

УДК 661.183.2

doi: 10.18698/0536-1044-2022-1-20-30

Исследование влияния технологических параметров на аппаратное оформление процесса производства активированного углеродного материала

А.А. Попова, И.Н. Шубин

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

Analysis of the Factors Affecting the Instrumentation of the Technological Process of the Activated Carbon Material Production

A.A. Popova, I.N. Shubin

Tambov State Technical University

Показана актуальность разработки активированных углеродных материалов с высокой удельной поверхностью и большой пористостью. Установлены особенности протекания химической активации и факторы, влияющие на характеристики получаемого материала. Определены основные стадии активации углеродного материала, включающие в себя предварительную карбонизацию углеродного сырья, его щелочную активацию и постобработку созданного материала. Экспериментально исследовано взаимное влияние температуры и расхода инертного газа на характеристики углеродного материала с удельной поверхностью по методу BET в диапазоне 2550...2700 м²/г. Проведен анализ результатов исследования. Даны рекомендации по снижению неоднозначности и неопределенности при переходе от лабораторных исследований к опытно-промышленному производству. Полученный активированный углеродный материал можно использовать как сорбент в системах очистки газовых сред, газовых аккумуляторах и для решений различных экологических задач.

Ключевые слова: производительность оборудования, технологические параметры процесса, диагностика характеристик, активированный углеродный материал

The article discusses significance of the development of activated carbon materials with a high specific surface area and high porosity. The features of the course of chemical activation and the factors influencing the characteristics of the obtained material have been established. The main stages of the activation of the carbon material, including the preliminary raw carbon material carbonization, its alkaline activation, and the post-processing of the created material, have been determined. The mutual influence of temperature and flow rate of an inert gas on the characteristics of a carbon material obtained with a BET specific surface in the range of 2550–2700 m²/g is experimentally investigated. The analysis of the obtained results has been carried out. Recommendations are given for reducing ambiguity and uncertainty during the transition from laboratory research to pilot production. The resulting activated carbon material can be used as a sorbent in gas purification systems, gas accumulators and for solving various environmental problems.

Keywords: equipment performance, technological parameters of the process, diagnostics of characteristics, activated carbon material

Анализ исследований последних лет показывает повышенный интерес к разработке высокопористых углеродных материалов с большим содержанием микро- и мезопор. Это объясняется широтой открывающихся перспектив для их практического применения в различных отраслях промышленности, особенно в химической, фармацевтической, энергетической и радиоэлектронной.

Такие материалы можно использовать в качестве универсальных сорбентов (для очистки жидких и газовых сред), катализаторов, гемо- и энтеросорбентов, в устройствах хранения и транспортирования газообразного топлива, химических топливных элементах, суперконденсаторах и т. д.

Для большинства областей применения наиболее эффективными являются материалы, содержащие микро- и мезопоры с высокими удельными объемом и поверхностью. Самыми перспективными в этом направлении считаются активированные углеродные материалы (АУМ), обладающие развитой системой микро- и мезопор и получившие распространение в технологических процессах, связанных с разделением, выделением и концентрированием различных сред.

Такой материал должен характеризоваться большим удельным объемом пор для проникновения молекул сорбируемых веществ и достаточно большой удельной поверхностью, соответствующей доступным порам. Также АУМ должен быть химически инертным и стабильным в условиях реального применения [1–4] и иметь достаточно крупные транспортные поры, обеспечивающие быструю диффузию молекул сорбируемых веществ в объеме материала.

Чтобы получить АУМ, углеродное сырье сначала карбонизируют, а затем подвергают активации газо- или жидкофазными реагентами: диоксидом углерода, водяным паром, различными кислотами, щелочами и т. д. В результате создается высокопористая структура с большим содержанием микро- и мезопор [5–7].

Предварительные исследования показали, что такие физико-химические характеристики в первую очередь зависят от исходных компонентов, применяемых для получения углеродосодержащих веществ (карбонизатов), а также от режимов активации (массового отношения, например, гидроксида калия к активируемому материалу, температуры к времени активации) и газообмена в реакционной зоне.

Температура активации исходного углеродного вещества с присутствием щелочного активатора в инертной среде у различных авторов варьируется в достаточно широком диапазоне. Причем равновесие сдвигаемо в ту или другую сторону относительно температуры и концентраций (давлений, химических активностей) компонентов [6–9].

В работе [10] рассмотрен способ получения АУМ с помощью высокотемпературной обработки углеродного сырья при температуре 300...500 °С с присутствием активирующих реагентов. АУМ содержал преимущественно микропоры с удельной поверхностью 950...1800 м²/г, определенной по методу ВЕТ (Brunauer–Emmett–Teller).

В статье [11] исследована химическая активация углеродного материала в инертной среде при температуре 750 °С. Удельная поверхность АУМ по методу ВЕТ составила 1765 м²/г, общий объем пор — 1,00 см³/г, объем микропор — 0,68 см³/г.

Авторы работы [12] совмещали карбонизацию и активацию углеродного сырья в непрерывном потоке инертного газа при температуре 750 °С. Удельная поверхность АУМ по методу ВЕТ составила 2653 м²/г, общий объем пор — 1,26 см³/г, из которых на микропоры приходилось 0,80 см³/г, на мезопоры — не более 0,46 см³/г.

Активация биомассы в различных расплавах гидроксидов щелочных металлов при температуре 800 °С рассмотрена в публикации [13]. Более высокие характеристики АУМ получены в исследовании, где в качестве активирующего реагента использовали гидроксид калия. Удельная поверхность АУМ по методу ВЕТ составила 2003...2680 м²/г, объем пор — 0,86...2,12 см³/г.

Высокотемпературная активация гидроксидом калия углеродного сырья при температуре 800 °С описана в трудах [14, 15]. АУМ имели удельную поверхность по методу ВЕТ 590...3100 м²/г и содержали как микро-, так и мезопоры.

В работе [16] для получения АУМ авторы проводили активацию в инертной атмосфере до температуры 500...900 °С при выдержке до 3 ч.

Наилучшие результаты по увеличению удельных поверхности и объема пор достигнуты в исследовании, где температурный интервал активации составил 700...900 °С. При таких параметрах создан АУМ с удельной поверхностью

стью по методу ВЕТ 900...1840 м²/г, общим объемом пор 0,52...0,96 см³/г, из которых на микропоры приходилось 77...88 %, на мезопоры — 12...23 %.

В исследовании [6] приведены данные, согласно которым удельные поверхность и объем пор АУМ, получаемые в результате активации углеродного материала, существенно увеличиваются с ростом скорости продувки реакционной зоны инертным газом.

Повышение эффективности активации (т. е. возрастание удельных поверхности и объема пор углеродных нановолокон) гидроксидом калия при температуре 850 °С с увеличением скорости потока инертного газа наблюдалось также в работе [17].

При этом установлено [8, 18], что зависимость удельных поверхности и объема пор от скорости продувки инертным газом при активации углеродных материалов гидроксидом калия имеет экстремальный характер, и существует оптимальная скорость продувки.

Однако в работе [19] показано, что с ростом скорости продувки системы инертным газом при активации гидроксидом калия удельные поверхность и объем пор АУМ падают.

Таким образом, литературные данные на эту тему противоречивы: эффективность скорости продувки системы инертным газом может зависеть и от конкретной системы и, возможно, от конфигурации реактора, равно как и от величины загрузки активируемой реакционной смеси в реактор.

По-видимому, скорость продувки аргоном в температурном интервале 630...750 °С будет оказывать непосредственное влияние на вынос паров калия. Концентрация же калия, с одной стороны, влияет на структуру интеркалированного калием углерода, а с другой — на окислительно-восстановительное равновесие в системе, тем самым воздействуя на свойства получаемого активированного углерода.

Также следует отметить, что авторы многочисленных работ, представляя результаты по синтезу АУМ, опираются на лабораторные исследования, плохо поддающиеся масштабному переходу к промышленным условиям производства (технологиям и оборудованию), или уделяют внимание лишь отдельным свойствам углеродных материалов и параметрам технологических процессов.

В некоторых работах приведены результаты математического моделирования, которые но-

сят частный характер и слабо подкреплены экспериментальными исследованиями [20–22].

Таким образом, без комплексного подхода, знания связи исходных характеристик сырья и получаемых углеродных материалов, а также особенностей аппаратурно-технологического обеспечения процесса производства, невозможно осуществить качественный полноценный переход от лабораторных исследований к промышленному производству [23].

Цель работы — экспериментальное определение взаимного влияния технологических и конструктивных параметров оборудования на примере реактора химической активации на процесс изготовления АУМ для использования результатов в проектных и технологических мероприятиях по повышению качества, предсказуемости и однозначности характеристик получаемого материала и производительности оборудования.

Объекты и методы исследования. В зависимости от применяемого исходного сырья и технологических режимов активации (температуры, скорости нагрева, выдержки) можно получить АУМ с высокоразвитой пористой поверхностью с преобладанием микро- или мезопор [24–26].

В состав технологического процесса производства АУМ входят следующие основные стадии:

- подготовка (термообработка) исходного углеродного вещества (содержащего, например, фенолформальдегидную смолу, графен или углеродные нанотрубки, декстрин или карбоксиметилцеллюлозу), в результате которой получают карбонизированное углеродное вещество;
- смешивание порошкообразного карбонизированного углеродного вещества с гранулами гидроксида калия для создания равномерной реакционной смеси;
- термообработка реакционной смеси при температуре активации — высокотемпературная химическая активация путем нагрева и выдержки порошкообразного карбонизированного углеродного вещества с гидроксидом калия в течение заданного времени в инертной среде;
- первая постобработка активированной смеси — замачивание и выдержка полученного материала с образованием гидроксида калия, а также растворение в воде содержащегося в активированном веществе карбоната калия; филь-

трование и промывка щелочной водной суспензии продуктов активации водой на фильтре с фильтрующим слоем из нетканого полипропиленового материала до достижения рН выходящей из фильтра промывной воды 7...8;

- вторая постобработка активированной смеси — замачивание и выдержка АУМ в кислоте 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; отмывка кислой суспензии до нейтрального рН вытекающей из фильтра промывной воды;

- сушка АУМ в вентилируемом сушильном шкафу;

- упаковка высушенного АУМ.

В проведенном эксперименте исследовано взаимное влияние на характеристики получаемого углеродного материала таких технологических параметров, как температуры в печи и реакторе и объем инертного газа, подаваемого в реактор [20, 26].

Предварительные исследования и анализ литературных источников позволили установить границы технологических режимов. Основные характеристики получаемого АУМ — поверхность и пористость — находили по адсорбции азота с использованием анализатора поверхности и пористости Nova Quantachrome E1200. Удельную поверхность определяли по многоточечному методу BET, распределение пор — по размерам, удельный объем пор — по методу DFT [26].

Таким образом, исследуемый технологический режим активации — вторая стадия производства АУМ — предусматривал ступенчатый нагрев до температуры $T_n = 400$ и 750 °С и выдержку 1 и 2 ч соответственно на каждой ступени при расходе инертного газа $Q = 1,0; 1,3$ и $2,0$ л/мин.

Расход инертного газа аргона регулировался и контролировался лабораторным расходомером газа, температура в печи — встроенным терморегулятором, температура в реакторе — термопарой, подключенной к программатору «Овен ТРМ 101». Показания температуры фиксировались с шагом 5 мин.

Экспериментальная установка (реактор химической активации) состояла из цилиндрического корпуса 6, плоской крышки 5, термопары 3, патрубков для ввода инертного газа 4 и вывода реакционных газов 2. Для нагрева ре-

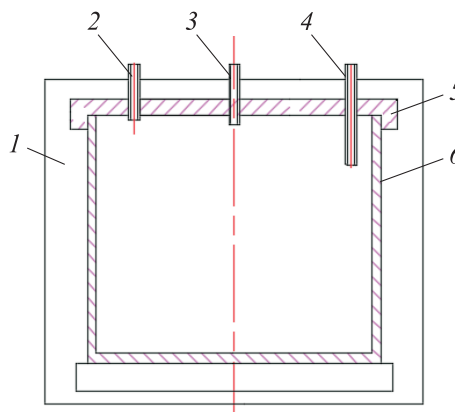


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

актора химической активации использовали печь 1 (рис. 1).

Экспериментальная установка работала следующим образом. В реактор загружали карбонизированное углеродное сырье и гидроксид калия в заданном количестве. Реактор закрывали крышкой и помещали в печь. Включали нагрев печи и одновременно подавали внутрь реактора инертный газ, причем его объем регулировался. Выход реакционных газов обеспечивал патрубков вывода.

По завершении процесса активации печь отключалась и охлаждалась вместе с реактором до комнатной температуры. При этом подача инертного газа в реактор не прекращалась до остывания печи, после чего из него извлекали АУМ для дальнейшей постобработки.

Результаты исследования и их обсуждение.

Экспериментальные значения температур в реакторе и печи при температуре нагрева $T_n = 400$ и 750 °С и различных значениях времени и расхода инертного газа приведены в табл. 1 и на рис. 2. Результаты усреднены по трем сериям экспериментов.

Полученный АУМ обладал следующими характеристиками: удельная поверхность по методу BET — $2550...2700$ м²/г; удельная поверхность по методу DFT — $2000...2100$ м²/г; удельный объем пор по методу DFT — $1,18...1,25$ см³/г; удельный объем микропор (2 нм) по методу DFT — $0,98...1,10$ см³/г.

На основании указанных характеристик можно утверждать, что получен нанопористый АУМ с преобладанием микропор. Усредненные по трем сериям экспериментов для каждого расхода газа и значения температуры характеристики АУМ приведены в табл. 2.

Таблица 1

Экспериментальные значения температур в реакторе и печи

Время, мин	Температура, °C					
	Q = 1,0 л/мин		Q = 1,3 л/мин		Q = 1,5 л/мин	
	$T_n = 400\text{ °C}$	$T_n = 750\text{ °C}$	$T_n = 400\text{ °C}$	$T_n = 750\text{ °C}$	$T_n = 400\text{ °C}$	$T_n = 750\text{ °C}$
5	22/78	410/438	23/81	407/432	28/85	403/426
10	37/114	445/490	41/119	433/478	43/126	427/470
15	65/170	490/539	70/166	474/524	73/173	462/511
20	115/230	553/598	117/220	549/589	105/214	550/596
25	142/258	599/643	136/261	621/547	145/263	607/653
30	191/305	644/685	203/317	638/691	211/323	663/702
35	249/350	703/733	251/373	717/745	285/382	720/751
40	315/397	740/757	305/391	746/755	321/400	745/760
45	358/410	750/760	357/400	750/760	356/410	750/760
50	386/410	750/754	377/410	750/752	376/411	750/751
55	393/410	750/750	389/415	750/750	389/415	750/750
60	398/410	–	392/415	–	400/415	–
65	400/410	–	400/407	–	400/409	–
70	400/400	–	400/400	–	400/400	–

Примечание. В числителе дроби указаны значения температуры в реакторе, в знаменателе — в печи.

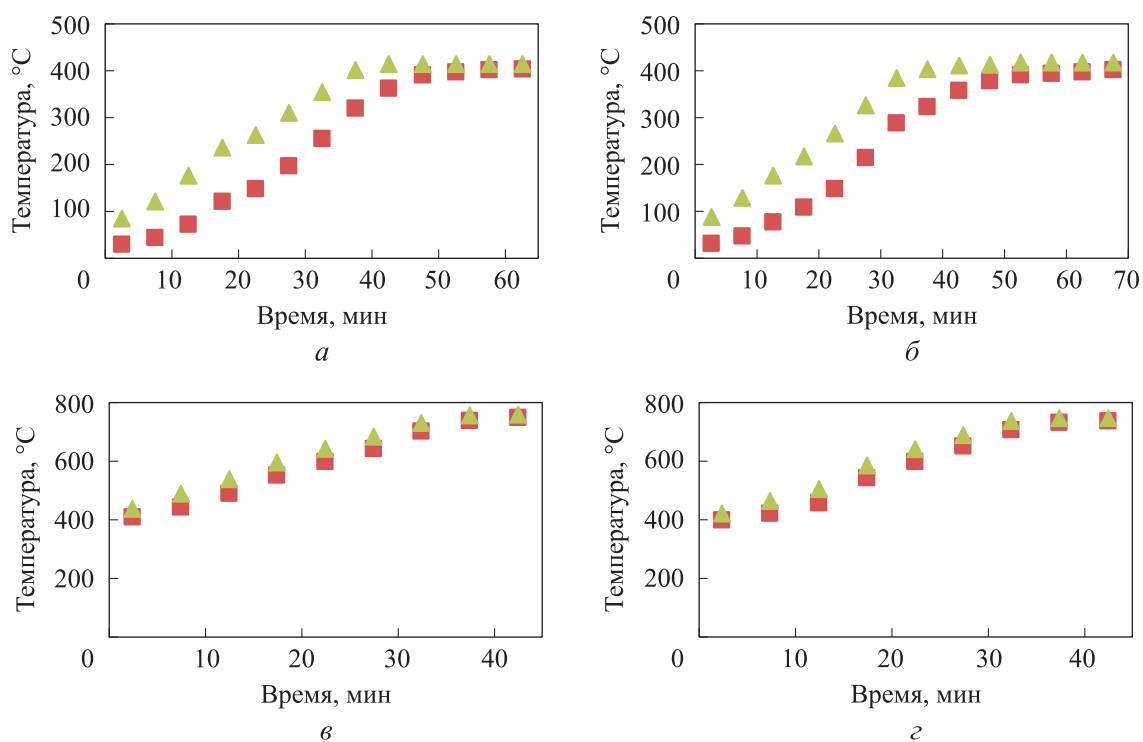


Рис. 2. Зависимости температуры в печи (\blacktriangle) и реакторе (\blacksquare) от времени при различных значениях расхода инертного газа и температуры нагрева:
 а — $Q = 1,0$ л/мин, $T_n = 400$ °C; б — $Q = 1,5$ л/мин, $T_n = 400$ °C;
 в — $Q = 1,0$ л/мин, $T_n = 750$ °C; г — $Q = 1,5$ л/мин, $T_n = 750$ °C

Таблица 2

Усредненные характеристики полученного АУМ

Номер серии экспериментов	Расход инертного газа, л/мин	Удельная поверхность, м ² /г		Удельный объем, см ³ /г	
		по методу BET	по методу DFT	пор	микропор
1	1,0	2710	2079	1,254	1,023
2	1,3	2548	2013	1,175	0,989
3	1,5	2612	2039	1,214	1,009

Анализ результатов исследований по определению зависимости температуры от расхода инертного газа, однозначно подтвердил их взаимосвязь, но менее явственную, чем предполагалось ранее. Несмотря на достаточно высокие параметры АУМ, сохраняется неоднозначность и неопределенность трактовки результатов. В общем виде температурную диаграмму процесса можно разделить на пять участков (этапов) — нагрева, выдержки и охлаждения (рис. 3).

Первый этап — нагрев от $T_n = 18\text{ °C}$ до $T_n = 400\text{ °C}$. При расходе инертного газа $Q = 1,0$ л/мин разогрев печи и реактора в ней занимал соответственно 45 и 65 мин, при $Q = 1,3$ л/мин — 45 и 65 мин, при $Q = 1,5$ л/мин — 40 и 60 мин. Можно заключить, что инертный газ практически не оказывает влияние на процесс повышения температуры.

Второй этап — выдержка заданной температуры (происходит первая стадия химической активации).

Третий этап — нагрев от температуры $T_n = 400\text{ °C}$ до $T_n = 750\text{ °C}$ для печи занимал 35...37 мин, для реактора — около 45 мин, время нагрева не зависело от расхода инертного газа, вследствие чего можно предположить, что инертный газ успевал нагреться и не оказывал существенного влияния на температуру.

Четвертый этап — выдержка заданной тем-

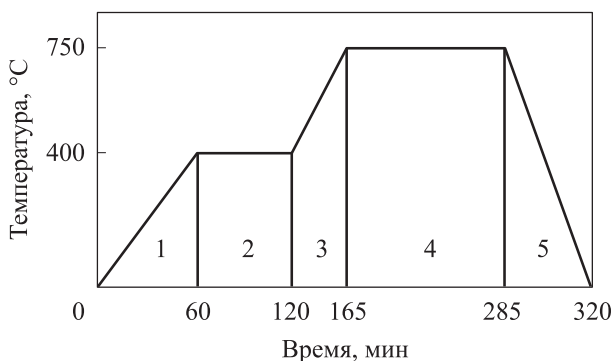


Рис. 3. Температурная диаграмма этапов процесса химической активации углеродного материала

пературы (происходит вторая стадия химической активации).

Пятый этап — охлаждение от 750 °C до 35 °C при расходе инертного газа $Q = 1,0; 1,3$ и $1,5$ л/мин занимал 45, 40 и 35 мин.

Полученные значения не могут быть однозначно определяющими в рамках отдельных этапов. Однако, оценивая стадию активации целиком, применительно к промышленному производству, можно отметить некоторые технологические и конструктивные особенности, которые будут полезны для реализации и оптимизации процесса активации.

Скорость образования водорода и других горючих газов, паров и аэрозолей, зависящая от состава реакционной смеси, температуры и времени не управляема, а скорость продувки реактора инертным газом управляема. Поэтому скорость уноса паров калия из системы будет зависеть от скорости продувки инертным газом.

В проведенных исследованиях инертный газ подавался в верхнюю часть цилиндрического реактора, и сверху же находился отвод реакционной газовой смеси. В таком варианте конвекционное проникновение аргона в нижнюю часть реактора и емкости для активации может происходить только за счет того, что аргон более тяжелый, чем образующиеся реакционные газы.

Таким образом, в данной конструкции реактора есть элемент неполной управляемости, что можно изменить, например, путем установки спирального или перфорированного подвода инертного газа в реактор. Это должно улучшить равномерность распределения и выравнивание потоков, эффективный отвод продуктов реакции, а также предварительный нагрев инертного газа (рис. 4).

Снижение неоднозначности в технологических режимах видится в расширении исследуемого диапазона подачи инертного газа, например, от $0,5$ л/мин (от значения минимально без-

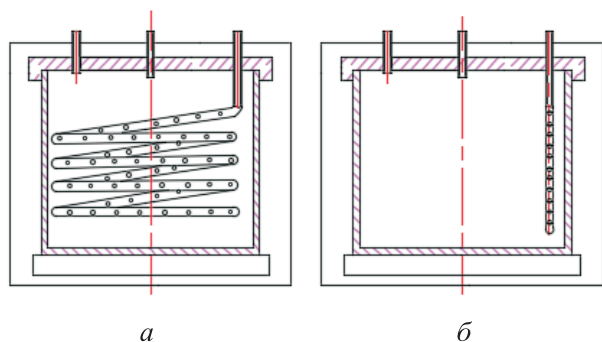


Рис. 4. Схемы подвода инертного газа в реактор активации с помощью перфорированных змеевика (а) и патрубка (б)

опасного по разбавлению и отводу паров металлического калия из зоны реакции и поддержания инертной среды в реакторе) до 2 л/мин (до значения, после которого может наблюдаться унос отдельных фракций исходных реагентов), а также в комплексном исследовании влияния температуры на режим активации, конструкцию реактора и конструкционные материалы элементов оборудования.

При этом необходимо учитывать инертность в нагреве реактора и отличие фактической температуры от показаний терморегулятора печи, что может еще больше усугубиться при увеличении объема реактора активации, объема АУМ или подачи инертного газа. Указанные особен-

ности могут оказывать существенное влияние на протекание технологического процесса.

Выводы

1. Выполнен анализ многочисленных работ, посвященных вопросам получения АУМ, в частности, особенностям протекания химической активации и технологическим факторам, влияющим на процесс.

2. Установлены основные стадии производства АУМ и этапы химической активации.

3. Определены технологические параметры и граничные условия исследования, а также мероприятия по диагностике полученных данных.

4. Выявлена зависимость характеристик АУМ — удельной поверхности и пористости — от технологических режимов активации.

5. Даны рекомендации по снижению неоднозначности и неопределенности получаемых результатов при переходе от лабораторных исследований к опытно-промышленному производству.

6. Получен АУМ, который можно применять в качестве сорбента в различных отраслях промышленности, а также для решения экологических задач.

Литература

- [1] Цивадзе А.Ю., Аксютин О.Е., Ишков А.Г. и др. Адсорбционные системы аккумуляции метана на основе углеродных пористых структур. *Успехи химии*, 2018, т. 87, № 10, с. 950–983.
- [2] Корас Т., Erdogan F.O. Temperature and alkaline hydroxide treatment effects on hydrogen sorption characteristics of multi-walled carbon nanotube–graphite mixture. *J. Ind. Eng. Chem.*, 2009, vol. 15, no. 5, pp. 730–735, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2009.09.054>
- [3] Фомкин А.А., Цивадзе А.Ю., Аксютин О.Е. и др. Блочный нанопористый углеродный материал для аккумуляции природного газа, метана и способ его получения. Патент РФ 2625671. Заявл. 22.06.2016, опубл. 18.07.2017.
- [4] Ткачев А.Г., Меметов Н.Р., Кучерова А.Е. и др. Формованный наноструктурированный микропористый углеродный сорбент и способ его получения. Патент РФ 2736586. Заявл. 09.07.2019, опубл. 18.11.2020.
- [5] Попова А.А., Алиев Р.Э., Шубин И.Н. Синтез и исследование нанопористого углеродного материала. *Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы. Мат. X Всерос. науч.-практ. конф.* Рубцовск, Рубцовский индустриальный институт, 2020, с. 136–141.
- [6] Jiménez V., Sánchez P., Valverde J.L., et al. Influence of the activating agent and the inert gas (type and flow) used in an activation process for the porosity development of carbon nanofibers. *J. Colloid Interface Sci.*, 2009, vol. 336, no. 2, pp. 712–722, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.04.017>

- [7] Lozano-Castello D., Calo J.M., Cazorla-Amoros D., et al. 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: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2007.08.021>
- [8] Fierro V., Torne-Fernandez V., Celzard A. Highly microporous carbons prepared by activation of kraft lignin with KOH. *Stud. Surf. Sci. Catal.*, 2007, vol. 160, pp. 607–614, doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(07\)80078-4](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(07)80078-4)
- [9] Hayashi J., Uchibayashi M., Horikawa T., et al. Synthesizing activated carbons from resins by chemical activation with K₂CO₃. *Carbon*, 2002, vol. 40, no. 15, pp. 2747–2752, doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(02\)00151-3](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(02)00151-3)
- [10] Benaddi H., Bandoz T.J., Jagiello J., et al. Surface functionality and porosity of activated carbons obtained from chemical activation of wood. *Carbon*, 2000, vol. 38, no. 5, pp. 669–674, doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(99\)00134-7](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(99)00134-7)
- [11] Suarez-Garcia F., Vilaplana-Ortego E., Kunowsky M., et al. Activation of polymer blend carbon nanofibres by alkaline hydroxides and their hydrogen storage performances. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2009, vol. 34, no. 22, pp. 9141–9150, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.09.026>
- [12] Zheng Z., Gao Q. Hierarchical porous carbons prepared by an easy one-step carbonization and activation of phenol-formaldehyde resins with high performance for supercapacitors. *J. Power Sources*, 2011, vol. 196, no. 3, pp. 1615–1619, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.09.010>
- [13] Чесноков Н.В., Микова Н.М., Иванов И.П. и др. Получение углеродных сорбентов химической модификацией ископаемых углей и растительной биомассы. *Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Химия*, 2014, т. 7, № 1, с. 42–53.
- [14] Zhu Y., Murali S., Stoller M.D., et al. Carbon-based supercapacitors produced by activation of graphene. *Science*, 2011, vol. 332, no. 6037, pp. 1537–1541, doi: <https://doi.org/10.1126/science.1200770>
- [15] Gun'ko V., Kozynchenko O., Tennison S., et al. Comparative study of nanopores in activated carbons by HRTEM and adsorption methods. *Carbon*, 2012, vol. 50, no. 9, pp. 3146–3153, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.10.009>
- [16] Teng H., Wang S.C. Preparation of porous carbons from phenol-formaldehyde resins with chemical and physical activation. *Carbon*, 2000, vol. 38, no. 6, pp. 817–824, doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(99\)00160-8](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(99)00160-8)
- [17] Jiménez V., Díaz J.A., Sánchez P., et al. Influence of the activation conditions on the porosity development of herringbone carbon nanofibers. *Chem. Eng. J.*, 2009, vol. 155, no. 3, pp. 931–940, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.035>
- [18] Jiang Q., Zhao Y. Effects of activation conditions on BET specific surface area of activated carbon nanotubes. *Microporous Mesoporous Mater.*, 2004, vol. 76, no. 1–3, pp. 215–219, doi: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2004.08.020>
- [19] Niu J.J., Nong J. Effect of temperature on chemical activation of carbon nanotubes. *Solid State Sci.*, 2008, vol. 10, no. 9, pp. 1189–1193, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2007.12.016>
- [20] Frackowiak E., Delpeux S., Jurewicz K., et al. Enhanced capacitance of carbon nanotubes through chemical activation. *Chem. Phys. Lett.*, 2002, vol. 361, no. 1–2, pp. 35–41, doi: [https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(02\)00684-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(02)00684-X)
- [21] Chen C.H., Huang C.C. Enhancement of hydrogen spillover onto carbon nanotubes with defect feature. *Microporous Mesoporous Mater.*, 2008, vol. 109, no. 1–3, pp. 549–559, doi: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2007.06.003>
- [22] Рухов А.В., Таров Д.В., Дьячкова Т.П. и др. Методика проектирования аппаратного оформления производств углеродных нанотрубок и полупродуктов на их основе. *Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология*, 2019, т. 62, № 3, с. 94–101, doi: <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196203.5959>
- [23] Ткачев А.Г., Мележик А.В., Соломахо Г.В. *Способ получения мезопористого углерода*. Патент РФ 2620404. Заявл. 26.01.2016, опубл. 25.05.2017.

- [24] Попова А.А., Зеленин А.Д., Алиев Р.Э. и др. Особенности разработки перспективных сорбентов нового поколения на основе углеродного наноматериала. 6-й *Междисциплинарный науч. форум. Новые материалы и перспективные технологии*. Т. 1. Москва, Центр научно-технических решений, 2020, с. 733–735.
- [25] Попова А.А., Мишуков Е.Д., Скрипкин Ю.В. и др. Комплексный подход в разработке аппаратурно-технологического оформления производства перспективных материалов. *Заметки ученого*, 2021, № 3-1, с. 60–66.
- [26] Popova A.A., Aliev R.E., Shubin I.N. Features of nanoporous carbon material synthesis. *AM & T*, 2020, no. 3, pp. 28–32, doi: <https://doi.org/10.17277/amt.2020.03.pp.028-032>

References

- [1] Tsivadze A.Yu., Aksyutin O.E., Ishkov A.G., et al. Porous carbon-based adsorption systems for natural gas (methane) storage. *Uspekhi khimii*, 2018, vol. 87, no. 10, pp. 950–983. (In Russ.). (Eng. version: *Russ. Chem. Rev.*, 2018, vol. 87, no. 10, art. 950, doi: <https://doi.org/10.1070/RCR4807>)
- [2] Kopac T., Erdogan F.O. Temperature and alkaline hydroxide treatment effects on hydrogen sorption characteristics of multi-walled carbon nanotube–graphite mixture. *J. Ind. Eng. Chem.*, 2009, vol. 15, no. 5, pp. 730–735, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2009.09.054>
- [3] Fomkin A.A., Tsivadze A.Yu., Aksyutin O.E., et al. *Blochnyy nanoporisty uglerodnyy material dlya akkumulirovaniya prirodnogo gaza, metana i sposob ego polucheniya* [Block nanoporous carbon material for accumulation of natural gas, methane and method of its production]. Patent RU 2625671. Appl. 22.06.2016, publ. 18.07.2017. (In Russ.).
- [4] Tkachev A.G., Memetov N.R., Kucherova A.E., et al. *Formovanny nanostrukturirovanny mikroporisty uglerodnyy sorbent i sposob ego polucheniya* [Molded nanostructured microporous carbon sorbent and a method for production thereof]. Patent RF 2736586. Appl. 09.07.2019, publ. 18.11.2020. (In Russ.).
- [5] Popova A.A., Aliev R.E., Shubin I.N. [Synthesis and research nanoporous carbon material]. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii: problemy, sostoyanie i perspektivy. Mat. X Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Modern Technics and Technology: Problems, State and Prospects. Proc. X Russ. Sci.-Tech. Conf.]. Rubtsovsk, Rubtsovskiy industrial'nyy institute Publ., 2020, pp. 136–141. (In Russ.).
- [6] Jiménez V., Sánchez P., Valverde J.L., et al. Influence of the activating agent and the inert gas (type and flow) used in an activation process for the porosity development of carbon nanofibers. *J. Colloid Interface Sci.*, 2009, vol. 336, no. 2, pp. 712–722, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.04.017>
- [7] Lozano-Castello D., Calo J.M., Cazorla-Amoros D., et al. 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: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2007.08.021>
- [8] Fierro V., Torne-Fernandez V., Celzard A. Highly microporous carbons prepared by activation of kraft lignin with KOH. *Stud. Surf. Sci. Catal.*, 2007, vol. 160, pp. 607–614, doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(07\)80078-4](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(07)80078-4)
- [9] Hayashi J., Uchibayashi Moscow, Horikawa T., et al. Synthesizing activated carbons from resins by chemical activation with K₂CO₃. *Carbon*, 2002, vol. 40, no. 15, pp. 2747–2752, doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(02\)00151-3](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(02)00151-3)
- [10] Benaddi N., Bandoz T.J., Jagiello J., et al. Surface functionality and porosity of activated carbons obtained from chemical activation of wood. *Carbon*, 2000, vol. 38, no. 5, pp. 669–674, doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(99\)00134-7](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(99)00134-7)
- [11] Suarez-Garcia F., Vilaplana-Ortego E., Kunowsky M., et al. Activation of polymer blend carbon nanofibres by alkaline hydroxides and their hydrogen storage performances. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2009, vol. 34, no. 22, pp. 9141–9150, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.09.026>
- [12] Zheng Z., Gao Q. Hierarchical porous carbons prepared by an easy one-step carbonization and activation of phenol-formaldehyde resins with high performance for supercapacitors.

- J. Power Sources*, 2011, vol. 196, no. 3, pp. 1615–1619, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.09.010>
- [13] Chesnokov N.V., Mikova N.M., Ivanov I.P., et al. Synthesis of carbon sorbents by chemical modification of fossil coals and plant biomass. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Ser. Khimiya* [Journal of Siberian Federal University. Chemistry], 2014, vol. 7, no. 1, pp. 42–53.
- [14] Zhu Y., Murali S., Stoller M.D., et al. Carbon-based supercapacitors produced by activation of graphene. *Science*, 2011, vol. 332, no. 6037, pp. 1537–1541, doi: <https://doi.org/10.1126/science.1200770>
- [15] Gun'ko V., Kozynchenko O., Tennison S., et al. Comparative study of nanopores in activated carbons by HRTEM and adsorption methods. *Carbon*, 2012, vol. 50, no. 9, pp. 3146–3153, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2011.10.009>
- [16] Teng H., Wang S.C. Preparation of porous carbons from phenol-formaldehyde resins with chemical and physical activation. *Carbon*, 2000, vol. 38, no. 6, pp. 817–824, doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(99\)00160-8](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(99)00160-8)
- [17] Jiménez V., Díaz J.A., Sánchez P., et al. Influence of the activation conditions on the porosity development of herringbone carbon nanofibers. *Chem. Eng. J.*, 2009, vol. 155, no. 3, pp. 931–940, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2009.09.035>
- [18] Jiang Q., Zhao Y. Effects of activation conditions on BET specific surface area of activated carbon nanotubes. *Microporous Mesoporous Mater.*, 2004, vol. 76, no. 1-3, pp. 215–219, doi: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2004.08.020>
- [19] Niu J.J., Nong J. Effect of temperature on chemical activation of carbon nanotubes. *Solid State Sci.*, 2008, vol. 10, no. 9, pp. 1189–1193, doi: <https://doi.org/10.1016/j.solidstatesciences.2007.12.016>
- [20] Frackowiak E., Delpeux S., Jurewicz K., et al. Enhanced capacitance of carbon nanotubes through chemical activation. *Chem. Phys. Lett.*, 2002, vol. 361, no. 1–2, pp. 35–41, doi: [https://doi.org/10.1016/S0009-2614\(02\)00684-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2614(02)00684-X)
- [21] Chen C.H., Huang C.C. Enhancement of hydrogen spillover onto carbon nanotubes with defect feature. *Microporous Mesoporous Mater.*, 2008, vol. 109, no. 1-3, pp. 549–559, doi: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2007.06.003>
- [22] Rukhov A.V., Tarov D.V., D'yachkova T.P., et al. Methods of designing hardware decoration of productions of carbon nanotubes and by-products on their basis. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Ser. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [ChemChemTech], 2019, vol. 62, no. 3, pp. 94–101, doi: <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196203.5959> (in Russ.).
- [23] Tkachev A.G., Melezhik A.V., Solomakho G.V. *Sposob polucheniya mezoporigostogo ugleroda* [Method of obtaining mesoporous carbon]. Patent RU 2620404. Appl. 26.01.2016, publ. 25.05.2017.
- [24] Popova A.A., Zelenin A.D., Aliev R.E., et al. [Features of development of perspective sorbents of a new generation based on carbon nanomaterial]. *6 mezhdistsipl. nauch. forum Novye materialy i perspektivnye tekhnologii. T. 1* [6th Interdisciplinary Sci. Forum New Materials and Prospective technologies. Vol. 1]. Moscow, Tsentr nauchno-tekhnicheskikh resheniy Publ., 2020, pp. 733–735. (In Russ.).
- [25] Popova A.A., Mishukov E.D., Skripkin Yu.V., et al. Comprehensive approach in development of hardware and technological design for production of perspective materials. *Zametki uchenogo*, 2021, no. 3-1, pp. 60–66. (In Russ.).
- [26] Popova A.A., Aliev R.E., Shubin I.N. Features of nanoporous carbon material synthesis. *AM & T*, 2020, no. 3, pp. 28–32, doi: <https://doi.org/10.17277/amt.2020.03.pp.028-032>

Информация об авторах

ПОПОВА Алёна Алексеевна — аспирант кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов». ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» (392000, Тамбов, Российская Федерация, ул. Советская, д. 106, e-mail: alyona.popova.93@list.ru).

Шубин Игорь Николаевич — кандидат технических наук, доцент кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов». ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» (392000, Тамбов, Российская Федерация, ул. Советская, д. 106, e-mail: i.shubin77@yandex.ru).

Information about the authors

POPOVA Alyona Alekseevna — Postgraduate, Department of Engineering and Technology for Production of Nanoproducs. Tambov State Technical University (392000, Tambov, Russian Federation, Sovetskaya St., Bldg. 106, e-mail: alyona.popova.93@list.ru).

SHUBIN Igor Nikolaevich — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Engineering and Technology for Production of Nanoproducs. Tambov State Technical University (392000, Tambov, Russian Federation, Sovetskaya St., Bldg. 106, e-mail: i.shubin77@yandex.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Попова А.А., Шубин И.Н. Исследование влияния технологических параметров на аппаратурное оформление процесса производства активированного углеродного материала. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 1, с. 20–30, doi: 10.18698/0536-1044-2022-1-20-30

Please cite this article in English as:

Popova A.A., Shubin I.N. Analysis of the Factors Affecting the Instrumentation of the Technological Process of the Activated Carbon Material Production. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 1, pp. 20–30, doi: 10.18698/0536-1044-2022-1-20-30



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям учебное пособие**

«Материалы для поршневых двигателей. Модули 1 и 2»

Авторы: М.Ю. Семенов, М.В. Унчикова

Приведена методика оптимального выбора материалов для деталей двигателей внутреннего сгорания на основе анализа условий эксплуатации. Большое внимание уделено особенностям состава, структуры и свойств современных металлических и альтернативных материалов для изделий энергетических машин. Рассмотрены методы упрочняющей обработки, проведено сравнение отечественных материалов и покрытий с зарубежными аналогами.

Для студентов, обучающихся по магистерским программам «Двигатели наземного транспорта», «Двигатели специального назначения».

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@bmstu.ru; www.baumanpress.ru