

АППАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА АКТИВИРОВАННОГО УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА

А. А. Попова

*Кафедра «Техника и технологии производства нанопродуктов»,
alyona.popova.93@list.ru; ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия*

Ключевые слова: активированный углеродный наноматериал; диагностика характеристик; технологическое оборудование; этапы проектирования.

Аннотация: Показана возможность разработки активированных углеродных материалов с высокой удельной поверхностью. Рассмотрены их классификация, основные этапы исследований и полученные результаты. Представлена принципиальная схема производства материала с удельной поверхностью по БЭТ в диапазоне 2 400...2 700 м²/г. Определены основные стадии производства активированного углеродного материала, включающие предварительную карбонизацию углеродного сырья, его щелочную активацию и постобработку полученного материала (от подготовки компонентов и получения реакционной смеси до последующего выделения и сушки готового продукта). Определен состав оборудования и возможность масштабного перехода от лабораторного к опытно-промышленному производству.

Углеродные материалы с развитой поверхностью и пористостью нашли массовое применение в разных областях современной промышленности: химической, фармацевтической, радиоэлектронике и т.д. Они используются в качестве сорбентов для очистки жидких и газообразных сред от вредных органических и неорганических веществ, поглощения радионуклидов, очистки жидких сред от вредоносных бактерий, вирусов, биологически активных веществ и обезвреживания этих агентов, в целях устранения последствий разлива нефтепродуктов, в качестве гемосорбентов и энтеросорбентов в медицине, катализаторов и их носителей различных химических процессов, электродных материалов химических источников тока, в частности топливных элементов, суперконденсаторов и т.д. Углеродные материалы с развитой поверхностью могут быть охарактеризованы и классифицированы по целому ряду параметров: характеристикам поверхности и пористости; полуэмпирическим характеристикам адсорбционных свойств по способности адсорбировать различные вещества; молекулярной структуре; изотропии или анизотропии структуры и свойств материала; характерному размеру структурных элементов или частиц материала; наличию на поверхности частиц или пор углеродного материала гетероатомов, химически привитых функциональных групп, не углеродных слоев, кластеров, наночастиц; электрофизическим, термическим, механическим, трибологическим свойствам и многим др. [1 – 3].

Для большинства областей, в качестве наиболее эффективных выступают материалы, которые содержат мезо- и микропоры с высокими удельным объемом и удельной поверхностью. Большую популярность в настоящее время имеет

термин «нанопористый материал», имеющий не стандартизированный диапазон размеров пор, но принято считать, что он составляет от одного до нескольких нанометров, то есть, пересекается с диапазоном мезопористости. Нанопористый углеродный материал – это материал, одной из ключевых характеристик которого, определяющих эффективность его применения, является пористая структура, а именно, средний размер пор, их форма, распределение пор по размерам, удельный объем пор, удельная поверхность стенок пор, доступных для сорбируемого вещества.

Наиболее перспективными в данном направлении можно считать активированные углеродные материалы, обладающие развитой системой микро- и мезопор и нашедшие свое применение в технологических процессах, связанных с разделением, выделением и концентрированием различных газовых сред. Для указанного применения необходимо, чтобы материал обладал следующими характеристиками: большим удельным объемом пор, размер которых необходим для проникновения молекул адсорбируемых веществ и достаточно большой удельной поверхностью, соответствующей доступным порам; материал должен также иметь крупные (транспортные) поры, обеспечивающие быструю диффузию молекул адсорбируемых веществ в объеме материала; должен быть химически инертным в условиях применения, в материале должны отсутствовать примеси или химические группы нестабильные в условиях адсорбции или иных воздействий [4 – 9].

Для получения активированных углеродных материалов различное углеродное сырье карбонизируют, а далее проводят активацию с использованием жидкофазных или газофазных реагентов (водяным паром, азотной кислотой, диоксидом углерода, гидроксидом калия и др.) [10 – 13].

Отметим, что авторы многочисленных работ, представляя свои результаты по синтезу активированных углеродных материалов, опираются на лабораторные исследования, плохо поддающиеся масштабному переходу к промышленным условиям производства – технологиям и оборудованию, или уделяя внимание лишь отдельным свойствам углеродных материалов и отдельным параметрам технологических процессов производства, получают материалы с заведомо худшими ключевыми показателями. В ряде работ представлены результаты математического моделирования, которые носят частный характер и, по большому счету, слабо подкреплены экспериментальными исследованиями [14 – 17]. Однако, без комплексного подхода, знания связи исходных характеристик сырья и получаемых высокопористых углеродных материалов, а также аппаратно-технологического обеспечения процесса производства невозможно осуществить качественный полноценный переход от лабораторных исследований к промышленному производству [18 – 21].

Исследование взаимосвязи характеристик активированного высокопористого углеродного материала и аппаратно-технологических параметров процесса синтеза представляется достаточно сложной комплексной задачей, которая была разбита на несколько промежуточных этапов.

Первый этап включал в себя проведение экспериментальных исследований, направленных на определение основных параметров синтезируемого активированного углеродного материала – параметров поверхности и пористости, которые вычисляются из изотерм адсорбции/десорбции с использованием определенной теоретической модели. Как правило, поверхность и пористость различных материалов определяются по методам ВЛН, БЭТ (Брунауэра–Эммета–Теллера) и DFT. В современных приборах для адсорбционных измерений эти модели заложены в программы. Ту или иную модель выбирают в зависимости от типа материала и диапазона размеров. В нашем случае, параметры определялись по адсорбции азота; удельная поверхность – по многоточечному методу БЭТ; распределение пор – по размерам и удельный объем пор – по методу DFT. Для исследуемых ма-

териалов данные модели являются наиболее адекватными. Проведенные предварительные исследования показали, что данные физико-химические характеристики зависят в первую очередь от исходных компонентов, применяемых для получения углеродсодержащих веществ (карбонизатов), а также от режимов активации (массового соотношения, например, гидроксида калия к активируемому материалу, температуры и времени активации, режима газообмена в реакционной зоне). В частности, установлено, что добавление графена в исходный карбонизируемый углеродный материал, существенно меняет макротекстуру. Так, материал без графена состоит из ячеек, стенки которых, по размеру и толщине, достигают нескольких микрометров и имеют вторичную пористость (мезопоры). В ячейках, характеризующихся большой толщиной стенок, диффузия ионов и молекул в рабочие поры (мезопоры), протекает более медленно, что приводит к снижению эффективности при применении данного материала в адсорбционных и электрохимических процессах.

Добавление графена приводит к существенному изменению текстуры материала. На поверхности графеновых слоев мезопористый углерод распределен тонким слоем, что позволяет сделать мезопоры легкодоступными. Увеличение его содержания до определенного уровня приводит к усилению эффекта улучшения макротекстуры, но если его содержание продолжить увеличивать, то это приведет к уменьшению удельной поверхности. Это связано с тем, что графен является структурообразующим компонентом и не оказывает существенного влияния на развитие поверхности и пористости. А некоторые параметры синтеза и исходный состав могут привести к получению активированного углерода, удельная поверхность которого недоступна для больших ионов и молекул и ее большая часть приходится на микропоры [12, 16, 22].

Второй этап направлен на характеризацию физико-механических свойств, полученных углеродных материалов. В лабораторных исследованиях данным параметрам, как правило, не уделяется должного внимания, однако, они являются важными в условиях промышленного производства. Определение исходных характеристик (размера частиц и агломератов, коэффициентов внутреннего и внешнего трения, углов откоса и т.д.) осуществлялись в соответствии с ГОСТ. Данные результаты будут также востребованы на других этапах работы, поскольку они помогут установить взаимосвязи между характеристиками полученного материала и аппаратно-технологическим оформлением опытно-промышленного процесса производства.

Исследования взаимного влияния свойств сырья, режимных параметров обоработки на процесс синтеза (третий этап) проводились на имеющейся лабораторной установке. Конструкция позволяет изменять все основные параметры процесса, как карбонизации, так и последующей активации. В основу исследований положена гипотеза о том, что в результате карбонизации углеродного сырья, содержащего в том числе углеродные наноматериалы (углеродные нанотрубки (УНТ) или графен), и последующей щелочной активации будет получен активированный высокопористый углеродный материал, сочетающий эффективную упорядоченную макроскопическую структуру, высокие удельную поверхность и удельный объем мезопор.

Окончательная оценка эффективности полученного активированного высокопористого углеродного материала (четвертый этап) оценивается по результатам экспериментальных исследований фактической сорбционной емкости (сорбции/десорбции) реальных газов, например водорода, метана и других, на действующих прототипах. Также на данном этапе планируется проведение исследований по оптимизации торговых промышленных форм полученного углеродного материала.

На текущем этапе исследования проведены отработка принципиальной технологической схемы производства, имеющей возможность дальнейшего масштабирования, подбор и отработка общей компоновки оборудования. Для простоты протекания технологического процесса и решения задачи компоновки линию производства активированного высокопористого углеродного материала необходимо разделить на несколько стадий (согласно проводимым технологическим операциям):

- предподготовка (термообработка) исходного углеродного вещества, содержащего фенолформальдегидную смолу (ФФС), графен (ГНП) или УНТ, декстрин или карбоксиметилцеллюлозу (КМЦ) – в результате получается карбонизированное углеродное вещество;

- смешивание карбонизированного углеродного материала с гидроксидом калия для получения равномерной реакционной смеси;

- высокотемпературная щелочная активация, которая проводится путем нагревания реакционной смеси до 750 °С и выдержки в течение заданного времени;

- первая стадия постобработки активированной смеси, заключающаяся в замачивании и выдержке полученного материала с образованием при этом гидроксида калия, с последующим растворением в воде содержащегося в активированном веществе карбоната калия;

- вторая стадия постобработки активированной смеси – замачивание и выдержка активированного материала в кислоте – проводится для очистки углеродного материала от остатков щелочи и карбоната калия, а также для растворения примесей соединений железа, которые могли попасть в продукт на стадии активации;

- сушка активированного углеродного материала в сушильном шкафу при температуре 110 °С;

- упаковка полученного активированного углеродного материала в герметичную тару.

В принципиальной технологической схеме оборудование должно располагаться последовательно, в зависимости от этапов переработки исходного сырья, начиная от начальных этапов подготовки сырья, и, непосредственно, получения карбонизированного материала до его химической активации, и, заканчивая дальнейшей постобработкой, включая промывку и сушку полученного продукта. Такое положение оборудования позволяет определить типы и число аппаратов, распределение оборудования и его возможную группировку согласно основной технологической цепочке.

Технологическая линия производства активированного углеродного материала состоит из набора оборудования, необходимого для реализации всех стадий производства готового продукта. Выбор определенного типа оборудования зависит от ряда факторов, включающих в себя технологический процесс, который протекает в нем, реакционную среду и другие процессы, например, типизацию и стандартизацию элементов конструкций (рис. 1).

Для реализации представленной схемы производства использовано стандартное оборудование, среди которого контрольно-измерительные приборы, запорная арматура, трубопроводы и др. Используемые в технологической линии бункеры, смеситель и емкости являются типовыми конструкциями, различие которых лишь в объеме. Исключением являются реакторы карбонизации и щелочной активации, конструкция и объем которых соответствуют требованиям по производительности, с учетом рабочей среды, необходимости нагрева и охлаждения реакционного объема, подачи и отвода инертного газа и продуктов химических реакций.

Технологический процесс включает следующие этапы и последовательность производства. Исходные углеродные материалы из бункеров Б4 загружаются в заданном соотношении в реактор карбонизации РК для термообработки. Затем

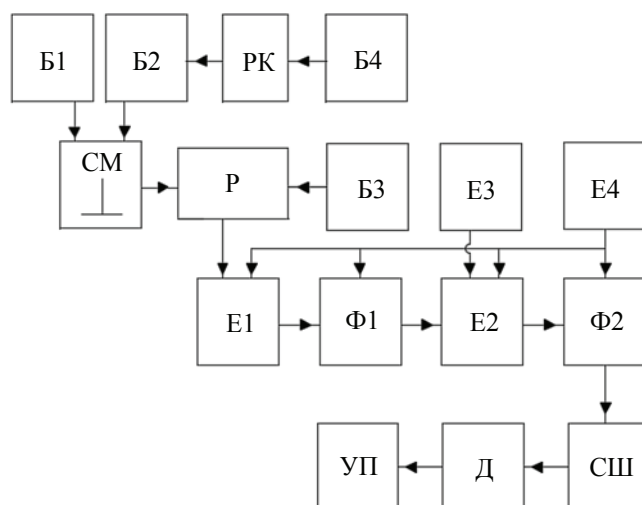


Рис. 1. Принципиальная схема производства активированного высокопористого углеродного материала

порошкообразные карбонизированное углеродное вещество и гидроксид калия из бункеров Б1 и Б2 подаются с помощью дозаторов в смеситель-диспергатор СМ для смешивания и измельчения с целью получения однородной реакционной смеси.

Далее полученная смесь загружается в реактор химической активации Р, в который одновременно начинается подача инертного газа (аргона) из баллонов Б3, регулируемая газовым дозатором. В реакторе вышеперечисленные компоненты подвергаются активации – термообработке, ступенчато, при 400 и 750 °С в течение нескольких часов [6]. После активации полученный продукт перемещается в емкость замачивания и выдержки Е1 и заливается дистиллированной водой из емкости Е4. В емкости Е1 материал отстаивается в течение 12...24 ч. Затем щелочная суспензия подается в фильтр Φ1, где промывается дистиллированной водой до нейтральной реакции. Отмытый материал подается в емкость Е2, в которую с помощью жидкостного дозатора также подается кислота (например, соляная) из емкости Е3. Смесь остается в емкости на 12...24 ч. Далее продукты реакции (кислая суспензия) попадают в фильтр Φ2, где промываются до нейтральной кислотности. После фильтра материал помещается в сушильный шкаф СШ, где подвергается сушке при 110 °С в течение 4...7 ч, в зависимости от массы, после чего полученный активированный углеродный материал измельчается в диспергаторе Д и перемещается в упаковочную машину УП для фасовки и упаковки.

В зависимости от применяемого исходного сырья и технологических режимов активации (температуры, скорости нагрева, выдержки), получены активированные углеродные материалы с высокоразвитой пористой поверхностью с преобладанием микро- или мезопор [23]. Физико-механические и физико-химические характеристики, под которыми понимаются как параметры пористости, так и параметры поверхности, определены с помощью специального аппарата – анализатора поверхности и пористости Nova Quantachrome E1200, по адсорбции азота; определение удельной поверхности осуществлено по многоточечному методу БЭТ; по методу DFT определяли распределение пор по размерам и удельный объем пор. В результате получили активированный углеродный материал, имеющий следующие характеристики: удельную поверхность по БЭТ – 2 400...2 700 м²/г, удельную поверхность по DFT – 2 000...2 300 м²/г, удельный объем пор по DFT – 1,2...1,3 см³/г, из них на микропоры ≈ 80 %.

Из анализа полученных на данном этапе исследований результатов следует, что задача разработки активированного углеродного материала с высокой удельной поверхностью и удельным объемом мезопор решена. Несмотря на некоторую неоднозначность и недостаточность экспериментальных данных сделаны следующие выводы:

- рассмотрены и классифицированы высокопористые углеродные материалы, определены их ключевые характеристики и параметры;
- определены необходимые этапы исследований получения активированного высокопористого углеродного материала и дано их описание;
- установлены основные стадии и особенности производства активированного высокопористого углеродного материала, включающие карбонизацию исходного углеродного сырья, щелочную активацию и постобработку полученного материала;
- установлено, что параметры удельной поверхности и пористости зависят в первую очередь от исходных компонентов, применяемых для получения углеродсодержащих веществ и их процентного соотношения, а также технологических режимов активации;
- представлена принципиальная схема производства активированного углеродного материала, определен основной состав оборудования и установлена возможность масштабного перехода аппаратурно-технологического оформления процесса производства от лабораторного к опытно-промышленному;
- полученный активированный углеродный материал по своим характеристикам и параметрам может применяться в качестве сорбентов в системах очистки газовых сред, в газовых аккумуляторах и при решении различных экологических задач.

Список литературы

1. Фенелонов, В. Б. Пористый углерод / В. Б. Фенелонов. – Новосибирск : Институт катализа, 1995. – 518 с.
2. Мищенко, С. В. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение / С. В. Мищенко, А. Г. Ткачев. – М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.
3. Головин, Ю. И. Введение в нанотехнологию : учеб. пособие / Ю. И. Головин. – М. : Машиностроение-1, 2003. – 112 с.
4. Адсорбционные системы аккумуляции метана на основе углеродных пористых структур / А. Ю. Цивадзе, О. Е. Аксютин, А. Г. Ишков [и др.] // Успехи химии. – 2018. – Т. 87, № 10. – С. 950 – 983. doi: 10.1070/RCR4807
5. Влияние структурно-энергетических характеристик микропористой структуры углеродных адсорбентов на адсорбцию водорода / А. А. Фомкин, А. А. Прибылов, А. Г. Ткачев [и др.] // Коллоидный журнал. – 2019. – Т. 81, № 5. – С. 660 – 666. DOI: 10.1134/S0023291219050057
6. Chen, Ch.-H. Hydrogen Storage by KOH-Modified Multi-Walled Carbon Nanotubes / Ch.-H. Chen, Ch.-Ch. Huang // International Journal of Hydrogen Energy. – 2007. – Vol. 32, No. 2. – P. 237 – 246.
7. Kopac, T. Temperature and Alkaline Hydroxide Treatment Effects on Hydrogen Sorption Characteristics of Multi-Walled Carbon Nanotube–Graphite Mixture / T. Kopac, F. O. Erdogan // Journal of Industrial and Engineering Chemistry. – 2009. – Vol. 15, No. 5. – P. 730 – 735.
8. Пат. 2625671 Российская Федерация, МПК В01J 20/20, С01В 31/14. Блочный нанопористый углеродный материал для аккумуляции природного газа, метана и способ его получения / А. А. Фомкин, А. Ю. Цивадзе, О. Е. Аксютин, А. Г. Ишков, Е. М. Стриженов, А. В. Школин, И. Е. Меньшиков, А. О. Шевченко ; заявитель и патентообладатель ПАО «Газпром». – № 2016124918 ; заявл. 22.06.2016 ; опубл. 18.07.2017, Бюл. № 20. – 9 с.

9. Пат 2736586 Российская Федерация, МПК В01J 20/20, В01J 20/30. Формованный наноструктурированный микропористый углеродный сорбент и способ его получения / А. Г. Ткачев, Н. Р. Меметов, А. Е. Кучерова, А. В. Мележик, И. Н. Шубин, А. Д. Зеленин, А. А. Попова ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет». – № 2019121997 ; заявл. 09.07.2019 ; опубл. 18.11.2020, Бюл. № 32. – 7 с.
10. Попова, А. А. Синтез и исследование нанопористого углеродного материала / А. А. Попова, Р. Э. Алиев, И. Н. Шубин // Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы : материалы X Всероссийской науч.-практ. конф., 16–17 октября 2020 г., Рубцовск. – Рубцовск, 2020. – С. 136 – 140.
11. Carbon Activation with KOH as Explored by Temperature Programmed Techniques, and the Effects of Hydrogen / D. Lozano-Castello, J. M. Calo, D. Cazorla-Amoros, A. Linares-Solano // Carbon. – 2007. – Vol. 45, No. 13. – P. 2529 – 2536. doi: 10.1016/j.carbon.2007.08.021
12. Пат. 2620404 Российская Федерация, МПК С01В 31/08. Способ получения мезопористого углерода / А. Г. Ткачев, А. В. Мележик, Г. В. Соломахо ; заявитель и патентообладатель ООО «НаноТехЦентр». – № 2016102551 ; заявл. 26.01.2016 ; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 15. – 19 с.
13. Influence of the Activating Agent and the Inert Gas (Type and Flow) used in an Activation Process for the Porosity Development of Carbon Nanofibers / V. Jiménez, P. Sánchez, J. L. Valverde, A. Romero // Journal of Colloid and Interface Science. – 2009. – Vol. 336, No. 2. – P. 712 – 722. doi: 10.1016/j.jcis.2009.04.017
14. Jiang, Q. Effects of Activation Conditions on BET Specific Surface Area of Activated Carbon Nanotubes / Q. Jiang, Y. Zhao // Microporous and Mesoporous Materials. – 2004. – Vol. 76, No. 1-3. – P. 215 – 219. doi: 10.1016/j.micromeso.2004.08.020
15. Niu, J. J. Effect of Temperature on Chemical Activation of Carbon Nanotubes / J. J. Niu, J. N. Wang // Solid State Sciences. – 2008. – Vol. 10, No. 9. – P. 1189 – 1193. doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2007.12.016
16. Enhanced Capacitance of Carbon Nanotubes through Chemical Activation / E. Frackowiak, S. Delpoux, K. Jurewicz [et al.] // Chemical Physics Letters. – 2002. – Vol. 361, No. 1-2. – P. 35 – 41.
17. Chen, Ch.-H. Enhancement of Hydrogen Spillover Onto Carbon Nanotubes with Defect Feature / Ch.-H. Chen, Ch.-Ch. Huang // Microporous and Mesoporous Materials. – 2008. – Vol. 109, No. 1-3. – P. 549 – 559.
18. 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
19. Методика проектирования аппаратурного оформления производств углеродных нанотрубок и полупродуктов на их основе / А. В. Рухов, Д. В. Таров, Т. П. Дьячкова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2019. – Т. 62, № 3. – С. 94 – 101. doi: 10.6060/ivkkt.20196203.5959
20. Попова, А. А. Использование CALS-технологий в машиностроении на примере разработки трехмерных моделей типовых изделий / А. А. Попова, И. Н. Шубин, Р. Э. Алиев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2020. – Т. 26, № 4. – С. 637 – 649. doi: 10.17277/vestnik.2020.04.pp.637-649
21. Popova, A. A. Modeling of Mixing Nanopowder Materials when Designing Process Equipment / A. A. Popova, D. V. Tarov, I. N. Shubin // Advanced Materials and Technologies. – 2019. – № 4 (16). – С. 66 – 74. doi: 10.17277/amt.2019.04.pp.066-074
22. Popova A. A. Features of Nanoporous Carbon Material Synthesis / A. A. Popova, R. E. Aliev, I. N. Shubin // Advanced Materials and Technologies. – 2020. – № 3 (19). – С. 28 – 32. doi: 10.17277/amt.2020.03.pp.028-032

Process Design of Activated Carbon Material Production

A. A. Popova

*Department of Technique and Technology for the Production of Nanoproducts,
alyona.popova.93@list.ru; TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: activated carbon nanomaterial; diagnostics of characteristics; technological equipment; stages of design.

Abstract: The possibility of developing activated carbon materials with a high specific surface area is shown. Their classification, the main stages of research and the results obtained are considered. A schematic diagram of the production of a material with a BET specific surface in the range of 2400...2700 m²/g is presented. The main stages of the production of activated carbon material have been determined, including the preliminary carbonization of the carbon raw material, its alkaline activation, and the post-processing of the obtained material (from the pre-preparation of the components and the preparation of the reaction mixture to the subsequent isolation and drying of the finished product). The composition of the equipment and the possibility of a large-scale transition from laboratory to pilot industrial production have been determined.

References

1. Fenelonov V.B. *Poristy uglerod* [Porous carbon], Novosibirsk: Institut kataliza, 1995, 518 p. (In Russ.)
2. Mishchenko S.V., Tkachev A.G. *Uglerodnyye nanomaterialy. Proizvodstvo, svoystva, primeneniye* [Carbon nanomaterials. Production, properties, application], Moscow: Mashinostroyeniye, 2008, 320 p. (In Russ.)
3. Golovin Yu.I. *Vvedeniye v nanotekhnologiyu: uchebnoye posobiye* [Introduction to nanotechnology: a tutorial], Moscow: Mashinostroyeniye-1, 2003, 112 p. (In Russ.)
4. Tsvadze A.Yu., Aksyutin O.Ye., Ishkov A.G. [et al.] [Adsorption systems for accumulating methane based on carbon porous structures], *Uspekhi khimii* [Advances in chemistry], 2018, vol. 87, no. 10, pp. 950-983, doi: 10.1070/RCR4807 (In Russ.)
5. Fomkin A.A., Pribylov A.A., Tkachev A.G. [et al.] [Influence of the structural and energy characteristics of the microporous structure of carbon adsorbents on the adsorption of hydrogen], *Kolloidnyy zhurnal* [Colloid journal], 2019, vol. 81, no. 5, pp. 660-666, doi: 10.1134/S0023291219050057 (In Russ., abstract in Eng.)
6. Chen Ch.-H., Huang Ch.-Ch. Hydrogen Storage by KOH-Modified Multi-Walled Carbon Nanotubes, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, vol. 32, no. 2, pp. 237-246.
7. Kopac T., Erdogan F.O. Temperature and Alkaline Hydroxide Treatment Effects on Hydrogen Sorption Characteristics of Multi-Walled Carbon Nanotube-Graphite Mixture, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2009, vol. 15, no. 5, pp. 730-735.
8. Fomkin A.A., Tsvadze A.Yu., Aksyutin O.Ye., Ishkov A.G., Strizhenov Ye.M., Shkolin A.V., Men'shchikov I.Ye., Shevchenko A.O. *Blochnyy nanoporisty uglerodnyy material dlya akumulirovaniya prirodnogo gaza, metana i sposob yego polucheniya* [Block nanoporous carbon material for storage of natural gas, methane and a method for its production], Russian Federation, 2017, Pat. 2625671. (In Russ.)
9. Tkachev A.G., Memetov N.R., Kucherova A.Ye., Melezhik A.V., Shubin I.N., Zelenin A.D., Popova A.A. *Formovanny nanostrukturirovanny mikroporisty uglerodnyy sorbent i sposob yego polucheniya* [Formed nanostructured microporous

carbon sorbent and a method for its production], Russian Federation, 2020, Pat 2736586. (In Russ.)

10. Popova A.A., Aliyev R.E., Shubin I.N. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii: problemy, sostoyaniye i perspektivy* [Modern equipment and technologies: problems, state and prospects], Proceedings of the X All-Russian Scientific and Practical Conference, 16-17 October, 2020, Rubtsovsk, 2020, pp. 136-140. (In Russ.)

11. Lozano-Castello D., Calo J.M., Cazorla-Amoros D., Linares-Solano A. Carbon Activation with KOH as Explored by Temperature Programmed Techniques, and the Effects of Hydrogen, *Carbon*, 2007, vol. 45, no. 13, pp. 2529-2536, doi: 10.1016/j.carbon.2007.08.021

12. Tkachev A.G., Melezhik A.V., Solomakho G.V. *Sposob polucheniya mezoporistogo ugleroda* [Method of obtaining mesoporous carbon], Russian Federation, 2017, Pat. 2620404. (In Russ.)

13. Jiménez V., Sánchez P., Valverde J.L., Romero A. Influence of the Activating Agent and the Inert Gas (Type and Flow) used in an Activation Process for the Porosity Development of Carbon Nanofibers, *Journal of Colloid and Interface Science*, 2009, vol. 336, no. 2, pp. 712-722, doi: 10.1016/j.jcis.2009.04.017

14. Jiang Q., Zhao Y. Effects of Activation Conditions on BET Specific Surface Area of Activated Carbon Nanotubes, *Microporous and Mesoporous Materials*, 2004, vol. 76, no. 1-3, pp. 215-219, doi: 10.1016/j.micromeso.2004.08.020

15. Niu J.J., Wang J.N. Effect of Temperature on Chemical Activation of Carbon Nanotubes, *Solid State Sciences*, 2008, vol. 10, no. 9, pp. 1189-1193, doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2007.12.016

16. Frackowiak E., Delpeux S., Jurewicz K., Szostak K., Cazorla-Amoros D., Beguin F. Enhanced Capacitance of Carbon Nanotubes through Chemical Activation, *Chemical Physics Letters*, 2002, vol. 361, no. 1-2, pp. 35-41.

17. Chen Ch.-H., Huang Ch.-Ch. Enhancement of Hydrogen Spillover Onto Carbon Nanotubes with Defect Feature, *Microporous and Mesoporous Materials*, 2008, vol. 109, no. 1-3, pp. 549-559.

18. 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. Mechanical engineering], 2020, no. 7 (724), pp. 3-12, doi: 10.18698/0536-1044-2020-7-3-12 (In Russ.)

19. Rukhov A.V., Tarov D.V., D'yachkova T.P., Orlova N.V., Shubin I.N., Tarov V.P. [Methodology for the design of hardware design for production of carbon nanotubes and intermediate products based on them], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Series: Chemistry and Chemical Technology], 2019, vol. 62, no. 3, pp. 94-101, doi: 10.6060/ivkkt.20196203.5959 (In Russ., abstract in Eng.)

20. Popova A.A., Shubin I.N., Aliyev R.E. [The use of CALS-technologies in mechanical engineering on the example of the development of three-dimensional models of standard products], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2020, vol. 26, no. 4, pp. 637-649, doi: 10.17277/vestnik.2020.04.pp.637-649

21. Popova A.A., Tarov D.V., Shubin I.N. Modeling of Mixing Nanopowder Materials when Designing Process Equipment, *Advanced Materials and Technologies*, 2019, no. 4 (16), pp. 66-74, doi: 10.17277/amt.2019.04.pp.066-074 (In Eng., abstract in Russ.)

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

Hardware - technologische Gestaltung der Produktion von aktiviertem Kohlenstoffmaterial

Zusammenfassung: Es ist die Möglichkeit gezeigt, Aktivkohlematerialien mit hoher spezifischer Oberfläche zu entwickeln. Betrachtet sind ihre Klassifikation, die Hauptphasen der Forschung und die erzielten Ergebnisse. Es ist ein schematisches Diagramm der Herstellung des Materials mit einer spezifischen BET-Oberfläche im Bereich von 2400...2700 m²/g vorgestellt. Die Hauptstufen der Herstellung von Aktivkohlematerial sind festgelegt, einschließlich der Vorverkokung des Kohlenstoffrohmaterials, seiner alkalischen Aktivierung und der Nachbearbeitung des erhaltenen Materials (von der Vorbereitung der Komponenten und der Vorbereitung der Reaktionsmischung bis zur anschließenden Isolierung und Trocknung des fertigen Produktes). Es sind die Zusammensetzung der Ausrüstung und die Möglichkeit des großtechnischen Übergangs von der Labor- zur Pilotproduktion bestimmt.

Conception matérielle et technologique de la production de matériel de carbone activé

Résumé: Est montrée la possibilité de l'élaboration des matériaux natifs au charbon actif avec une surface spécifique élevée. Sont examinés leur classification, les principales étapes de la recherche et les résultats obtenus. Est présenté le schéma principal de la production d'un matériau avec une surface spécifique selon BET dans la plage de 2400...2700 m²/g. Sont examinées les principales étapes de la production du matériau de carbone activé, y compris la pré-carbonisation de la matière première de carbone, son activation alcaline et le post-traitement du matériau obtenu (à partir de la pré-préparation des composants et de la préparation du mélange réactionnel jusqu'à la séparation et le séchage ultérieurs du produit fini). Sont déterminées la composition de l'équipement et la possibilité d'une transition à grande échelle de la production de laboratoire à la production expérimentale.

Автор: Попова Алена Алексеевна – аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: Дьячкова Татьяна Петровна – доктор химических наук, профессор кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.