

## **ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ СИНТЕЗОМ УГЛЕРОДНЫХ СОРБЕНТОВ**

**В.В. Бурляев, Е.В. Бурляева<sup>@</sup>, А.И. Николаев, Б.В. Пешнев**

*МИРЭА – Российский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Москва 119571, Россия*

*<sup>@</sup>Автор для переписки, e-mail: burlyaeva@mirea.ru*

*В рамках методологии функционального моделирования построена формализованная модель управления синтезом углеродных сорбентов. Выявлены взаимосвязи между направлениями использования и свойствами углеродных сорбентов. Выделены характеристики, которые являются существенными независимо от направления использования сорбента, в частности, сорбционные свойства (удельная адсорбционная поверхность, сорбционная активность) и прочность. Рассмотрены технологии, базирующиеся на газофазном способе получения углеродного материала, выполнен анализ отдельных стадий процесса получения углеродных сорбентов. Сформировано описание влияния технологических параметров синтеза на свойства сорбентов. На основе установленных взаимосвязей построена функциональная модель, которая обеспечивает иерархически упорядоченное, структурированное, наглядное описание управления синтезом углеродных сорбентов. Моделирование выполнено «сверху вниз» – от наиболее общего описания к детализации. Результирующая модель представляет собой совокупность взаимосвязанных графических диаграмм. На начальном этапе синтез углеродного сорбента рассматривается как единый процесс, входными параметрами которого являются углеводородный газ, активирующий агент и фактор формы материала, выходным – углеродный сорбент, а управляющими – требования к прочности и сорбционным свойствам. Далее процесс синтеза декомпозируется. В результате декомпозиции выделены процессы управления (анализ свойств сырья и выбор матрицы), технологические процессы (подготовка сырья) и смешанные процессы. Модель включает в себя последовательное описание подбора технологических параметров (температуры, расхода газа и времени) для обеих стадий процесса синтеза. Модель является основой обеспечения информационной поддержки производства углеродных сорбентов с требуемыми свойствами.*

**Ключевые слова:** *углеродные сорбенты, функциональное моделирование, пироуплотнение, активация, управление синтезом углеродных сорбентов.*

## **FUNCTIONAL MODELING OF CARBON SORBENTS SYNTHESIS CONTROL**

**V.V. Burlyayev, E.V. Burlyayeva<sup>@</sup>, A.I. Nikolaev, B.V. Peshnev**

*MIREA – Russian Technological University (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow 119571, Russia*

*<sup>@</sup>Corresponding author e-mail: burlyaeva@mirea.ru*

*The formalized model of carbon sorbent synthesis control based on the methodology for functional modeling is constructed. The correlations between the directions of use and the properties of carbon sorbents are revealed. The characteristics that are essential regardless of the direction of use of the sorbent, in particular, sorption properties and strength are identified. The technologies based on the gas-phase method of obtaining carbon material are considered, the analysis of individual stages of the process of obtaining carbon sorbents is carried out. The analysis of the influence of the technological parameters of the synthesis on the properties of sorbents is carried out. On the basis of the established relationships, a functional model has been built that provides a hierarchically ordered, structured, visual description of the management of carbon sorbent synthesis. The simulation is performed "from top to bottom" from the most general description to the detail. The resulting model is a set of interrelated graphical diagrams. At the initial stage, the synthesis of carbon sorbent is considered as a single process, the input parameters of which are hydrocarbon gas, the activating agent and the material form factor, the output – carbon sorbent, and the control parameters are the requirements for strength and sorption properties. Then the synthesis process is decomposed. The control processes (analysis of raw material properties and matrix selection), technological processes (raw material preparation) and mixed processes are distinguished as a result of decomposition. The model includes a consistent description of the technological parameters selection (temperature, gas flow and time) for both stages of the synthesis process. The model is the base for information support providing for the production of carbon sorbents with the required properties.*

**Keywords:** carbon sorbents, functional modeling, pyrolytic carbon coating, activation, carbon sorbents synthesis control.

Методология функционального моделирования обеспечивает возможность совместного описания технологических процессов и процессов управления [1]. Моделирование осуществляется «сверху вниз» – от наиболее общего описания к детализации. Результирующая модель представляет собой совокупность взаимосвязанных графических диаграмм. Методология функционального моделирования стандартизована в РФ [2]. Проведение функционального моделирования с последовательной декомпозицией отдельных процессов позволяет четко регламентировать последовательность технологических процессов и процессов управления, используемые материалы, технологическое оборудование, а также выбор управляющих параметров [3, 4].

Интенсивное развитие химической промышленности в XX веке способствовало активному внедрению в производственные процессы процессов адсорбции, разделения, концентрирования в газовых и жидких средах. С развитием этих процессов возросла роль углеродных сорбентов [5–12].

В зависимости от направления использования углеродного сорбента он должен обладать различными свойствами. Так, например, при извлечении ценных металлов из растворов для углеродного сорбента важное значение имеет гидрофильность его поверхности. Чистота сорбента (зольность) не будет оказывать влияние на эффективность очистки загрязненных стоков и газовых выбросов. Однако при извлечении благородных металлов, например, золота, для углеродного сорбента регламентируется количество минеральных примесей [13].

Следует отметить, что для углеродных сорбентов можно выделить несколько характеристик, ко-

торые будут являться существенными независимо от направления использования сорбента. К таким характеристикам относятся сорбционные свойства (удельная адсорбционная поверхность, сорбционная активность) и прочность. Наличие тех или иных свойств у углеродных сорбентов зависит от способа и условий их получения [14, 15].

В промышленности получение углеродных сорбентов основывается на применении технологий, базирующихся на жидкофазном и газофазном способах получения углеродного материала. Газофазный способ получения углеродного сорбента предполагает наличие стадий активации и пироуплотнения [16].

Стадия активации предназначена для частичной газификации углерода исходного материала для придания продукту сорбционных свойств, при этом прочностные характеристики материала по мере газификации углерода ухудшаются. Для повышения прочности сорбента применяют стадию пироуплотнения. Однако улучшение прочностных характеристик материала сопровождается незначительным ухудшением его сорбционных свойств. Это обусловлено тем, что образующийся при термическом разложении углеводородного газа пироуглерод осаждается на поверхности углеродного материала [13].

Следует отметить, что в зависимости от используемого исходного углеродного материала и требований к углеродному сорбенту последовательность проведения стадий активации и пироуплотнения может быть различной, а в некоторых случаях стадия пироуплотнения может отсутствовать [5, 8]. Так, в случае использования материала, обладающего большими прочностными характеристиками, напри-

мер, угля, получение сорбента на его основе может осуществляться без применения стадии пироуплотнения. Однако применение в качестве основы активных углей или технического углерода, характеризующихся высокими значениями объема микропор и удельной адсорбционной поверхностью, но невысокими прочностными характеристиками, приводит к необходимости пироуплотнения. При этом очеред-

ность стадий активации и пироуплотнения определяется возможностью исходного материала сохранить целостность формы в процессе активации [12, 13].

Одна из возможных схем получения углеродного сорбента [9, 10] приведена на рис. 1. В этой схеме процесс пироуплотнения предшествует активации. Дальнейшее построение функциональной модели выполнено для этой схемы.

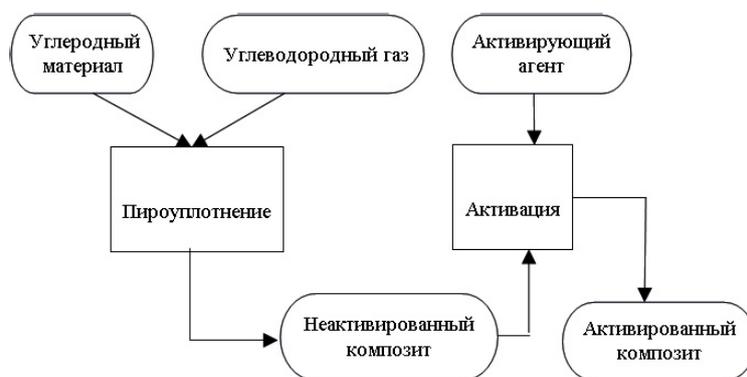


Рис. 1. Технологическая схема получения углеродного сорбента.

Параметрами процессов, влияющих на характеристики получаемого сорбента, являются температура, расход газа и время проведения процесса.

На протекание стадии активации существенное влияние оказывает температура [17, 18]. Так, при невысоких температурах газификация углерода будет протекать на всей доступной поверхности материала, включая внутреннюю поверхность пор. На этом этапе процесс активации лимитируется скоростью химической реакции газификации. Отмечается, что скорость реакции газификации углеродного материала во времени может уменьшаться [19]. Это обуславливается взаимным влиянием двух факторов: уменьшением реагирующей поверхности и снижением ее химической активности. Иначе говоря, при невысоких температурах проведения процесса активации газификация углерода происходит во всем объеме материала, что приводит к получению продукта, обладающего развитой поверхностью и пористым пространством (высокими сорбционными характеристиками). С повышением температуры лимитирующей стадией процесса становится диффузия окислителя на поверхности материала. В результате газификация углерода преимущественно происходит на его внешней поверхности.

Влияние расхода окислителя на формирования сорбционных свойств материала может быть выражено следующим образом – при недостатке окислителя в реакцию вступает наименее графитизированный углерод, локализующийся на границах контактов кристаллитов. В результате будет образовываться высокопористый материал. По мере увеличения расхода окислителя доля реакций порообразования будет снижаться, и эффект будет аналогичен повышению температуры процесса.

Температура процесса и расход окислителя влияют на продолжительность стадии активации.

Для стадии пироуплотнения повышение температуры способствует получению пироуглерода с более упорядоченной структурой, обеспечивающей материалу высокую химическую инертность и прочность. Следует отметить, что повышение температуры процесса приводит к возрастанию скорости образования пироуглерода, что, как и увеличение расхода газа, будет способствовать уменьшению времени проведения процесса пироуплотнения [20].

Выявленные взаимосвязи технологических параметров со свойствами углеродных сорбентов схематично представлены на рис. 2.

На начальном этапе синтез углеродного сорбента рассматривается как единый процесс, входными параметрами которого являются углеводородный газ, активирующий агент и фактор формы материала, выходным – углеродный сорбент, а управляющими – требования к прочности и сорбционным свойствам. Диаграмма, описывающая процесс синтеза на наиболее общем уровне, представлена на рис. 3.

Далее процесс синтеза декомпозируется. В результате декомпозиции выделены процессы управления (анализ свойств сырья и выбор матрицы), технологические процессы (подготовка сырья) и смешанные процессы, которые далее будут описаны подробнее. Отметим, что процесс анализа свойств сырья предшествует процессу подготовки сырья. Процесс выбора исходного материала не зависит от этих процессов, но предшествует процессу пироуплотнения. Диаграмма, полученная в результате декомпозиции, представлена на рис. 4.

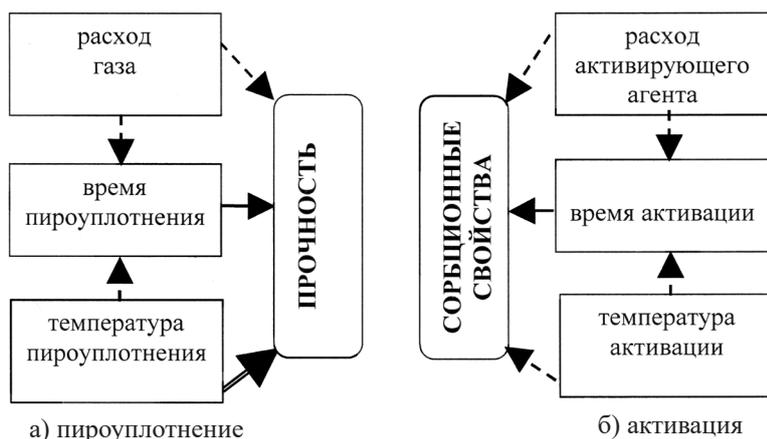


Рис. 2. Влияние технологических параметров процессов пироуплотнения и активации на свойства композитного материала. Сплошная линия – прямая зависимость, пунктир – обратная зависимость, двойная линия – экстремальная зависимость.

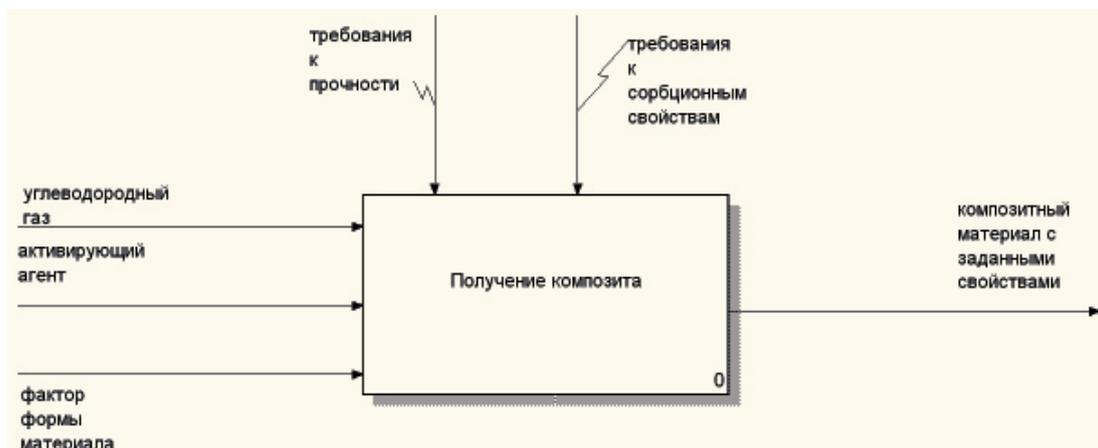


Рис. 3. Обобщенное описание синтеза углеродного сорбента.

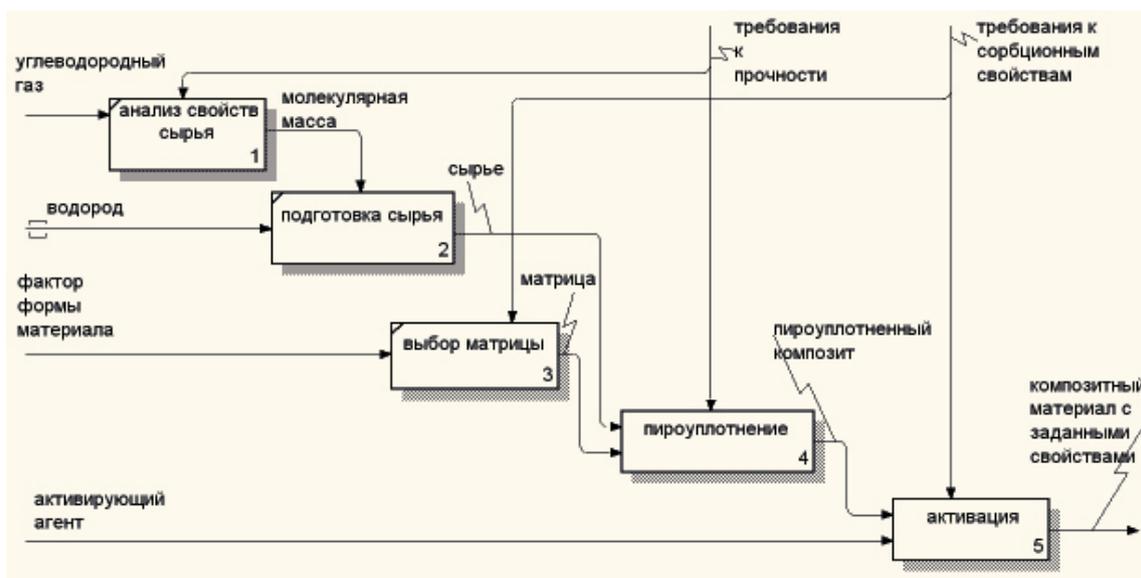


Рис. 4. Детализированное описание синтеза углеродного сорбента.

Рассмотрим детализированное описание процесса пироуплотнения. Пироуплотнение разделяется на 4 процесса, три из которых описывают подбор технологических параметров (температуры, расхода газа и времени пироуплотнения). Отметим, что, поскольку параметры связаны между собой, процессы подбора параметров следуют один за другим, причем параметры, выбранные на предыдущем

этапе, используются на следующем, что показано стрелками, описывающими связи «выход-вход». Полученные в результате параметры управляют технологическим процессом пироуплотнения, на диаграмме эти параметры представлены стрелками, описывающими связи по управлению. Диаграмма, описывающая процесс пироуплотнения, представлена на рис. 5.

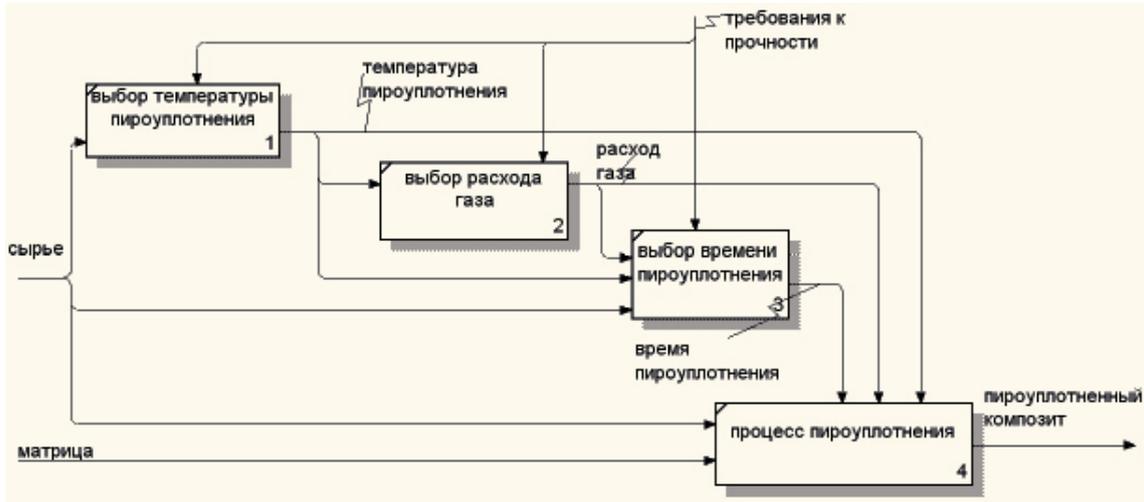


Рис. 5. Детализированное описание процесса пироуплотнения.

Детализированное описание активации по структуре практически аналогично описанию пироуплотнения. Процессов управления на этой диаграмме 4, первый из них описывает анализ свойств материала, полученного в результате пироуплотнения, следующие три – подбор технологических параметров

(температуры активации, расхода активирующего агента и времени активации). Как и на предыдущей диаграмме, эти процессы являются последовательными, параметры, выбранные на предыдущем этапе, используются на следующем. Диаграмма, описывающая процесс активации, представлена на рис. 6.

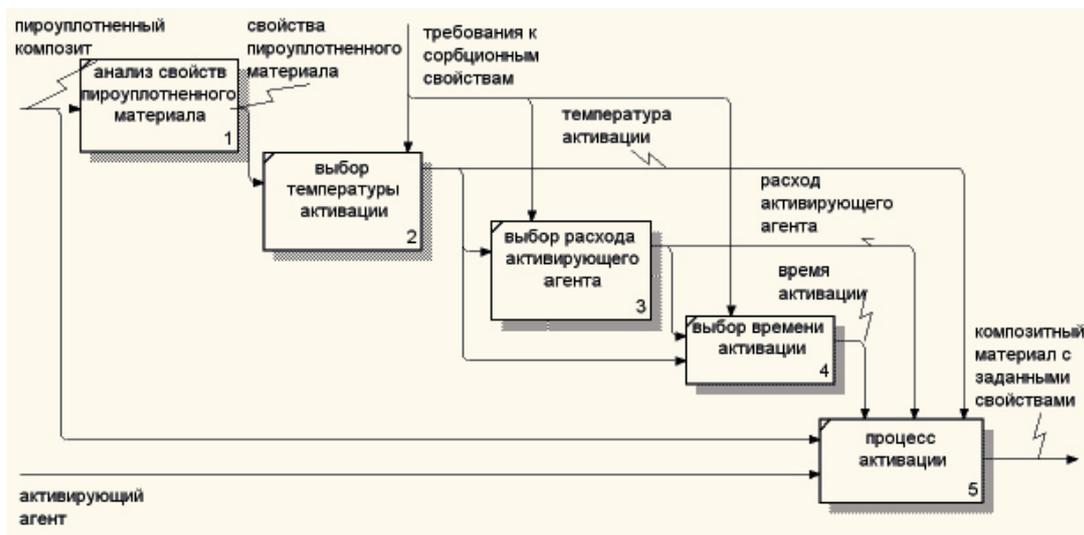


Рис. 6. Детализированное описание процесса активации.

Построенная функциональная модель обеспечивает иерархически упорядоченное, структурированное, наглядное описание управления синтезом угле-

родных сорбентов. Такая модель является основой обеспечения информационной поддержки производства углеродных сорбентов с требуемыми свойствами.

Список литературы:

1. Бурляева Е.В., Разливинская С.В., Трегубов А.В. Разработка и применение обобщенной функциональной модели одностадийного химического производства // Прикладная информатика. 2016. Т. 11. № 1 (61). С. 64–70.
2. Рекомендации по стандартизации. Информационные технологии поддержки жизненного цикла продукции. Методология функционального моделирования. М.: Госстандарт России. 2001. 19 с.
3. Бурляев В.В., Бурляева Е.В., Николаев А.И., Пешнев Б.В., Разливинская С.В. Функциональное моделирование управления синтезом углеродных нановолокон // Вестник МИТХТ. 2014. Т. 9. № 3. С. 98–104.
4. Ерушева К.И., Колыбанов К.Ю., Тишаева И.Р. Функциональное моделирование процесса выбора наилучшей доступной технологии // Тонкие химические технологии. 2017. Т. 12. № 4. С. 98–105.
5. Мухин В.М., Тарасов А.В., Клущин В.Н. Активные угли России. Под общ. ред. проф. А.В. Тарасова. М.: Metallurgia, 2000. 352 с.
6. Кривонос О.И., Плаксин Г.В. Пористые углерод-минеральные материалы на основе сапропелевого сырья // Химия твердого топлива. 2015. № 1. С. 39–42.
7. Передерий М.А., Носкова Ю.А., Карасёва М.С., Коновалов П.Н. Новые углеродные сорбенты // Химия твердого топлива. 2009. № 6. С. 36–46.
8. Плаксин Г.В., Бакланова О.Н., Лавренов А.В., Лихолобов В.А. Углеродные материалы семейства сибунит и некоторые методы регулирования их свойств // Химия твердого топлива. 2014. № 6. С. 26–32.
9. Суровикин Ю.В., Лихолобов В.А., Сергеев В.В., Макаров И.В. Применение новых углерод-углеродных сорбентов для очистки технологических растворов от органических примесей в гидрометаллургии кобальта // Химия твердого топлива. 2014. № 6. С. 47–56.
10. Пьянова Л.Г., Бакланова О.Н., Лихолобов В.А., Лавренов А.В., Седанова А.В. Модифицированные углеродные сорбенты: синтез, свойства и применение // Материалы 10-й Междунар. конф. «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология». Россия, Москва, г. Троицк. 6–9 июня 2016 г. С. 359.
11. Суровикин В.Ф., Суровикин Ю.В., Цеханович М.С. Новые направления в технологии получения углерод-углеродных материалов. Применение углерод-углеродных материалов // Российский химический журнал. 2007. Т. 51. № 4. С. 111–119.
12. Плаксин Г.В. Пористые углеродные материалы типа сибунита // Химия в интересах устойчивого развития. 2001. Т. 9. № 5. С. 609–620.

References:

1. Burlyayeva E.V., Razlivinskaya S.V., Tregubov A.V. Development and application of the generalized functional model of one-stage chemical manufacturing. *Prikladnaya informatika* (Journal of Applied Informatics). 2016; 11(1): 64-70. (in Russ.)
2. Recommendations for standardization. Information support technology of the life cycle product. Functional modeling methodology. Moscow: Gosstandart Publ., 2001. 19 p. (in Russ.)
3. Burlyayev V.V., Burlyayeva E.V., Nikolaev A.I., Peshnev B.V., Razlivinskaya S.V. Functional modeling of carbon nanotubes synthesis control. *Vestnik MITHT* (Fine Chemical Technologies). 2014; 9(3): 98-104. (in Russ.)
4. Erusheva K.I., Kolybanov K.Yu., Tishaeva I.R. Process functional modeling of the best available technique choosing. *Tonkie khimicheskie tekhnologii* (Fine Chemical Technologies). 2017; 12(4): 98-105. (in Russ.)
5. Mukhin V.M., Tarasov A.V., Klushin V.N. Active carbons of Russia. Moscow: Metallurgiya Publ. 2000. 352 p. (in Russ)
6. Krivonos O.I., Plaksin G.V. Porous carbon-mineral materials based on sapropels. *Solid Fuel Chemistry* (Khimiya tverdogo topliva). 2015; 49(1): 36-40.
7. Perederiy M.A., Noskova Yu.A., Karaseva M.S., Konovalov P.N. New carbon sorbents. *Khimiya tverdogo topliva* (Solid Fuel Chemistry). 2009; 6: 36-46. (in Russ.)
8. Plaksin G.V., Baklanova O.N., Lavrenov A.V., Likholobov V.A. Carbon materials from the sibunit family and methods for controlling their properties. *Solid Fuel Chemistry* (Khimiya tverdogo topliva).. 2014; 48(6): 349-355.
9. Surovikin Y.V., Likholobov V.A., Sergeev V.V., Makarov I.V. Application of new carbon-carbon sorbents for technological solutions purifying from organic impurities in hydrometallurgy cobalt. *Solid Fuel Chemistry* (Khimiya tverdogo topliva). 2014; 48(6): 371-381.
10. P'yanova L.G., Baklanova O.N., Likholobov V.A., Lavrenov A.V., Sedanova A.V. Modified carbon sorbents: Synthesis, properties and application. Proceedings of the 10th Int. Conf. «Carbon: Fundamental Problems of Science, Materials Science, Technology». Russia, Moscow, Troitsk. 6–9 June 2016. P. 359. (in Russ.)
11. Surovikin V.F., Surovikin Yu.V., Tsekhanovich M.S. New trends in the technology of carbon-carbon materials obtaining. Application of carbon-carbon materials. *Russian J. General Chemistry*. 2007; 77(12): 2301-2310.
12. Plaksin G.V. Porous carbon materials as sibunit. *Khimiya v interesah ustojchivogo razvitiya* (Chemistry for Sustainable Development). 2001; 9(5): 609-620. (in Russ.)

13. Поляков Н.С., Петухова Г.А., Сузовикин В.Ф. Адсорбционные свойства и пористая структура новых углеродных материалов // Известия Академии наук. Серия химическая. 1993. № 8. С. 1377–1380.

14. Сузовикин Ю.В., Сузовикин В.Ф., Цеханович М.С., Лихолобов В.А. Новый углеродный катализатор для химических процессов // Российский химический журнал. 2006. Т. 50. №1. С. 58–59.

15. Гаврилов В.Ю., Фенелонов В.Б., Чувилин А.Л., Плаксин Г.В., Сузовикин В.Ф., Ермаков Ю.И., Семиколонов В.А. Изучение морфологии и пористой структуры композиционных углерод-углеродных материалов // Химия твердого топлива. 1990. № 2. С. 125–129.

16. Николаев А.И. Получение углерод-углеродных композиционных материалов на основе углеродных нановолокон газофазным способом // Тонкие химические технологии. 2015. Т. 10. № 2. С. 61–66.

17. Сырвева А.В., Сузовикин Ю.В. Влияние температуры синтеза пироуглеродной матрицы на её активацию водяным паром // «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства». Материалы 7-й Междунар. науч.-техн. конф. 2017. С. 158–159.

18. Нгуен В.Х., Филимонов А.С., Пешнев Б.В., Николаев А.И. Окисление дисперсных углеродных материалов // Тонкие химические технологии. 2018. Т. 13. № 3. С. 57–63.

19. Пешнев Б.В., Филимонов А.С., Гаврилова Н.Н., Николаев А.И., Нгуен В.Х. Получение углеродных материалов с заданной пористостью // Химия твердого топлива. 2018. № 3. С. 35–40.

20. Пешнев Б.В., Филимонов А.С., Баулин С.В., Следзь О.С., Асилова Н.Ю. Механизм образования пироуглерода в процессе пиролиза углеводородного сырья // Тонкие химические технологии. 2017. Т. 12. № 4. С. 36–42.

13. Polyakov N.S., Petukhova G.A., Surovikin V.F. Adsorption properties and porous structure of new carbon materials. *Izvestiya Akademii nauk* (Proceedings of the Academy of Sciences. Chemical series). 1993; 8: 1377-1380. (in Russ.)

14. Surovikin Yu.V., Surovikin V.F., Tsekhanovich M.S., Lykholobov V.A. New carbon catalyst for chemical processes. *Rossiiskij khimicheskij zhurnal* (Russian Chemical Journal). 2006; 50(1): 58-59. (in Russ.)

15. Gavrilov V.Yu., Fenelonov V.B., Chuvilin A.L., Plaksin G.V., Surovikin V.F., Ermakov Yu.I., Semikolenov V.A. The morphology and porous structure study of composite carbon-carbon materials. *Khimiya tverdogo topliva* (Solid Fuel Chemistry). 1990; 2: 125-129. (in Russ.)

16. Nikolaev A.I. The production of carbon-carbon composite materials based on carbon nanofibers by the gas-phase method. *Tonkie himicheskie tehnologii* (Fine Chemical Technologies). 2015; 10(2): 61-66. (in Russ.)

17. Syrieva A.V., Surovikin Y.V. Influence of the synthesis temperature of pyrocarbon matrix on its activation with water vapor. «Technique and technology of petrochemical and oil and gas production». Proceed. of the 7th International Scientific and Technical Conference. 2017. P. 158-159. (in Russ.)

18. Nguyen V.H., Filimonov A.S., Peshnev B.V., Nikolaev A.I. Oxidation of disperse carbon materials. *Tonkie khimicheskie tekhnologii* (Fine Chemical Technologies). 2018; 13(3): 57-63. (in Russ.)

19. Peshnev B.V., Filimonov A.S., Gavrilova N.N., Nikolaev A.I., Nguyen V.Kh. Carbon materials production with a given porosity. *Khimiya tverdogo topliva* (Solid Fuel Chemistry). 2018; 3: 35-40. (in Russ.)

20. Peshnev B.V., Filimonov A.S., Baulin S.V., Sledz O.S., Asilova N.Yu. The pyrocarbon formation mechanism during the hydrocarbon pyrolysis process. *Tonkie khimicheskie tekhnologii* (Fine Chemical Technologies). 2017; 12(4): 36-42. (in Russ.)

#### Об авторах:

**Бурляев Валерий Викторович**, кандидат технических наук, профессор кафедры информационных систем в химической технологии Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет (119571, Россия, Москва, пр. Вернадского, д. 86).

**Бурляева Елена Валерьевна**, доктор технических наук, профессор кафедры информационных систем в химической технологии Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет (119571, Россия, Москва, пр. Вернадского, д. 86).

**Николаев Александр Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива им. А.Н. Башкирова Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет (119571, Россия, Москва, пр. Вернадского, д. 86).

**Пешнев Борис Владимирович**, доктор технических наук, профессор кафедры технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива им. А.Н. Башкирова Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет (119571, Россия, Москва, пр. Вернадского, д. 86).

#### About the authors:

**Valery V. Burlyaev**, Ph.D. (Engineering), Professor, Chair of Information Systems in Chemical Technology, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia).

**Elena V. Burlyaeva**, D.Sc. (Engineering), Professor, Chair of Information Systems in Chemical Technology, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia).

**Alexander I. Nikolaev**, D.Sc (Engineering), Professor, A.N. Bashkirov Chair of Petrochemical Synthesis and Synthetic Liquid Fuel Technology, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia).

**Boris V. Peshnev**, D.Sc (Engineering), Professor, A.N. Bashkirov Chair of Petrochemical Synthesis and Synthetic Liquid Fuel Technology, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, MIREA – Russian Technological University (86, Vernadskogo pr., Moscow, 119571, Russia).

*Для цитирования:* Бурляев В.В., Бурляева Е.В., Николаев А.И., Пешнев Б.В. Функциональное моделирование управления синтезом углеродных сорбентов // Тонкие химические технологии / Fine Chemical Technologies. 2019. Т. 14. № 1. С. 39–46. DOI: 10.32362/2410-6593-2019-14-1-39-46

*For citation:* Burlyayev V.V., Burlyayeva E.V., Nikolaev A.I., Peshnev B.V. Functional modeling of carbon sorbents synthesis control. *Tonkie khimicheskie tekhnologii / Fine Chemical Technologies*. 2019; 14(1): 39-46. (in Russ.). DOI: 10.32362/2410-6593-2019-14-1-39-46