

УДК 661.183.2: 628.513

# Структурно-иерархическая схема процесса компактирования активированного углеродного материала

**И.Н. Шубин**

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет»

## Structural hierarchical scheme of the activated carbon material compaction process

**I.N. Shubin**

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

Показана актуальность исследований в области разработки и применения активированных углеродных материалов. Предложена структурно-иерархическая схема, реализующая технологию компактирования активированных углеродных материалов с различными связующими, основанная на функционально-иерархическом подходе. Рассмотрены основные этапы и стадии, технологические режимы и оборудование аппаратурно-технологического оформления процесса компактирования. Установлены ключевые уровни этого процесса, позволяющие повысить производительность и эффективность технологии компактирования активированного углеродного материала.

**EDN:** AENQWR, <https://elibrary/aenqwr>

**Ключевые слова:** процесс компактирования, активированный углеродный материал, структурно-иерархическая, технологический процесс, уровень декомпозиции, функционально-иерархический подход

The paper demonstrates relevance of the research in development and application of the activated carbon materials. It proposes a structural hierarchical scheme that implements technology of the activated carbon materials compaction with various binders based on the functional hierarchical approach. The paper considers main stages, phases, technological modes and equipment in the hardware and technological execution of the compaction process. It establishes key levels of this process making it possible to increase productivity and efficiency of the activated carbon material compaction technology.

**EDN:** AENQWR, <https://elibrary/aenqwr>

**Keywords:** compaction process, activated carbon material, structural hierarchical, technological process, decomposition level, functional hierarchical approach

Благодаря высоким характеристикам (удельной поверхности 2000...3000 м<sup>2</sup>/г и пористости более 1 см<sup>3</sup>/г) активированные углеродные материалы (АУМ) относятся к активно развивающемуся классу функциональных материалов. Это делает их востребованными и перспективными в энергетике и радиоэлектронике, химической и других отраслях промышленности для использования в качестве сорбционных мате-

риалов, конденсаторов, топливных ячеек, наполнителей композитов и т. д. [1, 2].

Технология получения АУМ является многоэтапным процессом, заключающимся в обработке карбонизированного углеродного сырья активаторами разного рода: паром, кислотой, щелочью и др. В результате получают углеродный материал, имеющий значительную удельную поверхность и высокую пористость [3–5].

В то же время на характеристики готового материала оказывает влияние как процесс активации (его технологические параметры, исходные материалы и их соотношение), так и технологические операции, в частности компактирование (продолжительность, давление и температура процесса, вид и количество связующего и др.) или функционализация [6–9].

В некоторых публикациях авторы уделяют особое внимание подбору и исследованию исходного состава активируемого материала, разработке отдельных технологических режимов и вопросам диагностики. Несмотря на перспективность таких углеродных материалов лишь в малой части работ рассмотрены вопросы выхода технологии их получения на промышленный уровень и совершенствования оборудования [10–13].

Многие исследования посвящены проектированию технологических процессов и оборудования на основе классических подходов и рекомендаций, которые не всегда и не в полной мере учитывают особенности получения и применения АУМ [14–20].

При разработке технологических процессов получило широкое распространение математическое моделирование с допущениями, сильно ограничивающими применение результатов при переходе к практической реализации [21, 22].

Жесткие граничные условия реализации технологических процессов ограничивают использование готовых технологий и конструктивных решений, предлагаемых в публикациях [23, 24].

Во многих работах авторы анализируют иерархию сложных технологических процессов, технологий и оборудования, однако они, как правило, носят рекомендательный или привязанный к определенным условиям характер [25, 26].

В связи с этим известные работы не всегда и не в полной мере отвечают на практические вопросы, возникающие при аппаратно-технологическом оформлении таких процессов, как активация или компактирование АУМ. Например, насколько рационально построен процесс, какие этапы или стадии производства, и применяемое оборудование являются ключевыми, как и учитываются ли вообще особенности используемых материалов, связующих и их применение [14, 27].

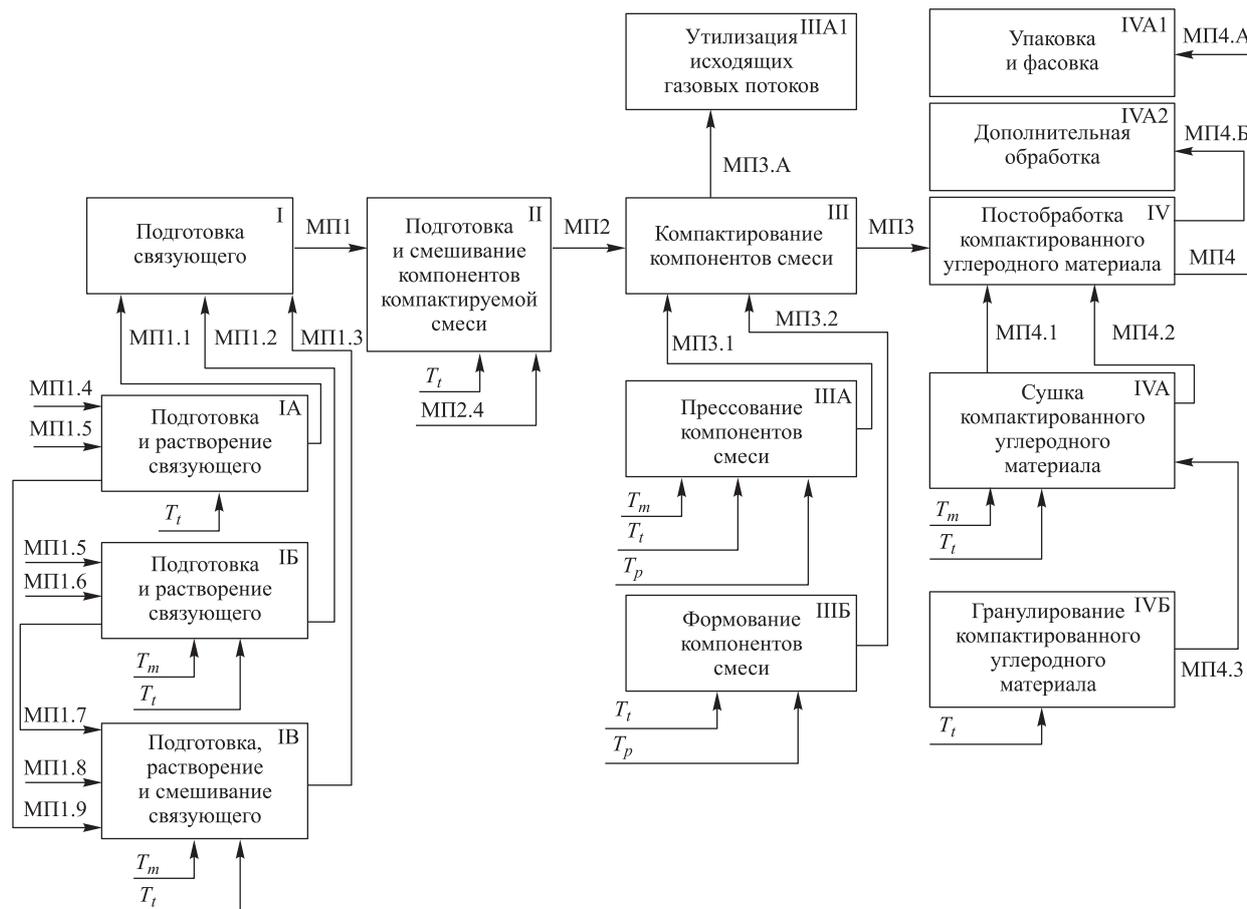
Цель статьи — разработка структурно-иерархической схемы взаимодействия оборудования и материальных потоков, реализующей технологию компактирования АУМ с различными связующими.

**Объекты и методы исследования.** В рассматриваемом процессе получения формованных образцов путем компактирования АУМ со связующим в качестве последнего выступали поливиниловый спирт (ПВС), поливинилацетат (ПВА) и базальтовое волокно (БВ). Компактирование включало в себя ступенчатый нагрев при температуре  $T_t = 75 \dots 190$  °С, пресование под давлением  $T_p = 1,5 \dots 7,5$  кН, выдержку в течение  $T_m = 3 \dots 210$  мин, охлаждение и сушку [27].

**Результаты исследования и их обсуждение.** На основе функционально-иерархического подхода предложена структурно-иерархическая схема, реализующая технологию получения компактированного АУМ, приведенная на рисунке. Здесь введены следующие обозначения: I–IV — уровни процесса; IA, IB, IB, IA, IIIA, IIIB, IVA, IVB — этапы процесса; IIIA1, IVA1, IVA2 — отдельные стадии процесса; МП1–МП4 — основные материальные потоки; МП1.1–МП1.9, МП2.4, МП3.1, МП3.2, МП4.1–МП4.3 — вспомогательные материальные потоки; МП3.A, МП4.A, МП4.B — дополнительные материальные потоки; МП1.1–МП1.3 — готовые к использованию связующие компоненты компактируемой смеси (в зависимости от исходного связующего); МП1.4 — ПВА; МП1.5 — вода; МП1.6 — ПВС; МП1.7 и МП1.9 — растворы ПВС и ПВА; МП1.8 — БВ; МП2.4, — АУМ; МП3.1 — прессованные блочки; МП3.2 — формованные черенки или круглый гранулят; МП3.A — исходящие при пресовании и выдержке газы; МП4.1 — сушка прессованных блочков; МП4.2 — сушка гранулята или предварительное гранулирование (МП4.3) и последующая сушка; МП4.A — компактированный АУМ (товарная форма); МП4.B — компактированный АУМ для дополнительной обработки.

Технология компактирования АУМ состоит из нескольких уровней с соответствующей декомпозицией.

**Первый уровень — подготовка связующего** может включать в себя следующие этапы (в зависимости от исходного связующего — ПВА, ПВС, БВ):



Структурно-иерархическая схема процесса компактирования АУМ

- *подготовку и растворение связующего* — приготовление раствора ПВА или ПВС;

- *подготовку, растворение и смешивание связующего* — при использовании в качестве связующего БВ; на этом этапе возможны варианты применения комбинированного связующего — БВ+ПВА или БВ+ПВС.

Для реализации этого уровня используют соответствующие технологические процессы (смешивание и растворение) и типовое оборудование (емкости, бункеры, смесители и т. д.). Причем каждый из этапов и его особенности (продолжительность процесса, температура и др.) зависят главным образом от исходных свойств материалов.

На этом уровне возможно проведение дополнительных стадий обработки с исходными компонентами (измельчение, просеивание, ультразвуковая обработка и т. д.), необходимых, как правило, для повышения удобства работы с материалами, но не являющихся обязательными (на рисунке не показаны).

После первого уровня основным материальным потоком является готовый к дальнейшему

применению компонент компактируемой смеси — связующее.

**Второй уровень — подготовка и смешивание компонентов компактируемой смеси.**

Смесь для компактирования готовят в заданном соотношении из полученного ранее АУМ (на рисунке не показан) и связующего, созданного на предыдущем уровне. Основной режимный параметр — продолжительность процесса  $T_m$ . Применяют типовые технологический процесс (смешивание) и оборудование (смеситель-диспергатор).

**Третий уровень — компактирование компонентов смеси** — основной для рассматриваемого технологического процесса компактирования — зависит напрямую от второго (по связующему) и привлекаемых технологических режимов и потоков. Он включает в себя следующие этапы:

- *прессование компонентов смеси* — процесс, управляемый по технологическим режимным параметрам (температуре, продолжительности и давлению), которые определяют параметры готового компактированного АУМ (его каче-

ство, т. е. соответствие предъявляемым требованиям по характеристикам); прессование происходит в обогреваемой пресс-форме; на этом этапе возможно появление *дополнительной стадии процесса компактирования — утилизации исходящих газовых потоков*; для ее осуществления можно использовать как типовые технологии и оборудование, так и специально разработанные (в зависимости от связующего и условий промышленной реализации, объемов производства);

- *формование компонентов смеси* — в зависимости от применяемого связующего и требований по форме товарного вида образцов может применяться обогреваемый червячный смеситель с фильерой; этот этап напрямую зависит от таких технологических режимов, как  $T_t$  и  $T_p$ .

Основной материальный поток на данном уровне — компактированный АУМ.

**Четвертый уровень — постобработка компактированного АУМ** может включать в себя несколько этапов (в зависимости от реализуемых технологий на предыдущем уровне):

- *сушку компактированного АУМ* для постепенного охлаждения и удаления остатков влаги с использованием типовых технологий и оборудования;

- *гранулирование и сушку компактированного АУМ* с применением типовых технологий и оборудования.

На этих этапах ключевыми технологическими режимными параметрами являются  $T_m$  и  $T_t$ .

Четвертый уровень предполагает наличие отдельных стадий, связанных с обработкой полученных образцов компактированного АУМ. Он может заканчиваться упаковкой и фасовкой блочков или гранулята, либо дополнительной обработкой для придания определенных свойств, заданных заказчиками.

Анализ структурно-иерархической схемы, реализующей технологию получения компактированного АУМ, и ее сопоставление с результатами экспериментальных исследований, позволяет заключить следующее:

- первый уровень рассматриваемого процесса влияет на его технологию в целом и (в меньшей степени) на характеристики компактированного АУМ; наряду с применением типовых технологий и оборудования этот уровень отличается разнообразное аппаратно-технологическое оформление, что можно объяснить различными исходными характеристиками связу-

ющих и методиками их подготовки для дальнейшего применения;

- второй уровень базируется на классических подходах к приготовлению многокомпонентных смесей и, будучи критическим для характеристик получаемого продукта (по соотношению компонентов компактируемой смеси), можно считать типовым;

- третий уровень является основным как по выбору конечной технологии и оборудованию, так и по влиянию на характеристики готового продукта; этот уровень отличается факторами (и их вариативностью) в первую очередь технологического характера, влияющими на процесс компактирования и АУМ (предполагает индивидуальную настройку аппаратно-технологического оформления процесса компактирования по режимным параметрам  $T_m$ ,  $T_t$  и  $T_p$ ); этап включает в себя стадию утилизации исходящих газов;

- четвертый уровень основан на использовании стандартных подходов (сушки, гранулирования и т. д.) и типового оборудования для обеспечения полученных параметров компактированного АУМ; при необходимости получения специфических характеристик компактированного АУМ возможна дополнительная обработка — функционализация, что может потребовать привлечения специально разработанных технологий и оборудования.

Основываясь на результатах анализа структурно-иерархической схемы, можно отметить ключевые уровни рассматриваемого процесса (по влиянию на конечные характеристики получаемого компактированного АУМ) — первый и третий, а также направления дальнейших исследований, которые смогут базироваться на разработанной схеме, т. е. на оптимизации аппаратно-технологического оформления процесса компактирования, отработке отдельных этапов и стадий или применении других видов связующих.

## Выводы

1. По результатам исследования установлена актуальность работ, направленных на совершенствование аппаратно-технологического оформления процесса компактирования АУМ.

2. Предложена структурно-иерархическая схема, реализующая технологию компактирования АУМ с различными связующими.

3. Проанализированы и определены основные этапы и стадии уровней процесса компактирования, что позволит повысить эффективность и производительность, конкурентоспо-

собность технологии и получаемого компактированного АУМ, а также облегчит переход от лабораторных исследований к его промышленной реализации.

## Литература

- [1] Фенелонов В.Б. *Пористый углерод*. Новосибирск, Институт катализа СО РАН, 1995. 513 с.
- [2] *Актуальные физико-химические проблемы адсорбции и синтеза нанопористых материалов. Всероссийский симпозиум с международным участием, посвященный памяти чл.-корр. РАН В.А. Авраменко. Сборник трудов симпозиума*. Москва, ИФХЭ РАН, 2022. 274 с.
- [3] Popova A.A., Aliev R.E., Shubin I.N. Features of nanoporous carbon material synthesis. *Adv. Mater. Technol.*, 2020, no. 3, pp. 28–32.
- [4] Шубин И.Н., Попова А.А. Исследование технологических параметров активации, влияющих на характеристики нанопористого углеродного материала. *Материаловедение*, 2022, № 11, с. 3–8.
- [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, опубл. 18.11.2020.
- [7] Попова А.А., Гусейнов М.К., Шубин И.Н. Особенности технологии получения нанопористого углеродного материала. *Вестник Дагестанского государственного университета. Сер. 1. Естественные науки*, 2021, т. 36, № 4, с. 7–12, doi: <https://doi.org/10.21779/2542-0321-2021-36-4-7-12>
- [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] Шубин И.Н., Попова А.А. 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] 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., 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>
- [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] Rusetsky A.M., ed. *Theoretical fundamentals of technological complex designing*. Minsk, Belorussian Science, 2012. 239 p.
- [15] 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.
- [16] Пухальский В.А. Иерархия процессов в технологии машиностроения. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2015, № 6, с. 108–113.
- [17] Рухов А.В., Таров Д.В., Дьячкова Т.П. и др. Методика проектирования аппаратного оформления производств углеродных нанотрубок и полупродуктов на их основе. *Из-*

- вестия высших учебных заведений. Химия и химическая технология, 2019, т. 62, № 3, с. 94–101, doi: <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196203.5959>
- [18] Касаткин А.Г. *Основные процессы и аппараты химической технологии*. Москва, Альянс, 2009. 451 с.
- [19] Леонтьева А.И. *Оборудование химических производств*. Москва, Колосс, 2008. 479 с.
- [20] Макаров Ю.И. *Аппараты для смешения сыпучих материалов*. Москва, Машиностроение, 1973. 215 с.
- [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] Niu J.J., Wang J.N. 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>
- [24] 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)
- [25] 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>
- [26] Zhou Y.M. Designing for complexity: using divisions and hierarchy to manage complex tasks. *Organ. Sci.*, 2012, vol. 24, no. 2, pp. 339–355, doi: <https://doi.org/10.1287/orsc.1120.0744>
- [27] Shubin I.N., Mkrtychyan E.S., Ananyeva O.A. Promising sorbents based on compacted highly porous carbon materials. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 2023, vol. 8, no. 4, pp. 270–278.

## References

- [1] Fenelonov V.B. *Poristyy uglerod* [Porous carbon]. Novosibirsk, Institut kataliza SO RAN Publ., 1995. 513 p. (In Russ.).
- [2] *Aktualnye fiziko-khimicheskie problemy adsorbtsii i sinteza nanoporistyykh materialov. Vserossiyskiy simpozium s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennyy pamyati chl.-korr. RAN V.A. Avramenko. Sbornik trudov simpoziuma* [Actual physical and chemical problems of adsorption and synthesis of nanoporous materials. All-Russian symposium with international participation, dedicated to the memory of Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences V.A. Avramenko. Proceedings]. Moscow, IFKhE RAN Publ., 2022. 274 p. (In Russ.).
- [3] Popova A.A., Aliev R.E., Shubin I.N. Features of nanoporous carbon material synthesis. *Adv. Mater. Technol.*, 2020, no. 3, pp. 28–32.
- [4] Shubin I.N., Popova A.A. Study of technological parameters of activation, effecting on characteristics of nanoporous carbon material. *Materialovedenie*, 2022, no. 11, pp. 3–8. (In Russ.).
- [5] Dyachkova T.P., Tkachev A.G. *Metody funktsionalizatsii i modifitsirovaniya uglerodnykh nanotrubok* [Methods of functionalisation 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] Popova A.A., Guseynov M.K., Shubin I.N. Features of the technology for producing nanoporous carbon material. *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser. 1. Estestvennye nauki* [Herald of Dagestan State University. Ser. 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.).

- [8] Benaddi N., 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] Shubin I.N., Popova A.A. 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] 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., 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>
- [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] Rusetsky A.M., ed. Theoretical fundamentals of technological complex designing. Minsk, Belorussian Science, 2012. 239 p.
- [15] 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.).
- [16] Pukhalskiy V.A. The hierarchy of processes in manufacturing engineering. *Fundamentalnye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology], 2015, no. 6, pp. 108–113. (In Russ.).
- [17] 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. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [CHEMTECH], 2019, vol. 62, no. 3, pp. 94–101, doi: <https://doi.org/10.6060/ivkkt.20196203.5959> (in Russ.).
- [18] Kasatkin A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow, Alyans Publ., 2009. 451 p. (In Russ.).
- [19] Leontyeva A.I. *Oborudovanie khimicheskikh proizvodstv* [Equipment of chemical productions]. Moscow, Koloss Publ., 2008. 479 p. (In Russ.).
- [20] Makarov Yu.I. *Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov* [Apparatuses for mixing of bulk materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973. 215 p. (In Russ.).
- [21] Kookos K., Perkins J.D. Regulatory control structure selection of linear systems. *Comput. Chem. Eng.*, 2002, vol. 26, no. 6, pp. 875–887, doi: [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] Niu J.J., Wang J.N. 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>
- [24] 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)
- [25] 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>
- [26] Zhou Y.M. Designing for complexity: using divisions and hierarchy to manage complex tasks. *Organ. Sci.*, 2012, vol. 24, no. 2, pp. 339–355, doi: <https://doi.org/10.1287/orsc.1120.0744>

- [27] Shubin I.N., Mkrtychyan E.S., Ananyeva O.A. Promising sorbents based on compacted highly porous carbon materials. *Journal of Advanced Materials and Technologies*, 2023, vol. 8, no. 4, pp. 270–278.

Статья поступила в редакцию 19.06.2024

## 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. Структурно-иерархическая схема процесса компактирования активированного углеродного материала. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2025, № 3, с. 69–76.

### Please cite this article in English as:

Shubin I.N. Structural hierarchical scheme of the activated carbon material compaction process. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2025, no. 3, pp. 69–76.



## Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана предлагает читателям учебник В.Д. Морозовой «Введение в анализ»

Книга является первым выпуском комплекса учебников «Математика в техническом университете», состоящего из двадцати одного выпуска. Знакомит читателя с понятиями функции, предела, непрерывности, которые являются основополагающими в математическом анализе и необходимыми на начальном этапе подготовки студента технического университета.

Отражена тесная связь классического математического анализа с разделами современной математики (прежде всего с теорией множеств и непрерывных отображений в метрических пространствах).

Содержание учебника соответствует курсу лекций, который автор читает в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов технических университетов. Может быть полезен преподавателям 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://press.bmstu.ru>