

УДК 678.4.043

doi: 10.18698/0536-1044-2023-6-58-65

Совершенствование аппаратурно-технологического оформления производства высокопористого углеродного материала

И.Н. Шубин¹, А.А. Попова²

¹ ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

² АО «ПРОГРЕСС»

Improving hardware and technological design of the highly porous carbon material production

I.N. Shubin¹, A.A. Popova²

¹ Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education Tambov State Technical University

² PROGRESS JSC

Рассмотрен процесс производства высокопористого углеродного материала. На основе результатов анализа химических особенностей такого производства и экспериментальных исследований выделены направления совершенствования технологического процесса и оборудования, повышающие производительность и безопасность рабочего процесса. Этого можно достигнуть интенсификацией химических реакций, протекающих в реакторе активации путем оптимизации режимных параметров, применением рациональных конструкций оборудования, оптимизирующих движение (подвод, отвод и смешивание) материальных потоков, а также использованием технических решений, повышающих безопасность производства, разделяя или выделяя часть продуктов, образующихся в результате активации. Указанные направления позволят упростить и интенсифицировать рабочий процесс и используемое оборудование, например, путем совмещения некоторых операций. По итогам проведенных исследований и анализа литературных источников предложены конструктивные и технологические мероприятия, реализующие указанные направления совершенствования оборудования и технологии.

Ключевые слова: высокопористый углеродный материал, аппаратурно-технологическое оформление производства, совершенствование оборудования и технологии, реактор активации

The paper considers production process of the highly porous carbon material. Based on the results of the analysis of such production chemical characteristics and experimental studies, areas for improving the technological process and equipment were identified that could increase productivity and safety of the work process. This could be achieved by intensifying the chemical reactions in the activation reactor by optimizing the regime parameters, using the rational equipment designs that optimize the motion (supply, removal and mixing) of the material flows, as well as by introducing technical solutions that increase production safety by separating or dividing part of the products resulting from the activation. These approaches would make it possible to simplify and intensify the work process and the equipment used, for example, by combining certain operations. Based on the results of the research, as well as on the analysis of the literary sources, design and technological measures are proposed to implement the indicated approaches for improving equipment and technology.

Keywords: highly porous carbon material, production hardware and technological design, equipment and technology improvement, activation reactor

Высокопористые углеродные материалы (ВУМ), обладающие высокой удельной поверхностью (более 2000 м²/г) и объемом пор, превышающим 1 см³/г, получили широкое распространение во многих отраслях промышленности (химической, медицинской, энергетической, радиоэлектронной и др.). Благодаря универсальности и эффективности ВУМ применяют в различных процессах разделения и накопления. Особенно это касается материалов, сочетающих значительную удельную поверхность и объем пор с их размерами, находящимися в нанодиапазоне [1, 2].

Производство этих материалов — сложный многоэтапный химический процесс, заключающийся в активации предварительно карбонизированного углеродного сырья разными жидко- или газофазными реагентами (водяным паром, кислотами или щелочами), что позволяет получить значительную удельную поверхность и высокопористую наноразмерную структуру [3–5].

Анализ результатов предварительно проведенных исследований и литературных источников показал, что указанные параметры ВУМ, зависят в первую очередь от режимов активации (соотношения активируемых компонентов, продолжительности процесса, температуры и режима обмена газов), а также от исходного углеродного сырья, применяемого для получения углеродсодержащих веществ (карбонизатов) и активатора [6–9].

В подобных исследованиях особое внимание уделено подбору и изучению исходного состава активируемого материала — сырья и активатора, отработке отдельных технологических режимов и диагностике характеристик, получаемых материалов, а работы носят явный исследовательский характер и проводятся в лабораторных условиях. Несмотря на актуальность таких исследований, практически не рассматриваются вопросы технологии, разработки и совершенствования оборудования для их реализации на промышленном уровне [10–13].

Во многих работах изложены общие вопросы проектирования технологического оборудования, основанные на классических подходах и рекомендациях, которые, не всегда учитывают особенности процесса получения ВУМ, либо предложены готовые конструктивные решения и технологии, реализация которых возможна в строго ограниченных граничных условиях рабочего процесса [14–20].

Другие публикации посвящены математическому моделированию сложных химических процессов. Однако их недостатком является большое количество допущений, сильно ограничивающее применимость результатов на практике [21, 22].

Некоторые авторы [23, 24] рассматривают проектирование сложных химических процессов с точки зрения структуризации, попытки установления иерархии протекающих процессов и применяемого оборудования, последовательности выполняемых операций, что носит рекомендательный или жестко привязанный к определенным условиям характер.

Таким образом, известные работы не дают ответа на вопросы, возникающие при реальном аппаратно-технологическом оформлении процесса получения ВУМ: насколько рационально построен технологический процесс при переходе от лабораторных исследований к промышленному производству, какие стадии производства и оборудование являются основными.

Цель исследования — разработка технологической схемы, реализующей технологию получения ВУМ, позволяющей решать задачи по совершенствованию существующих и разработке новых оборудования и технологии с учетом особенностей протекающих процессов.

Объекты и методы исследования. В общем виде процесс производства ВУМ представляет собой ступенчатую термическую обработку реакционной смеси — предкарбонизированного углеродного сырья с активатором — в инертной среде в диапазоне температуры 400...900 °С в течение 2...3 ч. В процессе термообработки в реакционной смеси протекают многочисленные химические реакции с выделением газообразных продуктов, обеспечивающие образование высокопористой структуры активируемого материала.

Предварительные исследования этого процесса позволили определить рациональные режимные параметры, при которых получают высокопористый углеродный материал [25]: исходное углеродное сырье для карбонизата — смесь декстрина и оксида графена; активатор — гидроксид калия (KOH), соотношение компонентов реакционной смеси карбонизата с KOH — 1:3; температурный диапазон активации — 400...750 °С, продолжительность основной стадии — 2 ч; расход инертного газа (аргона) — 1,3 л/мин.

Результаты исследования и их обсуждение.

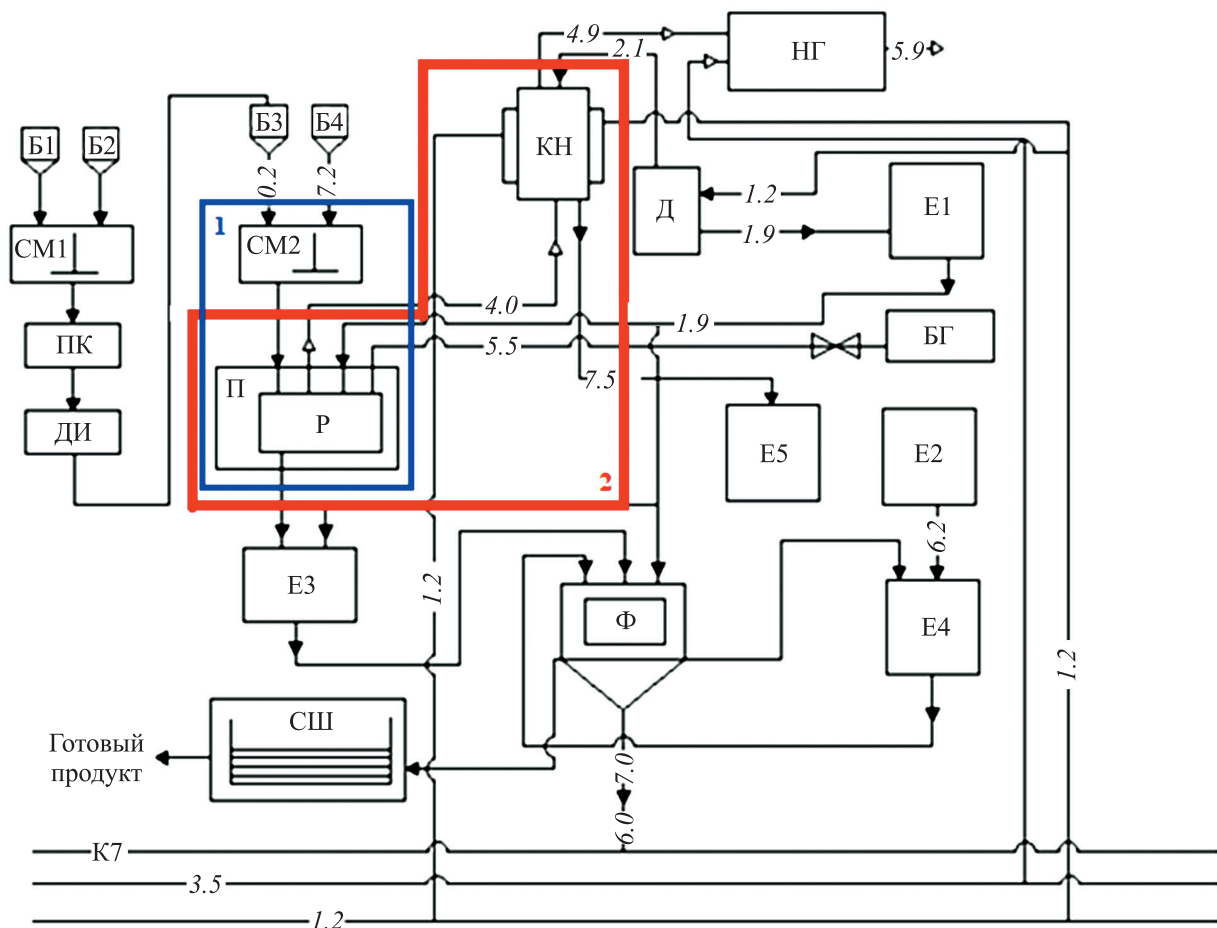
Проведенные исследования позволили предложить новые конструкции реакторов активации, учитывающие замечания, возникшие при лабораторных исследованиях и опытной эксплуатации подобной технологической схемы [26, 27]. На рисунке приведена усовершенствованная технологическая схема производства ВУМ с различными вариантами реализации нового оборудования: совмещения второго смесителя СМ2 и реактора активации Р в блоке 1 или реактора активации Р и конденсатор-нейтрализатора КН в блоке 2.

Исходные материалы — декстрин и оксид графена из бункеров Б1 и Б2 подаются в заданном соотношении в первый смеситель СМ1, где происходит их смешивание для взаимного распределения компонентов. Полученная смесь поступает в печь ПК для карбонизации, после

чего — на размол в диспергатор (измельчитель) ДИ. Полученный карбонизат перемещается в бункер Б3, а оттуда вместе с гидроксидом калия из бункера Б4 (в заданном соотношении) — во второй смеситель СМ2, после чего перегружается в реактор активации Р, установленный в печи П.

С началом технологического процесса высокотемпературной активации в закрытый реактор поступает аргон из баллонов БГ. Опционально на соответствующем этапе активации в объем реактора можно подавать дистиллированную воду в виде пара из емкости Е1, наполнение которой обеспечивает дистиллятор Д.

По завершению процесса активации углеродный активированный материал загружается в накопительную емкость Е3 для отстаивания и растворения примесей (преимущественно различных соединений калия), после чего подается



Усовершенствованная технологическая схема производства ВУМ с разными вариантами использования новых реакторов активации:

0.2 — карбонизат; 1.2 — вода техническая; 1.9 — вода дистиллированная; 2.1 — пар низкого давления; 3.5 — воздух сжатый; 4.0 и 4.9 — отработанные и обработанные реакционные газы; 5.5 — аргон; 5.9 — нейтрализованные негорючие газы; 6.0 — отработанные кислоты и кислые стоки; 6.2 — соляная кислота; 7.0 — отработанные щелочи и щелочные стоки; 7.2 — гидроксид калия; 7.5 — неорганические щелочи и растворы; К7 — химически загрязненная вода

в фильтр Ф, где промывается до нейтрального РН дистиллированной водой из емкости Е1. Промытый материал поступает в накопительную емкость Е4 для заливки и замачивания соляной кислотой из емкости Е2 для растворения примесей (преимущественно железа).

По завершению этого этапа кислая суспензия поступает в фильтр Ф для отмывки до нейтрального РН, после чего промытый материал помещается в сушильный шкаф СШ для сушки и последующей упаковки. Продукты промывки — щелочные/кислотные стоки — поступают на утилизацию или (при достаточных объемах производства) на регенерацию.

Отработанные реакционные газы, содержащие в значительном объеме пары металлического калия, проходят в конденсатор-нейтрализатор КН, где охлаждаются и нейтрализуются паром низкого давления из дистиллятора Д [28]. После чего поступают в виде охлажденных газов в нейтрализатор газов НГ, где смешиваются, разбавляются и окончательно охлаждаются магистральным сжатым воздухом и выбрасываются в атмосферу.

Конденсат в виде раствора щелочи из конденсатора-нейтрализатора КН поступает в емкость Е5 для повторного использования. Дистиллятор Д запитывается магистральной технической водой, которая охлаждает и конденсатор-нейтрализатор КН.

В результате внедрения предложенных конструктивных и технологических усовершенствований появляется возможность получения более предсказуемых результатов и стабильности свойств ВУМ, упрощения технологии, а также сокращения используемого оборудования — в разных вариантах реализации (с бло-

ком 1 или 2), что, несомненно, положительно скажется на возможности промышленной реализации данного процесса.

Кроме того, повторное использование выделенного гидроксида калия повысит экономическую эффективность процесса и привлекательность по сравнению с подобными технологиями.

Выводы

1. При разработке и совершенствовании технологической схемы производства ВУМ на основе проведенных исследований предложены конструктивные и технологические мероприятия в виде новых реакторов активации, позволяющие за счет оптимизации оборудования совместить некоторые процессы:

- в первом предлагаемом блоке выполнение смешивания исходных реакционных компонентов (карбонизата и щелочи) непосредственно в реакторе активации позволит исключить из технологической схемы второй смеситель и совместить процессы смешивания и активации;
- во втором блоке наличие у реактора активации камеры нейтрализации приведет к отказу от отдельной камеры конденсатора-нейтрализатора; это обеспечит совмещение процессов активации углеродного материала и последующей нейтрализации отработанных реакционных газов в одном реакторе, что также значительно сократит и упростит трубопроводную обвязку оборудования в технологической схеме.

2. Указанные мероприятия упростят технологию производства активированного углеродного материала, что положительно скажется на целесообразности практической реализации предлагаемых решений.

Литература

- [1] Мищенко С.В., Ткачев А.Г. *Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение*. Москва, Машиностроение, 2008. 320 с.
- [2] Фенелонов В.Б. *Пористый углерод*. Новосибирск, Институт катализа СО РАН, 1995. 513 с.
- [3] Popova A.A., Aliev R.E., Shubin I.N. Features of nanoporous carbon material synthesis. *Advanced Materials and Technologies*, 2020, no. 3, pp. 28–32.
- [4] Ткачев А.Г., Мележик А.В., Соломахо Г.В. *Способ получения мезопористого углерода*. Патент РФ 2620404. Заявл. 26.01.2016, опублик. 25.05.2017.
- [5] Дьячкова Т.П., Ткачев А.Г. *Методы функционализации и модифицирования углеродных нанотрубок*. Москва, Спектр, 2013. 152 с.
- [6] 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, опублик. 18.11.2020.

- [7] 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:10.17277/jamt. 2023.01. pp. 041-048.
- [8] Benaddi H., Badosz 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)
- [9] 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.
- [10] 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>
- [11] 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>
- [12] 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>
- [13] 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)
- [14] Хейфец М.Л. Проектирование комплексов технологического оборудования для аддитивного и субтрактивного производства. *Наукоемкие технологии в машиностроении*, 2020, № 11, с. 40–48, doi: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-11-40-48>
- [15] Русецкий А.М., ред. *Теоретические основы проектирования технологических комплексов*. Минск, Беларусь. наука, 2012. 239 с.
- [16] Чижик С.А., Хейфец М.Л., Филатов С.А. Перспективы развития технологических комплексов аддитивного синтеза композиционных материалов и формообразования изделий. *Механика машин, механизмов и материалов*, 2014, № 4, с. 68–74.
- [17] 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.
- [18] Рухов А.В., Таров Д.В., Дьячкова Т.П. и др. Методика проектирования аппаратурного 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>
- [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] Kookos K., Perkins J.D. Regulatory control structure selection of linear systems. *Comput. Chem. Eng.*, 2002, vol. 26, no. 6, pp. 875–887, [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(02\)00013-3](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(02)00013-3)
- [22] Borisenko A.B., Karpushkin S.V. Hierarchy of processing equipment configuration design problems for multiproduct chemical plants. *J. Comput. Syst. Sci. Int.*, 2014, vol. 53, no. 3, pp. 410–419, doi: <https://doi.org/10.1134/S1064230714030046>
- [23] Lopez-Arevalo I., Banares-Alcantara R., Aldea A. et al. A hierarchical approach for the redesign of chemical processes. *Knowl. Inf. Syst.*, 2007, vol. 12, no. 2, pp. 169–201, doi: <https://doi.org/10.1007/s10115-006-0060-4>
- [24] Zhou Y.M. Designing for complexity: using divisions and hierarchy to manage complex tasks. *Organ. Sci.*, vol. 24, no. 2, pp. 339–355, doi: <https://doi.org/10.1287/orsc.1120.0744>

- [25] Попова А.А., Шубин И.Н., Гусейнов М.К. Особенности получения высокопористого углеродного материала. *Вестник ДГУ. Серия 1. Естественные науки*, 2021, т. 36, № 4, с. 7–12, doi: <https://doi.org/10.21779/2542-0321-2021-36-4-7-12>
- [26] Ткачев А.Г., Мележик А.В., Шубин И.Н. и др. *Реактор для активации углеродного материала*. Патент РФ 2768123. Заявл. 09.04.2021, опубл. 23.03.2022.
- [27] Ткачев А.Г., Попова А.А., Шубин И.Н. *Реактор для активации микро- и мезопористого углеродного материала*. Патент РФ 2768879 Заявл. 09.04.2021, опубл. 25.03.2022.
- [28] Попова А.А., Шубин И.Н. Анализ влияния режимных параметров процесса высокотемпературной химической активации на конструкционный материал оборудования. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 8, с. 24–32, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-8-24-32>

References

- [1] Mishchenko S.V., Tkachev A.G. *Uglerodnye nanomaterialy. Proizvodstvo, svoystva, primeneniye* [Carbon nanomaterials. Production, properties, application]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 320 p. (In Russ.).
- [2] Fenelonov V.B. *Poristyy uglerod* [Porous carbon]. Novosibirsk, Institut kataliza SO RAN Publ., 1995. 513 p. (In Russ.).
- [3] Popova A.A., Aliev R.E., Shubin I.N. Features of nanoporous carbon material synthesis. *Advanced Materials and Technologies*, 2020, no. 3, pp. 28–32.
- [4] Tkachev A.G., Melezhik A.V., Solomakho G.V. *Sposob polucheniya mezoporistogo ugleroda* [Method of obtaining mesoporous carbon]. Patent RU 2620404. Appl. 26.01.2016, publ. 25.05.2017. (In Russ.).
- [5] Dyachkova T.P., Tkachev A.G. *Metody funktsionalizatsii i modifitsirovaniya uglerodnykh nanotrubok* [Methods for functionalization and modification of carbon nanotubes]. Moscow, Spektr Publ., 2013. 152 p. (In Russ.).
- [6] Tkachev A.G., Memetov N.R., Kucherova A.E. et al. *Formovanny nanostrukturirovanny mikroporistyy 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.).
- [7] 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:10.17277/jamt. 2023.01. pp. 041-048.
- [8] Benaddi H., Badosz 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)
- [9] 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 federalnogo universiteta. Ser. Khimiya* [Journal of Siberian Federal University. Chemistry], 2014, vol. 7, no. 1, pp. 42–53. (In Russ.).
- [10] 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>
- [11] 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>
- [12] 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>
- [13] 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)
- [14] Kheyfets M.L. Design of technological equipment complex for additive and subtractive production. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science Intensive Technologies

- in Mechanical Engineering], 2020, no. 11, pp. 40–48, doi: <https://doi.org/10.30987/2223-4608-2020-11-40-48> (in Russ.).
- [15] Rusetskiy A.M., ed. *Teoreticheskie osnovy proektirovaniya tekhnologicheskikh kompleksov* [Theoretical fundamentals of technological complex designing]. Minsk, Belarus. navuka Publ., 2012. 239 p. (In Russ.).
- [16] Chizhik S.A., Kheyfets M.L., Filatov S.A. Prospects for the development of technological systems of composite materials additive synthesis and products shaping. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials], 2014, no. 4, pp. 68–74. (In Russ.).
- [17] 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.).
- [18] Rukhov A.V., Tarov D.V., Dyachkova 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.).
- [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] Kookos K., Perkins J.D. Regulatory control structure selection of linear systems. *Comput. Chem. Eng.*, 2002, vol. 26, no. 6, pp. 875–887, [https://doi.org/10.1016/S0098-1354\(02\)00013-3](https://doi.org/10.1016/S0098-1354(02)00013-3)
- [22] Borisenko A.B., Karpushkin S.V. Hierarchy of processing equipment configuration design problems for multiproduct chemical plants. *J. Comput. Syst. Sci. Int.*, 2014, vol. 53, no. 3, pp. 410–419, doi: <https://doi.org/10.1134/S1064230714030046>
- [23] Lopez-Arevalo I., Banares-Alcantara R., Aldea A. et al. A hierarchical approach for the redesign of chemical processes. *Knowl. Inf. Syst.*, 2007, vol. 12, no. 2, pp. 169–201, doi: <https://doi.org/10.1007/s10115-006-0060-4>
- [24] Zhou Y.M. Designing for complexity: using divisions and hierarchy to manage complex tasks. *Organ. Sci.*, vol. 24, no. 2, pp. 339–355, doi: <https://doi.org/10.1287/orsc.1120.0744>
- [25] Popova A.A., Shubin I.N., Guseynov M.K. Features of the technology for producing nanoporous carbon material. *Vestnik DGU. Seriya 1. Estestvennyye nauki* [Herald of Dagestan State University. Series 1. Natural Sciences], 2021, vol. 36, no. 4, pp. 7–12, doi: <https://doi.org/10.21779/2542-0321-2021-36-4-7-12> (in Russ.).
- [26] Tkachev A.G., Melezhik A.V., Shubin I.N. et al. *Reaktor dlya aktivatsii uglerodnogo materiala* [Carbon material activation reactor]. Patent RU 2768123. Appl. 09.04.2021, publ. 23.03.2022. (In Russ.).
- [27] Tkachev A.G., Popova A.A., Shubin I.N. *Reaktor dlya aktivatsii mikro- i mezoporistogo uglerodnogo materiala* [Reactor for activating a micro- and mesoporous carbon material]. Patent RU 2768879 Appl. 09.04.2021, publ. 25.03.2022. (In Russ.).
- [28] Popova A.A., Shubin I.N. Analysis of the effect of regime parameters of high-temperature chemical activation process on the structural material of the equipment. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2022, no. 8, pp. 24–32, doi: <https://doi.org/10.18698/0536-1044-2022-8-24-32> (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 16.12.2022

Информация об авторах

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).

ПОПОВА Алена Алексеевна — кандидат технических наук, специалист по корпоративной социальной ответственности департамента по корпоративным коммуникациям. АО «ПРОГРЕСС» (550000, Липецк, Российская Федерация, ул. Ангарская, д. 2, e-mail: alyona.popova.93@list.ru).

Information about the authors

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).

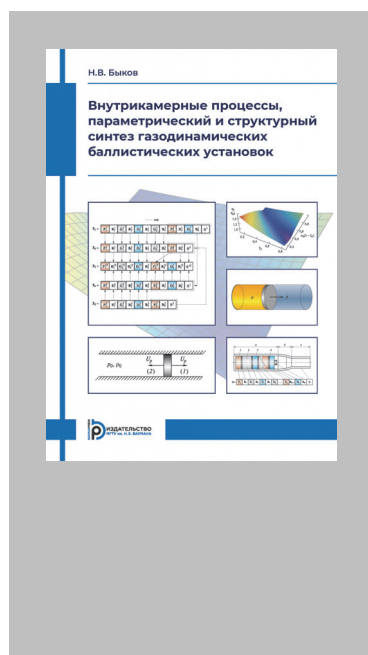
POPOVA Alena Alekseevna — Candidate of Science (Eng.), Corporate Social Responsibility Specialist of the Corporate Communications Department of PROGRESS JSC (550000, Lipetsk, Russian Federation, Angarskaya St., Bldg. 2, e-mail: alyona.popova.93@list.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

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: 10.18698/0536-1044-2023-6-58-65

Please cite this article in English as:

Shubin I.N., Popova A.A. Improving hardware and technological design of the highly porous carbon material production. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2023, no. 6, pp. 58–65, doi: 10.18698/0536-1044-2023-6-58-65



Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям монографию Н.В. Быкова «Внутрикамерные процессы, параметрический и структурный синтез газодинамических баллистических установок»

Рассмотрены методы математического и численного моделирования внутрикамерных процессов в лабораторных газодинамических баллистических установках (на сжатом газе, на смеси химически реагирующих газов, пороховых, с гидродинамическим эффектом), а также методы их параметрического (задача баллистического проектирования) и структурно-параметрического синтеза.

Для научных работников и инженеров, также может быть полезна студентам старших курсов и аспирантам.

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>