

УДК 66.083:66.067

doi: 10.18698/0536-1044-2024-01-57-67

# Особенности аппаратурно-технологического оформления процесса получения компактированных углеродных материалов

**И.Н. Шубин**

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

## Features of hardware and technological process formation in obtaining the compacted carbon materials

**I.N. Shubin**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Tambov State Technical University

Показана актуальность исследований, направленных на разработку современных сорбционных материалов на основе высокопористого углеродного материала. Рассмотрены основные стадии его производства, включающие в себя щелочную активацию при температуре 400...750 °С, постобработку и компактирование полученного материала с исследованием и определением наиболее рациональных технологических режимов его осуществления. В результате исследования получены активированный и компактированный углеродные материалы. У первого материала удельная поверхность и пористость составили соответственно более 2700 м<sup>2</sup>/г и 1,3 см<sup>3</sup>/г, у второго — более 2000 м<sup>2</sup>/г и 0,84 см<sup>3</sup>/г. Сорбционная способность по отношению к органическому красителю (метиленовому синему) активированного и компактированного углеродных материалов превысила 2000 и 1700 мг/г соответственно, что показывает способность материала быть высокоэффективным сорбентом органических загрязнителей из водных растворов. На основании результатов исследования предложена принципиальная схема аппаратурно-технологического оформления процесса получения компактированного высокопористого углеродного материала, отмечены особенности ее реализации.

**Ключевые слова:** высокопористый углеродный материал, компактирование материала, диагностика параметров, рациональные технологические режимы

The paper demonstrates relevance of the research aimed at developing the advanced sorption materials based on the highly porous carbon material. It considers main stages of the sorption materials production including alkaline activation at the temperature of 400...750°C, post-processing and the resulting material compaction with research and determination of the most rational technological modes in its implementation. The study resulted in obtaining the activated and compacted carbon materials. The first material had specific surface area and porosity, respectively, of more than 2700 m<sup>2</sup>/g and 1.3 cm<sup>3</sup>/g, the second — of more than 2000 m<sup>2</sup>/g and 0.84 cm<sup>3</sup>/g. Sorption capacity of the activated and compacted carbon materials in regard to the organic dye (methylene blue) exceeded 2000 and 1700 mg/g, respectively, which showed the material ability to be a highly effective sorbent of the organic pollutants of the aqueous solutions. Based on the study results, schematic diagram of the hardware and technological process formation in obtaining the compacted highly porous carbon material is proposed, features of its implementation are presented.

**Keywords:** highly porous carbon material, material compaction, parameter diagnostics, rational technological modes

Разработка и исследование высокопористых углеродных материалов (ВУМ), обладающих значительной удельной поверхностью и пористостью с преобладанием микро- и мезопор являются актуальными направлениями большого числа исследований, результаты которых востребованы во многих отраслях промышленности.

ВУМ применяют в качестве универсальных сорбционных материалов для различных жидких и газообразных сред, устройств хранения и транспортирования топлива, катализаторов и носителей удобрений, а также для решения экологических задач.

Это объясняется сбалансированным сочетанием развитой системы микро- и мезопор со значительной удельной поверхностью, соответствующих доступных пор и их большого объема с наличием достаточно крупных транспортных пор, обеспечивающих быструю диффузию веществ, химической инертностью и стабильностью в реальных условиях применения подобных материалов [1–4].

Одной из самых перспективных технологий получения ВУМ является активация различного предварительно карбонизированного углеродного сырья: природных углей, фурфурола, фенолформальдегидной смолы, гидрохинона, карбоксиметилцеллюлозы, декстрина, уротропина, углеродных нанотрубок, графена или их комбинаций с газо- и жидкофазными реагентами (кислотами, щелочами, водяным паром и др.) [5–11].

Так, в работах [12–16] исследовано влияние технологических параметров активации исходного углеродного сырья и режимов компактирования на сорбционные характеристики ВУМ. Отмечена их прямая взаимосвязь, а также возможность масштабирования результатов лабораторных исследований применительно к реальному производству.

Вопросам использования графена для получения ВУМ с иерархической структурой пор с целью потенциального применения в электронике и катализе посвящены исследования [17]. Авторы указывают на перспективность создаваемых материалов, наличие значительной поверхности, возможность химического легирования и функционализации.

Оценке адсорбционных свойств ВУМ с определением их структурных характеристик посвящены публикации [18, 19]. Рассмотрены механизмы адсорбции в упорядоченных нано-

пористых материалах с четко определенной структурой пор. Доказана значимость изучения этих механизмов для улучшения характеристик физической адсорбции.

В работе [20] исследован процесс активации с целью увеличения и улучшения объема мезопор при сохранении четкой сети мезопор. Доказано влияние на характеристики материала активатора — гидроксида калия, напрямую способствующего возрастанию объема мезопор. Показано, что щелочная активация является подходящим способом для повышения адсорбционной способности углерода при сохранении мезопористой структуры.

Исследованию адсорбции водорода в различных углеродистых материалах с оптимизированной структурой посвящена статья [21]. Доказано, что активированный уголь, аморфные углеродные нанотрубки и образцы пористого углерода имеют подобные адсорбционные свойства. Быстрая кинетика и полная обратимость процесса указывали на то, что взаимодействие между молекулами водорода и углеродной наноструктурой имеют характер физической адсорбции. Выявлено линейное соотношение между поглощением водорода и удельной площадью поверхности всех образцов независимо от природы углеродного материала.

Влияние пористости углеродных материалов на сорбцию газов исследовано в статье [22]. Установлено, как разные активаторы влияют на структурные характеристики — удельную площадь поверхности и объем пор. Рассмотрена эффективность различных активирующих агентов в отношении создания микропор. Показано, какие размеры микропор были созданы с использованием конкретных активаторов. Выявлены связи между поглощением газов при различных температурах и размерах пор, а также площадью поверхности.

В работе [23] исследован микропористый углерод, модифицированный органическими веществами в качестве наполнителей для улучшения термических и механических свойств. Созданный сорбционный материал показал значительный прирост характеристик.

Получаемые ВУМ можно использовать в виде порошка, гранул или волокон. При этом к ним часто предъявляют требования по возможности формования для удобства дальнейшего применения в готовых изделиях и улучшения его сорбционных характеристик, по наличию высокой удельной поверхности,

большого объема пор с иерархической пористой структурой, экологической безопасности и селективности. Это делает их перспективными кандидатами для использования во многих областях, что отмечено в публикациях [24–32].

Исследованию сорбционных характеристик компактированных углеродных материалов в качестве эффективного сорбента посвящена работа [33]. Для улучшения параметров углеродного материала предложен компактированный сорбирующий материал на основе комбинации активированного углеродного волокна со связующим. Рассмотрена возможность увеличения общей сорбционной емкости одновременно с высокой проницаемостью и обеспечением оптимальных условий эксплуатации.

В работах [33, 34] отмечено решающее значение оценки адсорбционных свойств ВУМ и определения их структурных характеристик для дальнейшего использования компактированных материалов в различных областях промышленности. Рассмотрены особенности механизмов сорбции в различных нанопористых материалах с хорошо определенной структурой пор. Показана важность этих параметров для совершенствования физических характеристик сорбентов.

Цель исследования — разработка принципиальной схемы, реализующей технологию и аппаратное оформление процесса компактирования ВУМ с учетом особенностей протекающих процессов.

**Объекты и методы исследования.** Ранее были проведены исследования по разработке ВУМ методом высокотемпературной химической активации [5, 7, 9] и по определению возможности компактирования подобных материалов [26]. На основании результатов этих исследований предпринята попытка проанализировать особенности одной из стадий производства компактированного ВУМ, оценив изменение его физико-структурных характеристик и сорбционной емкости по органическим загрязнителям применительно к процессу и технологии компактирования.

В общем виде технологию производства компактированного ВУМ можно подразделить на две основные стадии.

*Первая стадия* — получение ВУМ химической активацией, которая включает в себя отработку режимных параметров высокотемпературной химической активации и состоит из следующих этапов:

- подбор исходного сырья и режимов его карбонизации;
- подбор активатора и его соотношения с карбонизатом;
- определение наиболее эффективных режимов процесса активации (температуры и продолжительности процесса, расхода инертного газа);
- постобработка активированного материала;
- диагностика параметров удельной поверхности и пористости (как основных и наиболее критичных характеристик получаемого активированного материала).
- диагностика какого-либо ключевого параметра (параметров) из области потенциального применения создаваемого материала; в рассматриваемом случае исследована сорбционная активность по одному из типовых органических загрязнителей водных сред (красителю метиленовому синему), определяющему перспективность дальнейших исследований в данном направлении.

*Вторая стадия* включает в себя решение технологических задач, связанных с особенностями компактирования. Так как активированный ВУМ, представляющий собой тонкодисперсный порошкообразный материал, трудно применить на практике, ему необходимо придать какую-либо удобную товарную форму. Наиболее рациональным оказалось его прессование в блочки. Вторая стадия состояла из следующих этапов:

- разработка лабораторной установки и проведение экспериментальных исследований;
- подбор связующего (предварительные исследования показали перспективность и возможность использования в этом качестве таких материалов, как поливиниловый спирт, поливинилацетат, базальтовое или углеродное волокно (фибра));
- подбор режимов компактирования (температуры, давления и продолжительности выдержки);
- диагностика параметров полученного компактированного ВУМ.

Для второй стадии разработана лабораторная установка на базе испытательного пресса ИП-100М-Авто (рис. 1).

Основным элементом лабораторной установки являлась обогреваемая пресс-форма с блоком управления (рис. 2).

На второй стадии проводили три серии экспериментов, включавших в себя несколько

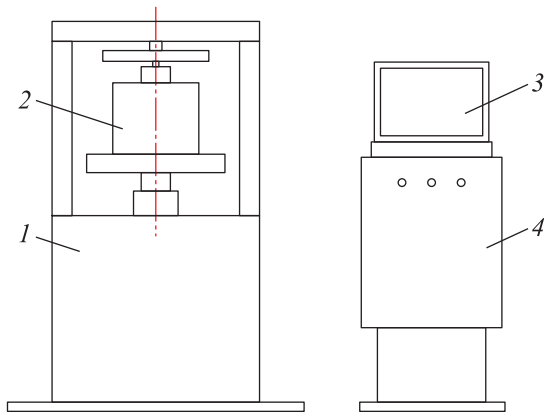


Рис. 1. Схема лабораторной установки для исследования технологических режимов процесса компактирования ВУМ:  
1 — пресс ИП-100М-Авто; 2 — обогреваемая пресс-форма; 3 — монитор для задания и отображения режимов работы установки; 4 — шкаф управления прессом

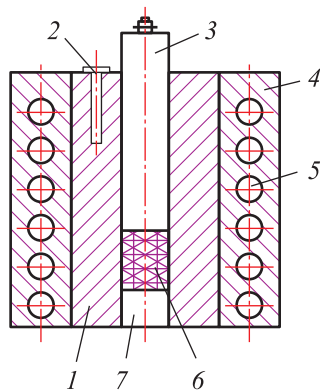


Рис. 2. Схема обогреваемой пресс-формы:  
1 — матрица; 2 — ввод для термодатчика; 3 — пуансон;  
4 — теплоизоляция; 5 — нагревательный элемент;  
6 — компактируемая смесь из ВУМ и связующего;  
7 — основание

опытов по получению образцов компактированного ВУМ, с использованием различных связующих:

- в первой серии — ВУМ + поливиниловый спирт (ПВС);
- во второй серии — ВУМ + поливинилацетат (ПВА);
- в третьей серии — ВУМ + базальтовое волокно (БВ).

Подготовка образцов компактируемой смеси (для первых двух серий) состояла из приготовления раствора связующего (горячего для первой серии вследствие необходимости растворения ПВС) и его смешивания с порошкообразным активированным ВУМ. Затем смесь перемешивали в механическом диспергаторе до однородного состояния, взвешивали и загружали в пресс-форму. Содержание полимерных

связующих в компактируемой смеси составляло 10...30 %.

Для третьей серии БВ в количестве 1...10 % вносили непосредственно в активированный ВУМ в диспергаторе. После обработки полученную смесь взвешивали и помещали в пресс-форму.

Количество связующего устанавливали экспериментально путем предварительных исследований и анализа литературных источников (что определялось необходимостью получения образца (блочка) со стабильной прочностью).

На второй стадии исследовали различные режимы, которые предусматривали ступенчатое изменение параметров в следующих диапазонах: температуры — 75...190 °С; продолжительности выдержки — 30...240 мин; давления — 1,5...7,5 кН. Полученные образцы имели массу 16...33 г, высоту 24...34 мм и диаметр 40 мм.

На обеих стадиях выполняли диагностику параметров получаемых материалов. Удельную поверхность и пористость определяли аналитическим комплексом Nova Quantachrome E1200, а сорбционную активность — спектрофотометром ПЭ-5400ВИ.

### Результаты исследования и их обсуждение.

После проведения первой стадии получен активированный ВУМ, обладавший удельной поверхностью более 2700 м<sup>2</sup>/г и объемом пор более 1,3 см<sup>3</sup>/г [7, 9]. Установлена его высокая сорбционная активность (более 2000 мг/г) по отношению к органическому красителю — метиленовому синему.

Компактированный ВУМ имел следующие характеристики: удельная поверхность — 1550...2000 м<sup>2</sup>/г, удельный объем пор — 0,693...0,849 см<sup>3</sup>/г, сорбционная активность по метиленовому синему — 1000...1610 мг/г.

Полученные результаты показали правильность и перспективность проведения исследований в данном направлении, так как и активированный ВУМ, и компактированный ВУМ, продемонстрировали высокие характеристики и возможность использования в качестве высокоэффективного поглотителя органических загрязнителей из водных растворов.

Проведенные исследования позволили предложить принципиальную схему (рис. 3) аппаратно-технологического оформления процесса получения компактированного ВУМ и рассмотреть особенности ее реализации

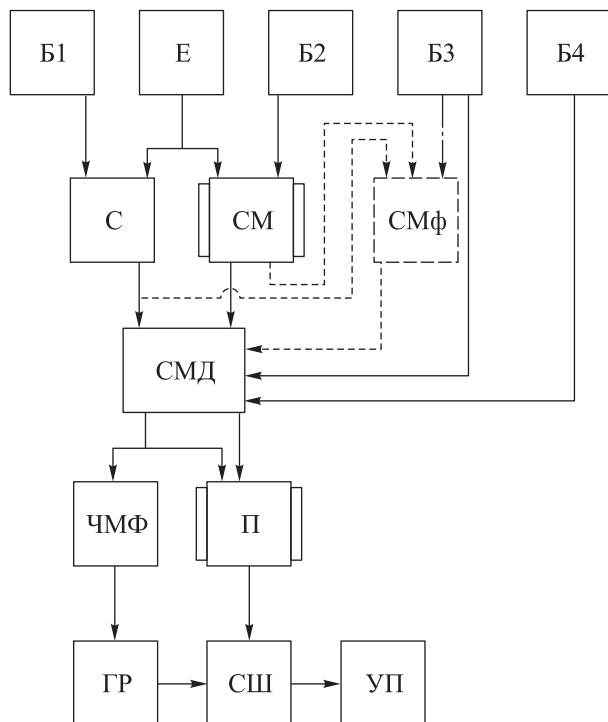


Рис. 3. Принципиальная схема получения компактированного ВУМ

(вторая стадия), принимая во внимание, что технология и аппаратурное оформление процесса получения ВУМ химической активацией (первая стадия) рассмотрены в работах [7, 9, 35].

Предлагаемая принципиальная схема получения компактированного ВУМ предполагает применение нескольких видов связующих, типового оборудования и классических технологических процессов.

Если в качестве связующего использован ПВА, то в смеситель С подается связующее ПВА из бункера Б1, а из емкости Е — дистиллированная вода. Полученный раствор попадает в смеситель-диспергатор СМД, куда также поступает активированный ВУМ из бункера Б4, где компоненты подвергаются измельчению и смешиванию для получения равномерной массы. Однородная масса подается в обогреваемый червячный смеситель с фильерой ЧМФ (для создания образцов в виде гранулята или черенков) или в обогреваемую пресс-форму, установленную в прессе П, где выполняются ступенчатые нагрев и нагружение с выдержкой на каждой ступени (для получения таблеток или блочков). Из червячной машины сформованные образцы поступают в гранулятор ГР, а затем в термостатированный су-

шильный шкаф СШ (или напрямую в СШ из пресс-формы). Полученные образцы фасуются и упаковываются в герметичную упаковку машиной УП.

Если в качестве связующего использован ПВС, то исходные компоненты для связующего — ПВС и дистиллированная вода — подаются соответственно из бункера Б2 и емкости Е в смеситель с обогревом СМ, где готовится горячий раствор, поступающий в смеситель-диспергатор СМД вместе с активированным ВУМ из бункера Б4. Полученная однородная смесь перемещается в обогреваемую пресс-форму, установленную в прессе П, где проводятся ступенчатые нагрев и нагружение с выдерживанием на каждой ступени. В результате получают таблетки или блочки (что определяется количеством загружаемого материала в пресс-форму и режимами прессования). Готовые блочки загружаются в термостатированный сушильный шкаф СШ для постепенного охлаждения в среде защитного газа, после чего упаковываются в герметичную упаковку машиной УП.

Если в качестве связующего использован БВ, то исходные материалы — ВУМ и БВ — в заданном соотношении подаются из соответствующих бункеров Б4 и Б3 в смеситель-диспергатор СМД для формирования равномерной дисперсной смеси. Полученная смесь помещается в обогреваемую пресс-форму, установленную в прессе П, где выполняются ступенчатое нагружение с выдержкой на каждой ступени. В результате получают таблетки (блочки), которые помещаются в сушильный шкаф СШ для постепенного охлаждения, после чего упаковываются машиной УП.

Экспериментальные исследования позволили установить следующие особенности процесса компактирования активированного ВУМ с различными связующими:

- необходимость приготовления водного раствора ПВА для равномерного распределения связующего в объеме ВУМ, так как он является гидрофобным и плохо смачиваемым материалом;
- потребность в приготовлении горячего водного раствора ПВС для равномерного распределения растворенного связующего в углеродном материале;
- необходимость предварительного смачивания фибры полимерными связующими (ПВА или ПВС) для повышения ее адгезии в

сформованном углеродном материале, так как блочки, имеющие состав ВУМ + БВ, склонны к саморазрушению; при этом связующее не оказывает существенного влияния на физико-структурные и сорбционные характеристики компактированных образцов; однако введение подобной технологической операции предполагает некоторое усложнение принципиальной схемы за счет наличия дополнительного оборудования СМф — смесителя для смачивания фибры полимерными связующими — ПВА или ПВС и добавление нагрева при прессовании;

• прямое влияние количества связующего на прочностные и сорбционные характеристики полученных образцов: чем больше его содержание, тем выше прочность блочков и ниже сорбционная активность (независимо от применяемого связующего), так как связующее в компактированном ВУМ, по сути, является балластом; при этом (на данный момент) нижняя и верхняя границы количества связующего обусловлены получением устойчивого стабильного образца и целесообразностью применения подобного связующего соответственно, так как его меньшее количество приводит к разрушению образцов, а большее, как уже отмечалось, — к ощутимому снижению сорбционных характеристик до (и меньше) уровня известных аналогов; но в любом случае требуются дополнительные исследования в данном направлении, а представленные результаты можно считать некоторой точкой отсчета и ориентиром для дальнейших работ.

## Выводы

1. Результаты исследования показали актуальность разработки компактированных ВУМ для использования в качестве сорбционных материалов. Определены две стадии производства таких материалов. Первая стадия (получение ВУМ высокотемпературной активацией) включает в себя подбор исходного углеродного сырья, активатора и режимных параметров процесса. Вторая стадия (компактирование активированного ВУМ) предусматривает определение наиболее рациональных технологических режимов (давления, продолжительности, температуры процесса и применяемых связующих). Для реализации второй стадии разработана лабораторная установка. Определены характеристики полученного материала. Установлена возможность его применения в качестве высокоэффективного сорбента органических загрязнителей из водных сред.

2. Предложена принципиальная схема аппаратурно-технологического оформления процесса получения компактированного ВУМ. Рассмотрены особенности ее реализации.

3. Дальнейшие исследования будут направлены на продолжение работ по определению оптимального соотношения прочностных и сорбционных характеристик компактированного ВУМ с количеством связующего, а также на изучение возможности комбинирования рассмотренных связующих или применения других его видов.

## Литература

- [1] Фомкин А.А., Петухова Г.А., Алехина М.Б. и др., ред. *Актуальные физико-химические проблемы адсорбции и синтеза нанопористых материалов*. Москва ИФХЭ РАН, 2022. 274 с.
- [2] Мищенко С.В., Ткачев А.Г. *Углеродные наноматериалы. Производство свойства применение*. Москва, Машиностроение, 2008. 320 с.
- [3] Попова А.А., Шубин И.Н. и др. Особенности разработки перспективных сорбентов нового поколения на основе углеродного наноматериала. *Новые материалы и перспективные технологии. Сб. мат. 6 Междисциплинарного науч. форума с межд. участием*. Москва, Центр научно-технических решений, 2020, с. 733–735.
- [4] Климов Е.С. *Природные сорбенты и комплексоны в очистке сточных вод*. Ульяновск, УлГТУ, 2011. 201 с.
- [5] Shubin I.N., Popova A.A. Features of implementation options for the process of high-temperature activation of carbon material. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 2023, vol. 8, no. 1, pp. 41–48, doi: <https://doi.org/10.17277/jamt.2023.01.pp.041-048>
- [6] Jorda-Beneyto M., Suarez-Garcia F., Lozano-Castell D. et al. Hydrogen storage on chemically activated carbons and carbon nanomaterials at high pressures. *Carbon*, 2007, vol. 45, no. 2, pp. 293–303, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2006.09.022>

- [7] Попова А.А., Шубин И.Н. Исследование технологических параметров активации, влияющих на характеристики нанопористого углеродного материала. *Материаловедение*, 2022, № 11, с. 3–8.
- [8] Carvalho A.P., Cardoso B., Pires J. et al. Preparation of activated carbons from cork waste by chemical activation with KOH. *Carbon*, 2003, vol. 41, no. 14, pp. 2873–2876, doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(03\)00323-3](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(03)00323-3)
- [9] Попова А.А., Шубин И.Н. Исследование процесса высокотемпературной щелочной активации углеродного материала с дополнительным воздействием водяным паром. *Вестник ТГТУ*, 2022, т. 28, № 3, с. 476–486, doi: <https://doi.org/10.17277/vestnik.2022.03.pp.476-486>
- [10] 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>
- [11] Dong W., Xia W., Xie K. et al. Synergistic effect of potassium hydroxide and steam co-treatment on the functionalization of carbon nanotubes applied as basic support in the Pd-catalyzed liquid-phase oxidation of ethanol. *Carbon*, 2017, vol. 121, pp. 452–462, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.06.019>
- [12] Falco C., Marco-Lozar J.P., Salinas-Torres D. et al. Tailoring the porosity of chemically activated hydrothermal carbons: influence of the precursor and hydrothermal carbonization temperature. *Carbon*, 2013, vol. 62, pp. 346–355, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.06.017>
- [13] Marco-Lozar J.P., Kunowsky M., Carruthers J.D. et al. Gas storage scale-up at room temperature on high density carbon materials. *Carbon*, 2014, vol. 76, pp. 123–132, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.04.058>
- [14] Seema H., Kemp K.C., Le N.H. et al. Highly selective CO<sub>2</sub> capture by S-doped microporous carbon materials. *Carbon*, 2014, vol. 66, pp. 320–326, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.09.006>
- [15] Sevilla M., Fuertesa A.B., Mokayac R. Preparation and hydrogen storage capacity of highly porous activated carbon materials derived from polythiophene. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2011, vol. 36, no. 24, pp. 15658–15663, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.09.032>
- [16] Kim H.S., Kang M.S., Yoo W.C. Highly enhanced gas sorption capacities of N-doped porous carbon spheres by hot NH<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub> treatments. *J. Phys. Chem.*, 2015, vol. 119, no. 51, pp. 28512–28522, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b10552>
- [17] Gadipelli S., Guo Z.X. Graphene-based materials: synthesis and gas sorption, storage and separation. *Prog. Mater. Sci.*, 2015, vol. 69, pp. 1–60, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.10.004>
- [18] Cychosz K.A., Thommes M. Progress in the physisorption characterization of nanoporous gas storage materials. *Engineering*, 2018, vol. 4, no. 4, pp. 559–566, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.06.001>
- [19] Melnichenko Y.B., Cristian I., Nidia C. et al. SANS investigations of CO<sub>2</sub> adsorption in microporous carbon. *Carbon*, 2015, vol. 95, pp. 535–544, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.08.010>
- [20] Perez-Mendoza M., Schumacher C., Suarez-Garcia F. et al. Analysis of the microporous texture of a glassy carbon by adsorption measurements and Monte Carlo simulation. Evolution with chemical and physical activation. *Carbon*, 2006, vol. 44, no. 4, pp. 638–645, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.09.037>
- [21] Panella B., Hirscher M., Roth S. Hydrogen adsorption in different carbon nanostructures. *Carbon*, 2005, vol. 43, no. 10, pp. 2209–2214, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.03.037>
- [22] Meisner G.P., Hu Q. High surface area microporous carbon materials for cryogenic hydrogen storage synthesized using new template-based and activation-based approaches. *Nanotechnology*, 2009, vol. 20, no. 20, art. 204023, doi: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/20/204023>
- [23] Wu X., Shaibani M., Smith S.J.D. et al. Microporous carbon from fullerene impregnated porous aromatic frameworks for improving the desalination performance of thin film compo-

- site forward osmosis membranes. *J. Mater. Chem. A*, 2018, vol. 6, no. 24, pp. 11327–11336, doi: <https://doi.org/10.1039/C8TA01200H>
- [24] Zgrzebnicki M., Kałamaga A., Wrobel R. Sorption and textural properties of activated carbon derived from charred beech wood. *Molecules*, 2021, vol. 26, no. 24, art. 7604, <https://doi.org/10.3390/molecules26247604>
- [25] Олонцев В.Ф., Фарберова Е.А., Минькова А.А. и др. Оптимизация пористой структуры активированных углей в процессе технологического производства. *Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология*, 2015, № 4, с. 9–23.
- [26] 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.
- [27] Фенелонов В.Б. *Пористый углерод*. Новосибирск, Институт катализа СО РАН, 1995. 513 с.
- [28] Vasiliev L.L., Kanonchik L.E., Kulakov A.G. et al. Activated carbon fiber composites for ammonia, methane and hydrogen adsorption. *Int. J. Low Carbon Technol.*, 2006, vol. 1, no. 2, pp. 95–111, doi: <https://doi.org/10.1093/ijlct/1.2.95>
- [29] Ouyang J., Zhou L., Liu Z. et al. Biomass-derived activated carbons for the removal of pharmaceutical micropollutants from wastewater: a review. *Sep. Purif. Technol.*, 2020, vol. 253, art. 117536, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117536>
- [30] Han X., Wang H., Zhang L. Efficient removal of methyl blue using nanoporous carbon from the waste biomass. *Water Air Soil Pollut.*, 2018, vol. 229, no. 2, art. 26, doi: <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3682-0>
- [31] Shahkarami S., Azargohar R., Dalai A.K. et al. Breakthrough CO<sub>2</sub> adsorption in bio-based activated carbons. *J. Environ. Sci.*, 2015, vol. 34, pp. 68–76, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.03.008>
- [32] Pérez-Mayoral E., Matos I., Bernardo M. et al. New and advanced porous carbon materials in fine chemical synthesis. Emerging precursors of porous carbons. *Catalysts*, 2019, vol. 9, no. 2, art. 133, doi: <https://doi.org/10.3390/catal9020133>
- [33] Qian D., Lei C., Wang E.M. et al. A method for creating microporous carbon materials with excellent CO<sub>2</sub>-adsorption capacity and selectivity. *ChemSusChem*, 2014, vol. 7, no. 1, pp. 291–298, doi: <https://doi.org/10.1002/cssc.201300585>
- [34] Алиев Р.Э., Попова А.А. Компактированный нанопористый углеродный материал для систем очистки воздуха. В: *Проблемы техногенной безопасности и устойчивого развития*. Вып. 12. Тамбов, ТГТУ, 2020, с. 28–31.
- [35] Шубин И.Н., Попова А.А. Совершенствование аппаратурно-технологического оформления производства высокопористого углеродного материала. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2023, № 6, с. 58–65, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-6-58-65>

## References

- [1] Fomkin A.A., Petukhova G.A., Alekhina M.B. et al., eds. *Aktualnye fiziko-khimicheskie problemy adsorbtsii i sinteza nanoporistykh materialov* [Actual physical and chemical problems of adsorption and synthesis of nanoporous materials]. Moscow IFKhE RAN Publ., 2022. 274 p. (In Russ.).
- [2] Mishchenko S.V., Tkachev A.G. *Uglerodnye nanomaterialy: proizvodstvo svoystvo primeneniye* [Carbon nanomaterials. Production property application]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 320 p. (In Russ.).
- [3] Popova A.A., Shubin I.N. et al. Osobennosti razrabotki perspektivnykh sorbentov novogo pokoleniya na osnove uglerodnogo nanomateriala [Features of development of perspective sorbents of a new generation based on carbon nanomaterial]. *Novye materialy i perspektivnye tekhnologii. Sb. mat. 6 Mezhdistsiplinarnogo nauch. foruma s mezhd. uchastiem* [New Materials and Advanced Technologies. Proc. 6 Interdisciplinary Sci. Forum with Int. Participation]. Moscow, Tsentr nauchno-tekhnicheskikh resheniy Publ., 2020, pp. 733–735. (In Russ.).



- [4] Klimov E.S. *Prirodnye sorbenty i kompleksony v oshistke stochnykh vod* [Natural sorbents and complexons in wastewater treatment]. Ulyanovsk, UIGTU Publ., 2011. 201 p. (In Russ.).
- [5] Shubin I.N., Popova A.A. Features of implementation options for the process of high-temperature activation of carbon material. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 2023, vol. 8, no. 1, pp. 41–48, doi: <https://doi.org/10.17277/jamt.2023.01.pp.041-048>
- [6] Jorda-Beneyto M., Suarez-Garcia F., Lozano-Castell D. et al. Hydrogen storage on chemically activated carbons and carbon nanomaterials at high pressures. *Carbon*, 2007, vol. 45, no. 2, pp. 293–303, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2006.09.022>
- [7] Popova A.A., Shubin I.N. Study of technological parameters of activation, effecting on characteristics of nanoporous carbon material. *Materialovedenie*, 2022, no. 11, pp. 3–8. (In Russ.).
- [8] Carvalho A.P., Cardoso B., Pires J. et al. Preparation of activated carbons from cork waste by chemical activation with KOH. *Carbon*, 2003, vol. 41, no. 14, pp. 2873–2876, doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(03\)00323-3](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(03)00323-3)
- [9] Popova A.A., Shubin I.N. Investigation of the process of high-temperature alkaline activation of carbon material with additional action of water vapor. *Vestnik TGTU* [Transactions of the TSTU], 2022, vol. 28, no. 3, pp. 476–486, doi: <https://doi.org/10.17277/vestnik.2022.03.pp.476-486> (in Russ.).
- [10] 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>
- [11] Dong W., Xia W., Xie K. et al. Synergistic effect of potassium hydroxide and steam co-treatment on the functionalization of carbon nanotubes applied as basic support in the Pd-catalyzed liquid-phase oxidation of ethanol. *Carbon*, 2017, vol. 121, pp. 452–462, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.06.019>
- [12] Falco C., Marco-Lozar J.P., Salinas-Torres D. et al. Tailoring the porosity of chemically activated hydrothermal carbons: influence of the precursor and hydrothermal carbonization temperature. *Carbon*, 2013, vol. 62, pp. 346–355, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.06.017>
- [13] Marco-Lozar J.P., Kunowsky M., Carruthers J.D. et al. Gas storage scale-up at room temperature on high density carbon materials. *Carbon*, 2014, vol. 76, pp. 123–132, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.04.058>
- [14] Seema H., Kemp K.C., Le N.H. et al. Highly selective CO<sub>2</sub> capture by S-doped microporous carbon materials. *Carbon*, 2014, vol. 66, pp. 320–326, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.09.006>
- [15] Sevillaa M., Fuertesa A.B., Mokayac R. Preparation and hydrogen storage capacity of highly porous activated carbon materials derived from polythiophene. *Int. J. Hydrog. Energy*, 2011, vol. 36, no. 24, pp. 15658–15663, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.09.032>
- [16] Kim H.S., Kang M.S., Yoo W.C. Highly enhanced gas sorption capacities of N-doped porous carbon spheres by hot NH<sub>3</sub> and CO<sub>2</sub> treatments. *J. Phys. Chem.*, 2015, vol. 119, no. 51, pp. 28512–28522, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.5b10552>
- [17] Gadipelli S., Guo Z.X. Graphene-based materials: synthesis and gas sorption, storage and separation. *Prog. Mater. Sci.*, 2015, vol. 69, pp. 1–60, doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2014.10.004>
- [18] Cychosz K.A., Thommes M. Progress in the physisorption characterization of nanoporous gas storage materials. *Engineering*, 2018, vol. 4, no. 4, pp. 559–566, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.06.001>
- [19] Melnichenko Y.B., Cristian I., Nidia C. et al. SANS investigations of CO<sub>2</sub> adsorption in microporous carbon. *Carbon*, 2015, vol. 95, pp. 535–544, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2015.08.010>
- [20] Perez-Mendoza M., Schumacher C., Suarez-Garcia F. et al. Analysis of the microporous texture of a glassy carbon by adsorption measurements and Monte Carlo simulation. Evolution with chemical and physical activation. *Carbon*, 2006, vol. 44, no. 4, pp. 638–645, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.09.037>

- [21] Panella B., Hirscher M., Roth S. Hydrogen adsorption in different carbon nanostructures. *Carbon*, 2005, vol. 43, no. 10, pp. 2209–2214, doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.03.037>
- [22] Meisner G.P., Hu Q. High surface area microporous carbon materials for cryogenic hydrogen storage synthesized using new template-based and activation-based approaches. *Nanotechnology*, 2009, vol. 20, no. 20, art. 204023, doi: <https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/20/204023>
- [23] Wu X., Shaibani M., Smith S.J.D. et al. Microporous carbon from fullerene impregnated porous aromatic frameworks for improving the desalination performance of thin film composite forward osmosis membranes. *J. Mater. Chem. A*, 2018, vol. 6, no. 24, pp. 11327–11336, doi: <https://doi.org/10.1039/C8TA01200H>
- [24] Zgrzebnicki M., Kałamaga A., Wrobel R. Sorption and textural properties of activated carbon derived from charred beech wood. *Molecules*, 2021, vol. 26, no. 24, art. 7604, <https://doi.org/10.3390/molecules26247604>
- [25] Olontsev V.F., Farberova E.A., Minkova A.A. et al. Optimization of porous structure of adsorbent carbon in the course of technological production. *Vestnik PNIPU. Khimicheskaya tekhnologiya i biotekhnologiya* [PNRPU Bulletin. Chemical Technology and Biotechnology], 2015, no. 4, pp. 9–23. (In Russ.).
- [26] 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 RU 2736586. Appl. 09.07.2019, publ. 18.11.2020. (In Russ.).
- [27] Fenelonov V.B. *Poristy uglerod* [Porous carbon]. Novosibirsk, Institut kataliza SO RAN Publ., 1995. 513 p. (In Russ.).
- [28] Vasiliev L.L., Kanonchik L.E., Kulakov A.G. et al. Activated carbon fiber composites for ammonia, methane and hydrogen adsorption. *Int. J. Low Carbon Technol.*, 2006, vol. 1, no. 2, pp. 95–111, doi: <https://doi.org/10.1093/ijlct/1.2.95>
- [29] Ouyang J., Zhou L., Liu Z. et al. Biomass-derived activated carbons for the removal of pharmaceutical micropollutants from wastewater: a review. *Sep. Purif. Technol.*, 2020, vol. 253, art. 117536, doi: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117536>
- [30] Han X., Wang H., Zhang L. Efficient removal of methyl blue using nanoporous carbon from the waste biomass. *Water Air Soil Pollut.*, 2018, vol. 229, no. 2, art. 26, doi: <https://doi.org/10.1007/s11270-017-3682-0>
- [31] Shahkarami S., Azargohar R., Dalai A.K. et al. Breakthrough CO<sub>2</sub> adsorption in bio-based activated carbons. *J. Environ. Sci.*, 2015, vol. 34, pp. 68–76, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.03.008>
- [32] Pérez-Mayoral E., Matos I., Bernardo M. et al. New and advanced porous carbon materials in fine chemical synthesis. Emerging precursors of porous carbons. *Catalysts*, 2019, vol. 9, no. 2, art. 133, doi: <https://doi.org/10.3390/catal9020133>
- [33] Qian D., Lei C., Wang E.M. et al. A method for creating microporous carbon materials with excellent CO<sub>2</sub>-adsorption capacity and selectivity. *ChemSusChem*, 2014, vol. 7, no. 1, pp. 291–298, doi: <https://doi.org/10.1002/cssc.201300585>
- [34] Aliev R.E., Popova A.A. Kompaktirovanny nanoporisty uglerodnyy material dlya sistem ochistki vozdukh [Compacted nanoporous carbon nanoporous material for air purification systems]. V: *Problemy tekhnogennoy bezopasnosti i ustoychivogo razvitiya*. Vyp. 12 [Problems of technogenic safety and sustainable development. Iss. 12]. Tambov, TGTU Publ., 2020, pp. 28–31. (In Russ.).
- [35] Shubin I.N., Popova A.A. Improving hardware and technological design of the highly porous carbon material production. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroeniye* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2023, no. 6, pp. 58–65, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2023-6-58-65> (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 07.07.2023

## Информация об авторе

**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 author

**SHUBIN Igor Nikolaevich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Equipment and Technology for the Production of Nanoproducts. Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education 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:

Шубин И.Н. Особенности аппаратурно-технологического оформления процесса получения компактированных углеродных материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2024, № 1, с. 57–67, doi: 10.18698/0536-1044-2024-01-57-67

### Please cite this article in English as:

Shubin I.N. Features of hardware and technological process formation in obtaining the compacted carbon materials. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2024, no. 1, pp. 57–67, doi: 10.18698/0536-1044-2024-01-57-67



## Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям 2-е издание учебника «Взрывные технологии»

**Авторы: В.В. Селиванов, И.Ф. Кобылкин, С.А. Новиков**

Описаны практически все известные взрывные технологии, имеющие промышленное значение: упрочнение, сварка, штамповка, прессование с помощью энергии взрыва и динамический синтез сверхтвердых материалов, а также рассмотрены технологии разделения на фрагменты стальных конструкций с помощью как удлиненных кумулятивных зарядов, так и ударных волн. Изложены основные представления об экологически безопасных взрывных методах разборки и уничтожения боеприпасов. Рассмотрены способы защиты от действия взрыва, а также приведены простые инженерные методики расчета конструктивных характеристик взрывных устройств, реализующих соответствующие взрывные технологии, и расчета взрывных камер на прочность. В последней части учебника рассказывается о применении мирных ядерных взрывов с целью решения научных и промышленных задач.

Учебник написан на основе материалов лекций по учебным дисциплинам, объединенным под общим названием «Взрывные технологии», которые авторы в течение многих лет читают студентам МГТУ им. Н.Э. Баумана и Саровского государственного физико-технического института.

Для студентов технических университетов и машиностроительных вузов. Может быть полезен аспирантам вузов и инженерно-техническим работникам, занимающимся разработкой и применением взрывных технологий.

### 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; <https://bmstu.press>