

## СТРУКТУРНО-ИЕРАРХИЧЕСКАЯ СХЕМА ПРОЦЕССА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ АКТИВАЦИИ УГЛЕРОДНОГО МАТЕРИАЛА

И. Н. Шубин<sup>1✉</sup>, А. А. Попова<sup>2</sup>

*Кафедра «Техника и технологии производства нанопродуктов» (1),  
i.shubin77@yandex.ru, ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия;  
департамент по корпоративным коммуникациям  
АО «ПРОГРЕСС» (2), Липецк, Россия*

**Ключевые слова:** активированный углеродный материал; высокотемпературная активация; декомпозиция; структурная схема; технологический процесс.

**Аннотация:** Рассмотрен процесс высокотемпературной активации углеродного материала. На основе функционально-иерархического подхода разработана структурная схема взаимодействия оборудования и материальных потоков, реализующая технологию получения высокопористого углеродного материала. Показаны особенности компоновки технологического оборудования, позволяющие решить задачу по совершенствованию имеющегося и разработке нового с учетом особенностей протекающих процессов. В результате установлена возможность повышения производительности, эффективности и безопасности реализации данного процесса, конкурентоспособности технологии и полученного активированного высокопористого углеродного материала, а также перехода от лабораторных исследований к его промышленной реализации.

---

### Введение

Высокопористые углеродные материалы (ВУМ) относятся к наиболее динамично развивающемуся классу функциональных материалов и востребованы во многих отраслях промышленности: химической, радиоэлектронной, энергетике и многих др. Обладая высокой удельной поверхностью – более 2000 м<sup>2</sup>/г, объемом пор более 1 см<sup>3</sup>/г, в сочетании с размерами, находящимися в наноразмерном диапазоне, они являются наиболее универсальными и эффективными для применения в различных сорбционных процессах [1, 2].

При производстве данных материалов осуществляется сложный многоэтапный химический процесс, заключающийся в активации различного предварительно карбонизированного углеродного сырья разными жидко- или газофазными реагентами, например, водяным паром, кислотами или щелочами, что позволяет получить значительную удельную поверхность и высокопористую наноразмерную структуру [3 – 5].

Проведенные предварительные исследования и анализ литературных источников показали, что данные параметры полученных высокопористых углеродных материалов зависят в первую очередь от режимов активации (массового соотношения активируемых компонентов в реакционной смеси, температуры и продолжительности процесса, режима газообмена и др.), а также, в меньшей степени,

от исходных компонентов, применяемых для получения углеродсодержащих веществ (карбонизатов), и вида активатора [6 – 9].

При этом особое внимание в подобных исследованиях уделяется подбору и исследованию исходного состава активируемого материала, отработке отдельных технологических режимов и диагностике, а работы носят явный исследовательский характер и проводятся в лабораторных условиях [10 – 13]. Несмотря на всю актуальность проводимых исследований, практически не рассматриваются вопросы выхода технологии на промышленный уровень и разработки нового или совершенствования имеющегося оборудования.

Во многих работах обсуждаются общие вопросы проектирования технологического оборудования, основанные на классических подходах и рекомендациях, которые, однако, не всегда учитывают особенности процесса получения ВУМ [14 – 18]. Другие работы посвящены математическому моделированию сложных химических процессов, их недостатком является большое количество допущений, что сильно ограничивает применимость результатов при переходе к практической реализации [19, 20]. В целом ряде работ предлагаются готовые конструктивные решения или технологии, реализация которых возможна в строго ограниченных граничных условиях реализуемого процесса [21, 22].

Ряд авторов рассматривает общий подход к структуризации сложных химических процессов, попытке установления иерархии протекающих процессов, применяемого оборудования, последовательности выполняемых операций, который носит или рекомендательный, или жестко привязанный к определенным условиям характер [23, 24]. В результате, известные работы не позволяют ответить на ряд практических вопросов, возникающих при аппаратно-технологическом оформлении процесса высокотемпературной активации углеродного материала, а именно насколько рационально построен процесс при переходе от лабораторных исследований к промышленному производству и какие этапы или стадии производства, и, соответственно, какое оборудование являются ключевыми.

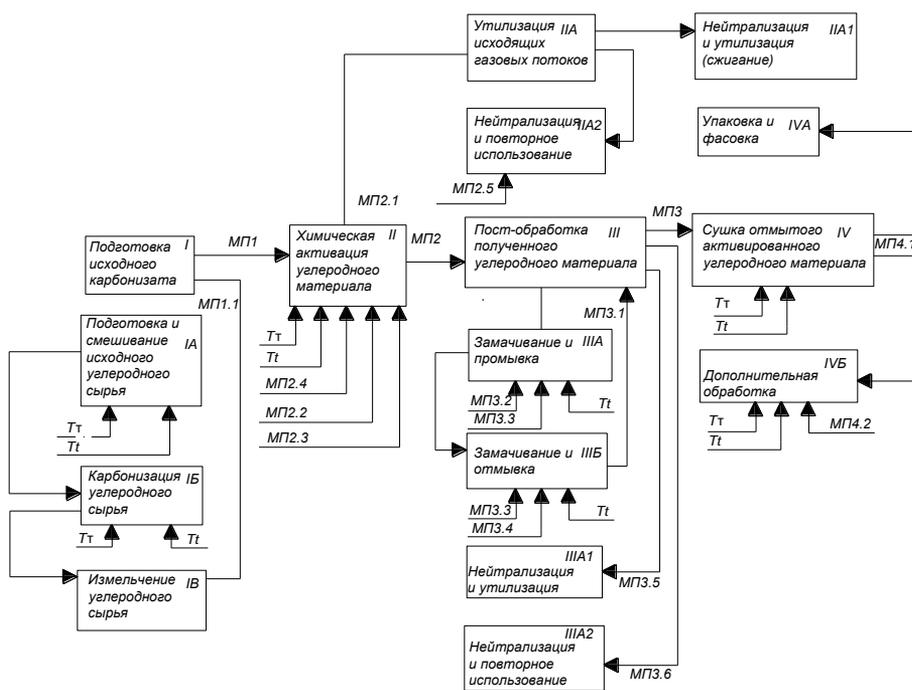
*Цель работы* – разработка структурно-иерархической схемы взаимодействия оборудования и материальных потоков, реализующей технологию получения высокопористого углеродного материала, представляющей особенности компоновки оборудования и позволяющей решить задачи по совершенствованию имеющегося и разработке нового оборудования с учетом особенностей протекающих процессов.

### **Объекты и методы исследования**

В общем виде высокотемпературная активация углеродного материала представляет собой процесс ступенчатой термической обработки и выдержки реакционной смеси – карбонизата с активатором (в заданном соотношении) в диапазоне 400...900 °С в инертной среде. В процессе термообработки реакционной смеси протекают многочисленные химические реакции, обеспечивающие образование высокопористой структуры активируемого материала. Предварительные исследования данного процесса, в результате которого получен высокопористый углеродный материал, позволили определить оптимальные режимные параметры (исходное углеродное сырье для карбонизата – смесь декстрина и оксида графена, активатор – гидроксид калия (KOH), соотношение компонентов реакционной смеси карбонизат : KOH – 1 : 3, температурный диапазон активации 400...750 °С, продолжительность основной стадии – 2 часа, расход инертного газа – 1,3 л/мин), [25].

### **Результаты исследования и их обсуждение**

На основе функционально-иерархического подхода разработана структурно-иерархическая схема взаимодействия оборудования и материальных потоков, реализующая технологию получения высокопористого углеродного материала (рис. 1).



**Рис. 1. Структурно-иерархическая схема взаимодействия оборудования и материальных потоков при реализации процесса высокотемпературной активации углеродного материала**

Технология высокотемпературной активации углеродного материала состоит из *четырёх* уровней с соответствующей декомпозицией.

Первый уровень декомпозиции (I) – *подготовка исходного карбонизата* (основной материальный поток (МП1) – включает в себя следующие этапы:

- *подготовку и смешивание исходных компонентов* (IA) – приготовление углеродного сырья (при необходимости и отдельные *стадии* – предварительную дополнительную обработку исходных компонентов – измельчение, просеивание, ультразвуковую обработку, растворение и т.д.(на схеме не показаны);
- *карбонизацию исходного сырья* (IB);
- *измельчение углеродного сырья* (полученного карбонизата) (IB).

Результатом рассмотренных этапов является вспомогательный материальный поток (МП1.1) – карбонизат.

Для этого применяются соответствующие технологические процессы и типовое оборудование: смесители, печь, диспергаторы и т.д. Причем каждый из этапов и его особенности (такие технологические режимы, как продолжительность процесса  $T_t$ , температура  $T_t$  и т.д.) зависят, прежде всего, от исходных свойств материалов.

Второй уровень (II) – *химическая активация углеродного материала* (карбонизата) – основной для рассматриваемого технологического процесса высокотемпературной активации, зависит напрямую от предыдущего (по карбонизату) и привлекаемых технологических режимов и потоков. На данном уровне протекает сложная технологическая реакция – щелочная активация карбонизата в инертной среде. Данный процесс управляем по материальным потокам: объему инертного газа (скорости прокачки) (МП2.1), соотношению активируемых компонентов (карбонизата МП1.1 и гидроксида калия КОН (МП2.3) и технологическим

режимам – ( $T_t$  и  $T_i$ ), которые напрямую определяют параметры готового углеродного материала (его качество, то есть соответствие предъявляемым требованиям по характеристикам). Опционально на этом уровне возможен еще один вспомогательный материальный поток, влияющий на процесс активации – водяной пар (МП2.4). Процесс проводится в реакторе, спроектированном в соответствии с предъявляемыми требованиями (конструктивными и технологическими), итогом которого является активированный углеродный материал (МП2).

Результатом осуществления данного уровня является этап (IIА) – *утилизация исходящих газовых потоков* (МП2.1), для реализации которого возможно проведение одной из двух *стадий*: нейтрализации и утилизации (IIА1), которые проводятся в нейтрализаторе для обеспечения безопасности, или *стадии нейтрализации и повторного использования* (IIА2) части исходящих газов (например, конденсация паров калия и нейтрализация их водой (МП2.5)) для повторного использования, для чего могут быть применены типовое оборудование и технологии.

Третий уровень (III) – *пост-обработка полученного углеродного материала*, включает в себя несколько этапов, которые проводятся с использованием известных технологий и типового оборудования:

– *замачивание и промывка* (IIIА) активированного углеродного материала с целью удаления примесей (прежде всего соединений калия), а также стадия *нейтрализации и утилизации* промывных вод. Характеризуется наличием вспомогательных материальных потоков – дистиллированной воды (МП3.2), промывной воды (МП3.3) и  $T_t$ ;

– *замачивание и отмывка* (IIIБ) активированного углеродного материала с целью удаления примесей (прежде всего соединений железа), а также этапы *нейтрализации и утилизации* промывных вод (соляная кислота HCl – (МП3.4) промывная вода (МП3.3) и  $T_t$ . С получением на выходе активированного углеродного материала заданной чистоты (МП 3.1).

На данном уровне возможно осуществление *стадий нейтрализации и утилизации* (IIIА1) или *нейтрализации и повторного использования* (IIIА2) – использованных промывной воды и кислоты (потоки МП3.5 и МП3.6). Результатом данного уровня является отмытый полученный углеродный материал (МП3).

Четвертый уровень (IV) – *сушка отмытого* (рН-нейтрального) *активированного углеродного материала* осуществляется в сушильном шкафу (технологические режимы  $T_t$  и  $T_i$ ) – стандартном оборудовании, и заканчивается этапом *упаковки и фасовки* (IVА) готового активированного углеродного материала (МП4.1) или проведением *дополнительной обработки* (IVБ) для придания ВУМ определенных свойств (функционализации) для чего возможно применение активаторов (МП 4.2), а также  $T_t$  и  $T_i$ , как основных технологических режимов.

Анализируя структурно-иерархическую схему, реализующую технологию получения активированного высокопористого углеродного материала, и сопоставляя ее с результатами экспериментальных исследований, отметим, что основным по влиянию на характеристики готового продукта будет являться второй уровень – *химическая активация карбонизата*, предусматривающий, как уникальное оборудование (реактор активации), так и целый ряд варьируемых режимных факторов. Другие же этапы и стадии будут определяться, прежде всего, гарантированным временем протекания технологических процессов и применением типового оборудования.

## Заключение

Таким образом, рассмотрев процесс высокотемпературной активации углеродного материала, разработана структурно-иерархическая схема взаимодействия оборудования и материальных потоков, реализующая технологию получения высокопористого углеродного материала. Данная схема позволила наглядно, с учетом особенностей протекающих процессов, представить особенности компо-

новки оборудования при решении задачи проектирования аппаратурно-технологического оформления процесса высокотемпературной химической активации и установить, что при совершенствовании имеющегося и разработке нового оборудования следует отталкиваться от конструкции реактора активации, конструктивных и технологических способов интенсификации протекающих в нем процессов. В результате повысить эффективность и безопасность осуществления рассматриваемого процесса, конкурентоспособность технологии и получаемого активированного высокопористого углеродного материала, а также облегчить переход от лабораторных исследований к его промышленной реализации.

#### *Список литературы*

1. Мищенко, С. В. Углеродные наноматериалы: производство свойство применение / С. В. Мищенко, А. Г. Ткачев. – М. : Машиностроение, 2008. – 320 с.
2. Фенелонов, В. Б. Пористый углерод / В. Б. Фенелонов. – Новосибирск : Институт катализа СО РАН, 1995. – 518 с.
3. Popova, A. A. Features of Nanoporous Carbon Material Synthesis / A. A. Popova, R. E. Aliev, I. N. Shubin // *Advanced Materials and Technologies*. – 2020. – No. 3(19). – P. 28 – 32. doi: 10.17277/amt.2020.03.pp.028-032
4. Пат. № 2620404 Российская Федерация, МПК C01B 31/08. Способ получения мезопористого углерода / А. Г. Ткачев, А. В. Мележик, Г. В. Соломахо ; заявитель и патентообладатель «НаноТехЦентр» ; заявл. 26.01.2016 ; опубл. 25.05.2017, Бюл. № 15. – 19 с.
5. Дьячкова, Т. П. Методы функционализации и модифицирования углеродных нанотрубок / Т. П. Дьячкова, А. Г. Ткачев. – М. : ИД «Спектр», 2013. – 152 с.
6. Пат № 2736586 Российская Федерация, МПК B01J 20/20 , B01J 20/30. Формованный наноструктурированный микропористый углеродный сорбент и способ его получения / А. Г. Ткачев, Н. Р. Меметов, А. Е. Кучерова, А. В. Мележик, А. Д. Зеленин, А. А. Попова, И. Н. Шубин ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет». – № 2019121997 ; заявл. 09.07.2019 ; опубл. 18.11.2020, Бюл. № 32. – 7 с.
7. Попова, А. А. Исследование влияния технологических параметров на аппаратурное оформление процесса производства активированного углеродного материала / А. А. Попова, И. Н. Шубин // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение и машиноведение*. – 2022. – № 1(742). – С. 20 – 30. doi: 10.18698/0536-1044-2022-1-20-30
8. Surface Functionality and Porosity of Activated Carbons Obtained from Chemical Activation of Wood / H. Benaddi, T. J. Badosz, J. Jagiello, J. A. Schwarz, J. N. Rouzard, D. Legras, F. Beguin // *Carbon*. – 2000. – Vol. 38, No. 5. – P. 669 – 674. doi:10.1016/S0008-6223(99)00134-7
9. Получение углеродных сорбентов химической модификацией ископаемых углей и растительной биомассы / Н. В. Чесноков, Н. М. Микова, И. П. Иванов, Б. Н. Кузнецов // *Журнал Сибирского федерального университета*. – 2014. – Т. 7, № 1. – С. 42 – 53.
10. Carbon-Based Supercapacitors Produced by Activation of Graphene / Y. Zhu, S. Murali, M. D. Stoller, K. J. Ganesh, W. Cai, P. J. Ferreira, A. Pirkle, R. M. Wallace, K. A. Cychosz, M. Thommes, D. Su, E. A. Stach, R. S. Ruoff // *Science*. – 2011. – Vol. 332, No. 6037. – P. 1537 – 1541. doi:10.1126/science.1200770
11. Carbon Activation with KOH as Explored by Temperature Programmed Techniques, and the Effects of Hydrogen / D. Lozano-Castello, J. M. Calo, D. Cazorla-Amoros, A. Linares-Solano // *Carbon*. – 2007. – Vol. 45, No. 13. – P. 2529 – 2536. doi: 10.1016/j.carbon.2007.08.021

12. Influence of the Activation Conditions on the Porosity Development of Herringbone Carbon Nanofibers / V. Jiménez, J. A. Díaz, P. Sánchez, J. L. Valverde, A. Romero // *Chemical Engineering Journal*. – 2009. – Vol. 155, No. 3. – P. 931 – 940. doi: 10.1016/j.cej.2009.09.035
13. Teng, H. Preparation of Porous Carbons from Phenol-Formaldehyde Resins with Chemical and Physical Activation / H. Teng, S.-C. Wang // *Carbon*. – 2000. – Vol. 38, No. 6. – P. 817 – 824. doi: 10.1016/S0008-6223(99)00160-8
14. Хейфец, М. Л. Проектирование комплексов технологического оборудования для аддитивного и субтрактивного производства / М. Л. Хейфец // *Наукоемкие технологии в машиностроении*. – 2020. – № 11(113). – С. 40 – 48. doi: 10.30987/2223-4608-2020-11-40-48
15. Теоретические основы проектирования технологических комплексов : монография / А. М. Русецкий, П. А. Витязь, М. Л. Хейфец [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2012. – 239 с.
16. Чижик, С. А. Перспективы развития технологических комплексов аддитивного синтеза композиционных материалов и формообразования изделий / С. А. Чижик, М. Л. Хейфец, С. А. Филатов // *Механика машин, механизмов и материалов*. – 2014. – № 4(29). – С. 68 – 74.
17. Пухальский, В. А. Иерархия процессов в технологии машиностроения / В. А. Пухальский // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2015. – № 6 (314). – С. 108 – 113.
18. Методика проектирования аппаратурного оформления производств углеродных нанотрубок и полупродуктов на их основе / А. В. Рухов, Д. В. Таров, Т. П. Дьячкова [и др.]. // *Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология*. – 2019 – Т. 62, № 3. – С. 94 – 101. doi: 10.6060/ivkkt.20196203.5959
19. Kookos, K. Regulatory Control Structure Selection of Linear Systems / K. Kookos, J. D. Perkins // *Computers & Chemical Engineering*. – 2002. – Vol. 26, Is. 6. – P. 875 – 887. doi: 10.1016/S0098-1354(02)00013-3
20. Borisenko, A. B. Hierarchy of Processing Equipment Configuration Design Problems for Multiproduct Chemical Plants / A. B. Borisenko, S. V. Karpushkin // *Journal of Computer and Systems Sciences International*. – 2014. – Vol. 53, No. 3. – P. 410 – 419. doi: 10.1134/S1064230714030046
21. Niu, J. J. Effect of Temperature on Chemical Activation of Carbon Nanotubes / J. J. Niu, J. N. Wang // *Solid State Sciences*. – 2008. – Vol. 10, No. 9. – P. 1189 – 1193. doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2007.12.016
22. Enhanced Capacitance of Carbon Nanotubes through Chemical Activation / E. Frackowiak, S. Delpeux, K. Jurewicz, K. Szostak, D. Cazorla-Amoros, F. Beguin // *Chemical Physics Letters*. – 2002. – Vol. 361, No. 1. – P. 35 – 41. doi: 10.1016/S0009-2614(02)00684-X
23. A Hierarchical Approach for the Redesign of Chemical Processes / I. Lopez-Arevalo, R. Banares-Alcantara, A. Aldea, A. Rodriguez-Martinez // *Knowledge and Information Systems*. – 2007. – Vol. 12, No. 2. – P. 169 – 201. doi: 10.1007/s10115-006-0060-4
24. Zhou, Y. M. Designing for Complexity: Using Divisions and Hierarchy to Manage Complex Tasks // Y. M. Zhou // *Organization Science*. – 2012. – Vol. 24, No. 2. – P. 339 – 355. doi: 10.1287/orsc.1120.0744
25. Попова, А. А. Аппаратурно-технологическое оформление производства активированного углеродного материала / А. А. Попова // *Вестник Тамбовского государственного технического университета*. – 2021. – Т. 27, № 2. – С. 318 – 327. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.318-327

# The Structural-Hierarchical Scheme of the Process of High-Temperature Activation of Carbon Material

I. N. Shubin<sup>1✉</sup>, A. A. Popova<sup>2</sup>

*Department of Equipment and Technology of Nanomaterials Manufacturing(1),  
i.shubin77@yandex.ru; TSTU, Tambov, Russia;  
Corporate Communications Department JSC "PROGRESS" (2), Lipetsk, Russia*

**Keywords:** high-temperature activation; block diagram; technological process; decomposition; activated carbon material.

**Abstract:** The paper considers the process of high-temperature activation of carbon material. On the basis of a functional-hierarchical approach, a block diagram of the interaction of equipment and material flows has been developed, which implements the technology for producing highly porous carbon material, clearly presents the features of the equipment layout and allows solving the problems of improving existing equipment and developing new equipment, taking into account the characteristics of ongoing processes, which will increase productivity, efficiency and the safety of the implementation of this process, the competitiveness of the technology and the resulting activated highly porous carbon material, and will also facilitate the transition from laboratory research to its industrial implementation.

## References

1. Mishchenko S.V., Tkachev A.G. *Uglerodnyye nanomaterialy: proizvodstvo svoystvo primeneniye* [Carbon nanomaterials: production, properties, application], Moscow: Mashinostroyeniye, 2008, 320 p. (In Russ.)
2. Felonov V.B. *Poristy uglerod* [Porous carbon], Novosibirsk: Institut kataliza SO RAN, 1995, 518 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(19), pp. 28-32. doi: 10.17277/amt.2020.03.pp.028-032
4. Tkachev A.G., Melezhik A.V., Solomakho G.V. *Sposob polucheniya mezoporistogo ugleroda* [Method for producing mesoporous carbon], Russian Federation, 2017, Pat. 2620404 (In Russ.)
5. D'yachkova T.P., Tkachev A.G. *Metody funktsionalizatsii i modifitsirovaniya uglerodnykh nanotrubok* [Methods of functionalization and modification of carbon nanotubes], Moscow: Spektr, 2013, 152 p. (In Russ.)
6. Tkachev A.G., Memetov N.R., Kucherova A.Ye., Melezhik A.V., Zelenin A.D., Popova A.A., Shubin I.N. *Formovanny nanostrukturirovanny mikroporisty uglerodny sorbent i sposob yego polucheniya* [Molded nanostructured microporous carbon sorbent and the method of its production], Russian Federation, 2020, Pat № 2736586 (In Russ.)
7. Popova A.A., Shubin I.N. [Study of the influence of technological parameters on the hardware design of the production process of activated carbon material], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroyeniye i mashinovedeniye* [News of higher educational institutions. Mechanical engineering and mechanical science], 2022, no. 1(742), pp. 20-30. doi: 10.18698/0536-1044-2022-1-20-30 (In Russ., abstract in Eng.)
8. Benaddi N., Badosz T.J., Jagiello J., Schwarz J.A., Rouzaud J.N., Legras D., Beguin F. Surface Functionality and Porosity of Activated Carbons Obtained from Chemical Activation of Wood, *Carbon*, 2000, vol. 38, no. 5, pp. 669-674. doi:10.1016/S0008-6223(99)00134-7

9. Chesnokov N.V., Mikova N.M., Ivanov I.P., Kuznetsov B.N. [Production of carbon sorbents by chemical modification of fossil coals and plant biomass], *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta* [Journal of the Siberian Federal University], 2014, vol. 7, no. 1, pp. 42-53. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Zhu Y., Murali S., Stoller M.D., Ganesh K.J., Cai W., Ferreira P.J., Pirkle A., Wallace R.M., Cychosz K.A., Thommes M., Su D., Stach E.A., Ruoff R.S. Carbon-Based Supercapacitors Produced by Activation of Graphene, *Science*, 2011, vol. 332, no. 6037, pp. 1537-1541. doi:10.1126/science.1200770
11. Lozano-Castello D., Calo J.M., Cazorla-Amoros D., Linares-Solano A. Carbon Activation with KOH as Explored by Temperature Programmed Techniques, and the Effects of Hydrogen, *Carbon*, 2007, vol. 45, no. 13, pp. 2529-2536. doi:10.1016/j.carbon.2007.08.021
12. Jiménez V., Díaz J.A., Sánchez P., Valverde J.L., Romero A. Influence of the Activation Conditions on the Porosity Development of Her-ringbone Carbon Nanofibers, *Chemical Engineering Journal*, 2009, vol. 155, no. 3, pp. 931-940. doi: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: 10.1016/S0008-6223(99)00160-8
14. Kheyfets M.L. [Design of technological equipment complexes for additive and subtractive production], *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii* [Science-intensive technologies in mechanical engineering], 2020, no. 11(113), pp. 40-48. doi: 10.30987/2223-4608-2020-11-40-48 (In Russ., abstract in Eng.)
15. Rusetskiy A.M., Vityaz' P.A., Kheyfets M.L. [et al.]. *Teoreticheskiye osnovy proyektirovaniya tekhnologicheskikh kompleksov: monografiya* [Theoretical foundations of the design of technological complexes: monograph], Minsk: Belaruskaya navuka, 2012, 239 p. (In Russ.)
16. Chizhik S.A., Kheyfets M.L., Filatov S.A. [Prospects for the development of technological complexes for additive synthesis of composite materials and product shaping], *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2014, no. 4(29), pp. 68-74. (In Russ., abstract in Eng.)
17. Pukhal'skiy V.A. [Hierarchy of processes in mechanical engineering technology], *Fundamental'nyye i prikladnyye problemy tekhniki i tekhnologii* [Fundamental and applied problems of engineering and technology], 2015, no. 6 (314), pp. 108-113. (In Russ., abstract in Eng.)
18. Rukhov A.V., Tarov D.V., D'yachkova T.P. [et al.]. [Methodology for designing hardware for the production of carbon nanotubes and semi-products based on them], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Ser. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [News of higher educational institutions. Ser. Chemistry and chemical technology], 2019, vol. 62, no. 3, pp. 94-101. doi: 10.6060/ivkkt.20196203.5959 (In Russ., abstract in Eng.)
19. Kookos K., Perkins J.D. Regulatory Control Structure Selection of Linear Systems, *Computers & Chemical Engineering*, 2002, vol. 26, no. 6, pp. 875-887. doi: 10.1016/S0098-1354(02)00013-3
20. Borisenko A.B., Karpushkin S.V. Hierarchy of Processing Equipment Configuration Design Problems for Multiproduct Chemical Plants, *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2014, vol. 53, no. 3, pp. 410-419. doi: 10.1134/S1064230714030046
21. Niu J.J., Wang J.N. Effect of Temperature on Chemical Activation of Carbon Nanotubes, *Solid State Sciences*, 2008, vol. 10, no. 9, pp. 1189-1193. doi: 10.1016/j.solidstatesciences.2007.12.016
22. Frackowiak E., Delpeux S., Jurewicz K., Szostak K., Cazorla-Amoros D., Beguin F. Enhanced Capacitance of Carbon Nanotubes through Chemical Activation, *Chemical Physics Letters*, 2002, vol. 361, no. 1, pp. 35-41. doi: 10.1016/S0009-2614(02)00684-X

23. Lopez-Arevalo I., Banares-Alcantara R., Aldea A., Rodriguez-Martinez A. A Hierarchical Approach for the Redesign of Chemical Processes, *Knowledge and Information Systems*, 2007, vol. 12, no. 2, pp. 169-201. doi: 10.1007/s10115-006-0060-4

24. Zhou Y.M. Designing for Complexity: Using Divisions and Hierarchy to Manage Complex Tasks, *Organization Science*, 2012, vol. 24, no. 2, pp. 339-355. doi: 10.1287/orsc.1120.0744

25. Popova A.A. [Hardware and technological design for the production of activated carbon material], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 318-327. doi: 10.17277/vestnik.2021.02.pp.318-327 (In Russ., abstract in Eng.)

---

### **Структуреллес и иерархичесчес Schema дес Verfahrens zur Aktivierung дес Kohlenstoffmaterials bei Hochtemperatur**

**Zusammenfassung:** Es ist der Prozess der Hochtemperaturaktivierung von Kohlenstoffmaterial betrachtet. Basierend auf dem funktional-hierarchischen Ansatz ist ein Strukturdiagramm des Zusammenspiels von Anlagen und Stoffströmen entwickelt, das die Technologie zur Herstellung hochporöser Kohlenstoffmaterialien umsetzt. Es sind die Besonderheiten des Aufbaus technologischer Anlagen aufgezeigt, die es ermöglichen, das Problem der Verbesserung bestehender Anlagen und der Entwicklung neuer Anlagen unter Berücksichtigung der Besonderheiten laufender Prozesse zu lösen. Dadurch ist die Möglichkeit geschaffen, die Produktivität, Effizienz und Sicherheit der Umsetzung dieses Prozesses, die Wettbewerbsfähigkeit der Technologie und des daraus resultierenden aktivierten hochporösen Kohlenstoffmaterials zu steigern, sowie den Übergang von der Laborforschung zu seiner industriellen Umsetzung zu beschleunigen.

---

### **Schéma structurel et hiérarchique du processus d'activation à haute température du matériau de carbone**

**Résumé:** Est examiné le processus d'activation à haute température du matériau de carbone. A la base d'une approche fonctionnelle et hiérarchique, est élaboré un schéma structurel de l'interaction entre l'équipement et les courants matériels, mettant en œuvre la technologie de la production des matières carbonées hautement poreuses. Sont montrées les caractéristiques de la disposition de l'équipement technologique, permettant de résoudre le problème de l'amélioration de l'existant et le développement de nouveaux, en tenant compte des particularités des processus en cours. Donc, il est possible d'améliorer la productivité, l'efficacité et la sécurité de la mise en œuvre du processus, la compétitivité de la technologie et du matériau à haute teneur en carbone activé par faisceau, ainsi que le passage à partir de la recherche en laboratoire à sa mise en œuvre industrielle.

---

**Авторы:** *Шубин Игорь Николаевич* – кандидат технических наук, доцент, кафедры «Техника и технологии производства нанопродуктов», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия; *Попова Алёна Алексеевна* – кандидат технических наук, специалист по корпоративной социальной ответственности департамента по корпоративным коммуникациям АО «ПРОГРЕСС», Липецк, Россия.