

ОКИСЛЕНИЕ ДИСПЕРСНЫХ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ

В.Х. Нгуен[@], А.С. Филимонов, Б.В. Пешнев, А.И. Николаев

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

[@]Автор для переписки, e-mail: nguyenvanhuy281190@gmail.com

Предложено рассматривать процесс окислительной активации углеродных материалов с позиций топохимических реакций, предполагающих хемосорбцию активирующего агента (окислителя) на активных центрах поверхности материала и последующий акт химического взаимодействия. Подобный подход дает возможность управлять процессом создания углеродного материала с заданными характеристиками пористого пространства. Высказано предположение, что активными центрами хемосорбции окислителя является аморфный углерод, локализующийся на границах кристаллитов материала. Изменение протяженности этих границ приведет к изменению скорости процесса. Показано, что количество таких активных центров на поверхности углеродного материала, зависящее от размеров кристаллитов, будет оказывать существенное влияние не только на скорость активации, но и на возможность протекания процесса по поверхности или с порообразованием. Рассмотрены математические модели, описывающие изменение удельной поверхности углеродного образца в процессе окисления и позволяющие количественно оценить долю углерода, окисляющегося на поверхности образца, с образованием пор, а также количество пор. Соотношение процессов порообразования и окисления по поверхности зависит от температуры, природы и расхода окислителя: с увеличением расхода окислителя и повышением температуры доля порообразования снижается. Экспериментально установлено, что для получения материала с более развитым пористым пространством и высокой удельной поверхностью в качестве окисляющего агента предпочтительнее использовать диоксид углерода.

Ключевые слова: сорбент, удельная поверхность, активация, окислитель, порообразование, обгар, кристаллиты, математическая модель

Для цитирования: Нгуен В.Х., Филимонов А.С., Пешнев Б.В., Николаев А.И. Окисление дисперсных углеродных материалов // Тонкие химические технологии / Fine Chemical Technologies. 2018. Т. 13. № 3. С. 57-63.

OXIDATION OF DISPERSE CARBON MATERIALS

V.H. Nguyen[@], A.S. Filimonov, B.V. Peshnev, A.I. Nikolaev

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

[@]Corresponding author e-mail: nguyenvanhuy281190@gmail.com

It is proposed to consider the process of carbon materials oxidative activation from the positions of topochemical reactions involving chemisorption of the activating agent (oxidizer) on the material surface active centers followed by chemical interaction. Such an approach makes it possible to control the process of creating a carbon material with the desired characteristics of the porous space. It is

assumed that the oxidizer chemisorption active centers are amorphous carbon, which is localized on the material crystallites boundaries. The change in the length of these boundaries will lead to a change in the process rate. It is shown that the number of such active centers on the carbon material surface depends on the size of the crystallites. It will have a significant impact not only on the rate of activation, but also on the possibility of the process flow on the surface or with porosity formation. Mathematical models describing the carbon sample specific surface changing in the oxidation process are proposed. They allow quantifying the proportion of carbon that is oxidized on the sample surface or with pores formation, as well as quantifying the number of pores. It is shown that the ratio of pore formation and surface oxidation processes depends on the oxidation temperature, the oxidizer nature and its flow rate. The proportion of porosity formation decreases with the increase in the oxidant flow rate and the increase in temperature. It was experimentally shown that in order to obtain a material with a more developed porous space and a high specific surface it is preferable to use carbon dioxide as an oxidizing agent.

Keywords: sorbent, specific surface, activation, oxidizer, pore formation, burn, crystallites, mathematical model.

For citation: 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.)

Введение

Углеродные материалы считаются эффективными сорбентами и носителями катализаторов, что обусловлено их высокой адсорбционной поверхностью и инертностью к активным компонентам катализаторов. Прекурсорами таких материалов являются углеродные волокна, композиты типа «сibunит», коксы, активные угли и т.п. Технология их получения предполагает активацию исходного образца окисляющим агентом, в качестве которого наиболее часто рассматривают воздух, диоксид углерода, водяной пар и/или их смеси.

Принято считать, что процесс взаимодействия окисляющего агента с углеродным материалом хорошо изучен. Известно [1–3], что повышение температуры процесса сопровождается меньшим порообразованием и большим обгаром (окислением по поверхности) материала. Указывается, что на протекание процесса (порообразование или окисление по поверхности) влияет расход окислителя [4] и природа окисляемого материала [5–9]. Отмечается [10], что при использовании воздуха (кислорода) процесс следует проводить при более низких температурах.

По нашему мнению, сделанные в вышеуказанных работах выводы носят эмпирический, статистический характер, однако они хорошо объяснимы, если процесс активации углеродных материалов рассматривать с точки зрения топохимических реакций. Кроме того, при таком подходе возникают перспективы создания управляемого процесса получения новых углеродных материалов с заданными характеристиками пористого пространства.

Несомненно, что первой стадией в схеме механизма окисления углеродного материала является стадия адсорбции (более вероятно, хемосорбции)

активирующего агента, причем возможна хемосорбция не по всей поверхности материала, а только по активным центрам. В этом случае при прочих равных условиях концентрация активных центров на поверхности материала будет существенно влиять на скорость процесса и закономерности его протекания (порообразование или обгар). Более того, можно допустить, что при использовании различных окисляющих агентов будут образовываться материалы, различающиеся по сорбционной способности.

Ранее [11] при изучении механизма образования пироуглерода было высказано предположение о возникновении его зародышей на границах кристаллитов подложки. Проведенные нами исследования показали [12], что содержание высокомолекулярных углеводородов в отходящих газах пиролиза обратно пропорционально протяженности границ кристаллитов подложки. Это не противоречило результатам П.А. Теснера [11] и свидетельствовало о том, что образование пироуглерода происходит через стадии адсорбции высокомолекулярных продуктов пиролиза на активных центрах, локализуемых на границах кристаллитов подложки, и их последующей карбонизации. Показано также, что активными центрами являются ненасыщенные углерод–углеродные связи аморфного углерода, формирующие границы его кристаллитов, и локализуемые там же функциональные группы [13].

Закономерно допустить, что хемосорбция активирующего агента проходит по таким же активным центрам. Увеличение размеров кристаллитов углерода приведет к сокращению их границ и должно сопровождаться снижением скорости окисления, меньшим порообразованием.

Предложены математические модели, позволяющие по данным об изменениях удельной поверхности

образца и его кажущегося объема оценить изменения, происходящие с материалом в процессе активации [14]. Модели разработаны для окисления углеродных волокон в предположении, что окисление обусловлено только порообразованием (образуется только одна пора) или только уменьшением габаритных размеров тела в результате обгара. Оценить долю протекания того или иного процесса предлагаемые модели позволяли только качественно. С использованием изложенных в [14] принципов нами были построены математические модели, описывающие изменения относительной удельной поверхности и относительного кажущегося объема образца (отношение текущего значения показателя к начальной величине) в процессе окисления сферических частиц: моделировали сажевые частицы и зерна графита. При построении моделей сделаны допущения о монодисперсности частиц (шар диаметром D_0), при окислении в теле образца образуется N сферических пор равного диаметра или уменьшаются внешние размеры тела при сохранении его формы. С учетом этих допущений относительную поверхность материала ($S_{отн}$) и его относительный кажущийся объем ($V_{отн}$) для случая только порообразования можно рассчитать по следующим формулам:

$$S_{отн} = \frac{1 + \sqrt[3]{Nq^2}}{1 - q^2} \quad (1)$$

$$V_{отн} = \frac{1}{1 - q} \quad (2)$$

Если окисление протекает только с изменением габаритных размеров образца, его кажущийся объем не меняется ($V_{отн} = 1$), а относительная поверхность равна

$$S_{отн} = \frac{1}{\sqrt[3]{1 - q}} \quad (3)$$

где q – степень окисления, т.е. отношение убыли массы образца при окислении к величине его исходной навески.

В реальных условиях одновременно протекают процессы порообразования и обгара, и экспериментально определенные значения относительной поверхности ($S^{эксп}$) и относительного кажущегося объема ($V^{эксп}$) складываются из поверхностей и объемов частиц, окислившись как с образованием пор, так и с обгаром. Математически это можно выразить следующим образом:

$$S^{эксп} = \alpha \frac{1 + \sqrt[3]{Nq^2}}{1 - q^2} + \beta \frac{1}{\sqrt[3]{1 - q}} \quad (4)$$

$$V^{эксп} = \alpha \frac{1}{1 - q} + \beta \quad (5)$$

где α и β – доли углерода, окислившегося с порообразованием и обгаром, соответственно.

Учитывая, что $\alpha + \beta = 1$, уравнения (4) и (5) можно записать как

$$S^{эксп} = \alpha \frac{1 + \sqrt[3]{Nq^2}}{1 - q^2} + \frac{1 - \alpha}{\sqrt[3]{1 - q}} \quad (6)$$

$$V^{эксп} = \alpha \frac{1}{1 - q} + (1 - \alpha) \quad (7)$$

Совместное решение уравнений (6) и (7) позволяет по экспериментальным значениям удельной поверхности образца, его кажущегося объема и степени окисления количественно оценить долю углерода, окислившегося в результате порообразования или обгара, и количество образовавшихся пор

$$\alpha = \frac{(1 - q)(V^{эксп} - 1)}{q}, \quad \beta = 1 - \alpha \quad (8)$$

$$N = \frac{[S^{эксп}(1 - q) - (1 - \alpha)\sqrt[3]{(1 - q)^2 - \alpha}]^3}{\alpha^3 q^2} \quad (9)$$

Данные о количестве образующихся пор, рассчитанные по уравнению (9), условны, но, как нам представляется, их достаточно для сравнения материалов не только на качественном уровне, но и количественном.

Целью настоящей работы явилось подтверждение предположения о влиянии протяженности границ кристаллитов углерода на скорость его окисления и оценка количества углерода, окисляющегося с порообразованием или обгаром при различных условиях проведения процесса.

Экспериментальная часть

Объектами исследования служил технический углерод марок N220 и N234, те же образцы, подвергнутые термообработке при температуре ~ 2300 °C (N220гр и N234гр). При расчете протяженности границ кристаллитов кристаллиты углерода рассматривались как круг диаметром L_a . Активирующими агентами выступали диоксид углерода и воздух, расходы которых варьировали от 5 до 50 мл/мин, а также водяной пар. Равномерность активации образца достигалась минимизацией навески образца, которая составляла 0.05÷0.10 г. Такое соотношение расхода окислителя и активируемого материала обеспечива-

ло время контакта τ , которое рассчитывали как отношение объема окисляемого образца к расходу окислителя, от ~ 0.2 до ~ 2.0 с. В процессе эксперимента регулярно фиксировали изменение массы образца, его адсорбционную поверхность и кажущийся объем (отношение объема образца к его массе). Время между замерами варьировали от 1 до 10 мин. Общая продолжительность экспериментов (в зависимости от условий и заданной степени окисления) составляла 10–180 мин. Степень окисления рассчитывали как отношение убыли массы образца к исходной навеске.

Исследования проводили на лабораторной установке проточного типа в области температур 450–1000 °С.

Размер сажевых частиц и удельную поверхность исходных и окисленных образцов определяли по методике КомпАС [15], в основе которой лежит низкотемпературная адсорбция азота.

Результаты и их обсуждение

При исследовании процесса пироуплотнения, который также следует рассматривать как топомическую реакцию [13], выявлено непостоянство скорости химической реакции во времени. Оно проявляется и для скорости в абсолютном выражении (мг/мин), и для скорости, отнесенной к единице поверхности (мг/(м²·мин)). Связано это с изменением в ходе процесса поверхности, доступной для осаждения смол, а также с изменением границ контактов, на которых происходила хемосорбция смол.

При окислении углеродных материалов их поверхность значительно меняется, однако это не отражается на скорости процесса (рис. 1). Видно, что характер изменения массы образца во времени имеет линейную зависимость, что свидетельствует о постоянстве скорости реакции.

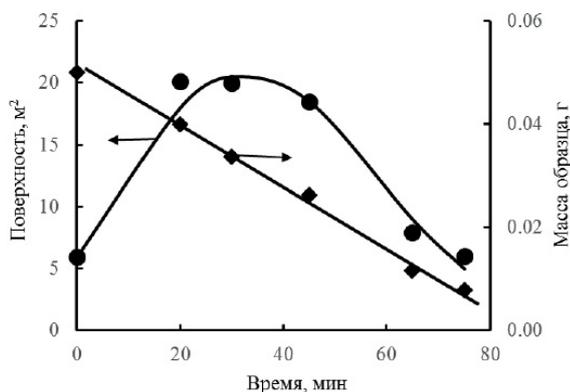


Рис. 1. Изменение адсорбционной поверхности и массы образца технического углерода марки N234 в процессе окисления: температура 550 °С, окисляющий агент – воздух, расход воздуха 5 мл/мин, время контакта 1.8 с.

Следует отметить, что при активации диоксидом углерода при степенях окисления $\sim 80\%$ наблюдается некоторое снижение скорости реакции.

При повышении температуры, а также при сокращении времени контакта скорость реакции увеличивается: при активации образца технического углерода N234 воздухом при 450 °С (время контакта 1.8 с) скорость реакции составляла ~ 0.23 мг/мин, при 700 °С (время контакта то же) она возросла до 0.46 мг/мин. Дальнейшее повышение температуры до 800 °С не приводило к увеличению скорости. Влияние расхода газа (времени контакта) на скорость реакции в значительной степени связано с температурой процесса. Так, в результате повышения расхода газа от 5 до 50 мл/мин при температуре 450 °С скорость реакции возросла от 0.23 до 0.53 мг/мин, а при 800 °С – от 0.46 до 4.18 мг/мин.

В случае активации образца технического углерода N234 диоксидом углерода скорости реакции были значительно ниже: при 900 °С скорость не превышала 0.5 мг/мин, а при 1000 °С – 2.5 мг/мин (расход CO₂ 40 мл/мин, время контакта 0.23 с). Наблюдаемое постоянство скорости реакции в ходе окисления подтверждает предположение, что адсорбция окисляющего агента происходит не по всей поверхности материала. Очевидно, базисные плоскости кристаллитов углерода, сформированные его гексагонами, инертны в адсорбции окисляющих агентов, и последние способны сорбироваться только по аморфному углероду, формирующему границы кристаллитов.

Ранее уже высказывалось предположение о том, что увеличение протяженности границ кристаллитов должно приводить к возрастанию скорости реакции. Справедливость этого предположения подтверждают результаты, приведенные в таблице.

При расчете протяженности границ кристаллитов сажевую частицу рассматривали как шар определенного диаметра и делали допущение, что кристаллиты имеют форму круга диаметром L_a и расположены параллельно поверхности частицы. Видно (таблица), что при возрастании протяженности границ кристаллитов скорость реакции увеличивается.

Изменение протяженности границ кристаллитов углерода приводит к изменению не только скорости процесса, но и характера его протекания (рис. 2). В результате сокращения границ контактов кристаллитов снижается число пор, образующихся при окислении, и увеличивается доля процессов, приводящих не к порообразованию, а к обгару образца.

Важно подчеркнуть, что соотношение процессов, протекающих с порообразованием или приводящим к обгару, не постоянно во времени. По мере развития процесса доля порообразования снижается. Возможно, это вызвано конкуренцией процессов диффузии окислителя вглубь поры и его

взаимодействием с более графитированным (менее реакционноспособным) углеродом, формирующим стенки поры. По той же причине, возможно, и не-

сколько замедляется скорость процесса, которая фиксировалась при высоких степенях окисления.

Влияние протяженности границ кристаллитов углеродного материала на скорость его окисления: температура 1000 °С, окисляющий агент CO₂, τ = 0.3 с

Исходный образец	Характеристики исходного образца			Скорость реакции окисления, мг/мин
	Средний размер частиц, нм	Размер кристаллитов углерода L _a , нм	Протяженность границ кристаллитов, нм	
N220гр	27	7.6	1200	0.15
N234гр	32	7.5	1700	0.36
N220	27	3.2	2900	0.79
N234	32	3.0	4300	0.88

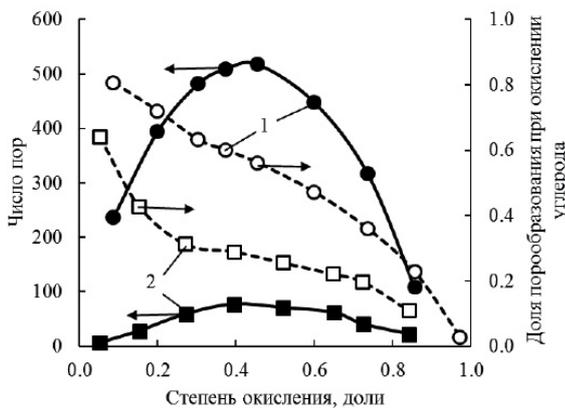


Рис. 2. Изменение количества образующихся пор и доли порообразования в процессе окисления образцов N220 (1) и N220гр (2): окисляющий агент – диоксид углерода, температура 1000 °С, время контакта 0.3 с.

На область протекания процесса и количество образующихся пор влияют также температура, природа и расход активирующего агента (рис. 3 и 4). Очевидно, что с повышением температуры снижается доля углерода, окисляющегося с образованием пор. К снижению порообразования приводит и увеличение расхода окислителя.

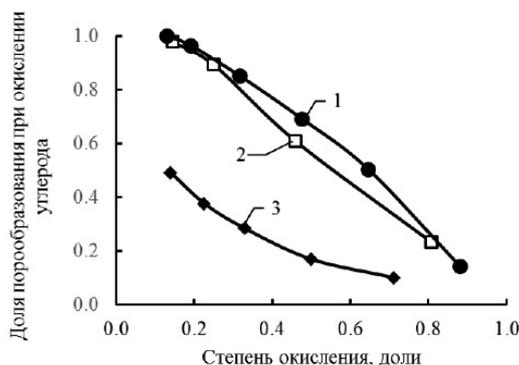


Рис. 3. Влияние условий и продолжительности активации на область протекания процесса (время контакта 1.8 с): 1 – окисляющий агент – диоксид углерода, температура 900 °С; 2 – окисляющий – агент воздух, температура 450 °С; 3 – окисляющий агент – воздух, температура 800 °С.

Из данных, приведенных на рис. 3, явствует, что соотношение между процессами порообразования и обгара при окислении тестируемого образца диоксидом углерода (температура 900 °С) и воздухом (температура 450 °С) сопоставимо. Однако при использовании диоксида углерода образуется большее число пор (рис. 4). Вероятно, именно этим объясняются большие значения удельной поверхности образца, достигнутые при использовании диоксида углерода. Так, при окислении технического углерода CO₂ был получен материал с удельной поверхностью более 1000 м²/г (степень окисления 0.48), а при окислении воздухом (степень окисления 0.46) удельная поверхность составляла 750 м²/г (условия активации соответствуют данным рис. 3 и 4). Представленные результаты позволяют также предположить, что при использовании активирующих агентов различной природы формируются поры разного размера.

Заключение

Полученные результаты подтвердили предположение о целесообразности рассмотрения реакции окисления углеродных материалов как топохимической. Такой подход создает предпосылки для прогнози-

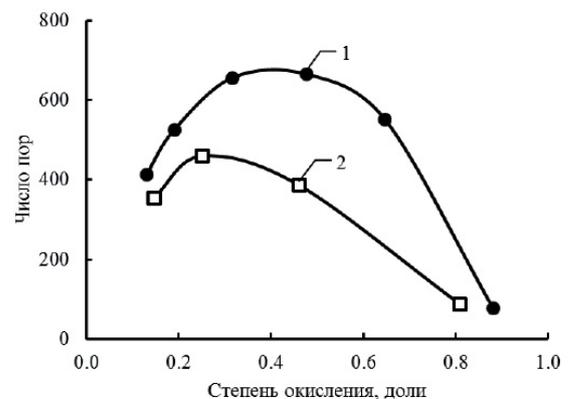


Рис. 4. Влияние условий и продолжительности активации на число образующихся пор (время контакта 1.8 с): 1 – окисляющий агент – диоксид углерода, температура 900 °С; 2 – окисляющий агент – воздух, температура 450 °С.

вания свойств образующегося материала. Связано это с тем, что, как показали результаты исследований, адсорбция активирующего агента происходит не по всей поверхности образца, а только по активным центрам, локализующимся на границах кристаллитов. Зная раз-

Список литературы:

1. Henschke B., Schubert H., Blocker J., Atamny F., Schlogi R. Mechanistic aspects of the reaction between carbon and oxygen // *Thermochim. Acta*. 1994. V. 234. P. 53–83.
2. Сергеев В.М. Химическое взаимодействие углеродных материалов с кислородсодержащими газами // *Химия твердого топлива*. 1999. № 6. С. 66–71.
3. Balykin V.P. Zum einfluss der mischbedingungen auf die bildung der bindemittelschicht in kohlenstoffpech-kompositionen / *Freiberger forschungshefte: Vorträge zum Bergund Hüttenmännischen Tag 1990 in Freiberg*. Leipzig, 1992. S. 118–129.
4. Herawan S.G., Ahmad M.A., Putra A., Yusof A.A. Effect of CO₂ flow rate on the Pinang frond-based activated carbon for methylene blue removal // *The Scientific World Journal*. Volume 2013. Article ID 545948, 6 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/545948>.
5. Ефремова О.А. Каталитические закономерности процессов газофазного окисления искусственных углеродных материалов: дис. ... канд. хим. наук. Челябинск, 2006. 145 с.
6. Бакланова О.Н., Князева О.А., Дроздов В.А., Гуляева Т.И., Талзи В.П., Лихолобов В.А., Суrowикин Ю.В., Горбунова О.В. Влияние условий модификации углеродного материала Сибунит на изменение его текстуры // *Химия твердого топлива*. 2015. Т. 49. № 1. С. 23–27. DOI: 10.7868/S002311771501003X.
7. 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. Т. 48. № 6. С. 26. DOI: 10.7868/S0023117714060036.
8. Бакланова О.Н., Лихолобов В.А., Лавренов А.В., Пучков С.С., Пьянова Л.Г. Регулирование свойств углеродных материалов семейства Сибунит для каталитических и сорбционных приложений // *Материалы 10-й Междунар. конф. «Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология»*. Россия, Москва, г. Троицк. 6–9 июня 2016 г. С. 52.
9. 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.
10. Мухин В.М., Тарасов А.В., Клущин В.Н. Ак-

меры кристаллитов исходного материала, можно заранее прогнозировать характер процесса, протекающего при окислении дисперсных углеродных материалов: будет ли преобладать при окислении порообразование или обгар.

References:

1. Henschke B., Schubert H., Blocker J., Atamny F., Schlogi R. Mechanistic aspects of the reaction between carbon and oxygen. *Thermochim. Acta*. 1994; 234: 53-83.
2. Sergeev V.M. Chemical interaction of carbon materials with oxygen-containing gases. *Khimiya tverdogo topliva = Solid Fuel Chemistry*. 1999; 6: 66-71. (in Russ.)
3. Balykin V.P. Zum einfluss der mischbedingungen auf die bildung der bindemittelschicht in kohlenstoffpech-kompositionen. *Freiberger forschungshefte: Vorträge zum Bergund Hüttenmännischen Tag 1990 in Freiberg*. Leipzig, 1992. S. 118-129.
4. Herawan S.G., Ahmad M.A., Putra A., Yusof A.A. Effect of CO₂ flow rate on the Pinang frond-based activated carbon for methylene blue removal. *The Scientific World Journal*. Volume 2013. Article ID 545948, 6 pages. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/545948>.
5. Efremova O.A. Catalytic regularities of gas-phase oxidation of artificial carbon materials: Ph.D. (Eng.) Thesis. Chelyabinsk, 2006. 145 p. (in Russ.)
6. Baklanova O.N., Knyazeva O.A., Drozdov V.A., Gulyaeva T.I., Talzi V.P., Likhobolov V.A., Surowikin Yu.V., Gorbunova O.V. Effect of the modification conditions of the carbon material Sibunit on its texture changes. *Solid Fuel Chemistry*. 2015; 49(1): 20-24. DOI: 10.7868/S002311771501003X.
7. Plaksin G.V., Baklanova O.N., Lavrenov A.V., Likhobolov V.A. Carbon materials from the Sibunit family and methods for controlling their properties. *Solid Fuel Chemistry*. 2014; 48(6): 349-355. DOI: 10.7868/S0023117714060036.
8. Baklanova O.N., Likhobolov V.A., Lavrenov A.V., Puchkov S.S., Pyanova L.G. Carbon materials properties regulation of the Sibunit family for catalytic and sorption applications. *Proceed. of the 10th Int. Conf. "Carbon: Fundamental Problems of Science, Materials Science, Technology"*. Russia, Moscow, Troitsk. 6–9 June 2016. P. 52. (in Russ.)
9. Pyanova L.G., Baklanova O.N., Likhobolov V.A., Lavrenov A.V., Sedanov A.V. Modified carbon sorbents: Synthesis, properties and application. *Proceed. of the 10th Int. Conf. "Carbon: Fundamental Problems of Science, Materials Science, Technology"*. Russia, Moscow, Troitsk. 6–9 June 2016. P. 359. (in Russ.)
10. Mukhin V.M., Tarasov A.V., Klushin V.N. Active carbons of Russia. Moscow: Metallurgiya Publ., 2000. 352 p. (in Russ.)

тивные угли России. М.: Металлургия, 2000. 352 с.

11. Теснер П.А., Головина Н.Б., Городецкий А.Е. Кинетика образования пироуглерода из метана // Химия твердого топлива. 1976. № 1. С. 129–135.

12. 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. Филимонов А.С., Пешнев Б.В., Сурувикин Ю.В., Трофимова Н.Н., Асилова Н.Ю. Влияние углеродной поверхности на закономерности образования пироуглерода // Вестник МИТХТ. 2014. Т. 9. № 6. С. 99–102.

14. Пешнев Б.В. Технология получения высокоадсорбционных материалов на основе углеродных нановолокон: дис. ... д-ра техн. наук. М.: МИТХТ, 2007. 288 с.

15. Печуро Н.С., Песин О.Ю., Эстрин Р.И., Ройтер Л.А. Метод комплексного анализа саж (метод «КомПАС») // Промышленность синтетического каучука, шин и резиновых технических изделий. 1987. № 2. С. 16–19.

11. Tesner P.A., Golovina N.B., Gorodetskii A.E. Kinetics of the formation of pyrolytic carbon from methane. *Khimiya tverdogo topliva* = Solid Fuel Chemistry. 1976. 1: 129-135. (in Russ.)

12. 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.)

13. Filimonov A.S., Peshnev B.V., Surovikin Yu.V., Trofimova N.N., Asilova N.Yu. Carbon surface influence on the pyrocarbon formation regularities. *Vestnik MITHT* (Fine Chemical Technologies). 2014; 12(6): 99-102. (in Russ.)

14. Peshnev B.V. Technology for obtaining highly absorbent materials based on carbon nanofibers: D.Sc. (Eng.) Thesis. Moscow, 2007. 288 p. (in Russ.)

15. Pechuro N.S., Pesin O.Yu., Estrin R.I., Roiter L.A. The method of complex analysis of soot (method "COMPAS"). *Promyshlennost' sinteticheskogo kauchuka, shin i rezinovich tekhnicheskikh izdelij* (Industry of Synthetic Rubber, Tires and Rubber Technical Products). 1987; 2: 16-19. (in Russ.)

Об авторах

Нгуен Ван Хуи, аспирант 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-т Вернадского, д. 86).

Филимонов Алексей Сергеевич, ассистент 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-т 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-т Вернадского, д. 86).

Николаев Александр Игоревич, доктор технических наук, доцент 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-т Вернадского, д. 86).

About the authors:

Van Huy Nguyen, Postgraduate Student, 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).

Alexey S. Filimonov, Assistant of 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. (Eng.), 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).

Alexander I. Nikolaev, D.Sc. (Eng.), Associate 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).