsselparameter für verschiedene Materialien sind, z. B. für Sorptionsmittel. Der tatsächliche Mangel an Informationen über die Auswirkungen einzelner Prozessschritte auf das Kohlenstoffmaterial führt jedoch zu einer großen Anzahl von experimentellen Studien zur Bestimmung der optimalen Aktivierungsparameter. Im Rahmen der Arbeit sind die Ergebnisse experimenteller Studien zur Bestimmung einer Reihe von Parametern des aktivierten Kohlenstoffmaterials, wie der granulometrischen Zusammensetzung und der Struktur, in Bezug auf spezifische Oberfläche und Porosität, nach verschiedenen Aktivierungsoptionen vorgestellt.

Études des caractéristiques physico-chimiques et structurales du matériau haut poreux activé à base de carbone dextrine et oxyde de graphène

Résumé: L'activation chimique d'un matériau carboné est un procédé couramment utilisé pour augmenter ses caractéristiques physico-chimiques, principalement en influençant l'augmentation de la surface spécifique et du volume des pores, qui sont des paramètres clés pour différents matériaux, par exemple pour les sorbants. Cependant, l'absence réelle d'informations sur l'influence de certaines étapes du processus sur le matériau carboné conduit à de nombreuses études expérimentales visant à déterminer les valeurs optimales des paramètres d'activation du régime. Sont présentés les résultats des études expérimentales sur la détermination d'un certain nombre de paramètres du matériau carboné activé, tels que la composition granulométrique et la structure, en ce qui concerne la densité et la porosité, après différentes options d'activation.

Авторы: *Шубин Игорь Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопроductов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; *Попова Алёна Алексеевна* – кандидат технических наук, специалист по корпоративной социальной ответственности департамента по корпоративным коммуникациям, АО «ПРОГРЕСС», Липецк, Россия.