

МЕХАНИЗМ ОБРАЗОВАНИЯ ПИРОУГЛЕРОДА В ПРОЦЕССЕ ПИРОЛИЗА УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

Б.В. Пешнев, А.С. Филимонов, С.В. Баулин[@], О.С. Следзь, Н.Ю. Асилова

Московский технологический университет (Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова), Москва 119571, Россия

[@]Автор для переписки, e-mail: baulinsv@yandex.ru

Представлены экспериментальные результаты, подтверждающие механизм образования пироуглерода через стадии возникновения в газовой фазе высокомолекулярных продуктов пиролиза, их адсорбции на активных центрах подложки, локализующихся на границах контактов ее кристаллитов, и последующей карбонизации. Показано, что сокращение протяженности границ контактов кристаллитов подложки приводит к увеличению содержания в газе высокомолекулярных соединений и снижению концентрации водорода. Взаимосвязь между составом отходящего газа и поверхностью уплотняемого материала создает предпосылки для управления процессом пироуплотнения по составу отходящего газа. Идентифицирован состав высокомолекулярных жидких продуктов пиролиза. Установлено различие в составах высокомолекулярных продуктов пиролиза пропан-бутановой фракции и газа электрокрекинга. Показано влияние сырья и условий пиролиза на групповой состав образующихся высокомолекулярных продуктов пиролиза.

Ключевые слова: *пироуглерод, пиролиз, смолы пиролиза, высокомолекулярные соединения, гетерогенный фактор, активные центры.*

THE PYROCARBON FORMATION MECHANISM DURING THE HYDROCARBON PYROLYSIS PROCESS

B.V. Peshnev, A.S. Filimonov, S.V. Baulin[@], O.S. Sledz, N.Yu. Asilova

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

[@]Corresponding author e-mail: baulinsv@yandex.ru

Experimental results confirming the mechanism of pyrocarbon formation through the steps of high-molecular pyrolysis products forming in the gas phase are presented. Adsorption of high-molecular pyrolysis products on the active centers of the substrate localized at the boundaries of the contacts of its crystallites and their subsequent carbonization is confirmed. The decreasing in the length of the substrate crystallites contact boundaries leads to the increase in the content of high-molecular compounds in the gas and to the decrease in the hydrogen concentration is shown. The relation between the composition of the exhaust gas and the surface of the sealing material creates the prerequisites for controlling the pyro-consolidation process according the composition of the off-gas. The composition of high-molecular liquid pyrolysis products was identified. The difference in the composition of high-molecular pyrolysis products of the propane-butane fraction and the electric cracking gas was established. The influence of raw materials and pyrolysis conditions on the group composition of high-molecular pyrolysis products formed is shown.

Keywords: *pyrocarbon, pyrolysis, pyrolysis resins, high-molecular compounds, heterogenetic factor, active centers.*

Введение

Изучению закономерностей формирования отложений пироуглерода уделяется большое внимание. Это обусловлено тем, что только осаждением пироуглерода в порах матрицы можно обеспечить максимальное уплотнение углерод-углеродных материалов. Формирование пироуглеродного слоя также является необходимой стадией в производстве высокоэффективных углеродных материалов семейства сибунита, нашедших применение в качестве сорбентов и носителей катализаторов, накопителей электрической энергии [1–3]. Среди работ, посвященных выявлению механизма образования пироуглерода, представляется целесообразным выделить публикации [4–7].

Авторы [4–6] рассматривают образование пироуглерода как ряд последовательных превращений:

- возникновение в газовой фазе высокомолекулярных соединений (продуктов пиролиза углеводородов);
- адсорбция этих соединений на поверхности (подложке);
- последующие полимеризация и дегидрогенизация адсорбированных продуктов.

В то же время в работе [7] выдвинуто предположение, что формирование пироуглеродных отложений происходит не по всей поверхности подложки одновременно, а начинается с возникновения зародышей, локализуемых на активных центрах. По мере роста зародыши объединяются и формируют сплошной слой пироуглерода.

Обобщение представленной информации позволяет предположить, что адсорбция высокомолекулярных соединений (ВМС) происходит не по всей поверхности подложки. Наши исследования [8, 9] подтвердили справедливость модели образования пироуглерода П.А. Теснера [7] и показали, что активными центрами образования пироуглерода являются дефекты кристаллической решетки подложки, локализованные на границах контактов ее кристаллитов. Полученные сведения позволяют считать, что количество активных центров, на которых происходит адсорбция ВМС, не постоянно во времени, что согласуется с результатами работы [11]. В таком случае логично предположить, что при образовании пироуглерода концентрация ВМС в газовой фазе будет изменяться во времени, и, фиксируя ее, можно контролировать ход процесса пироуплотнения.

Целью работы явилось подтверждение предположения об изменении содержания ВМС в газообразных продуктах пиролиза во времени, взаимосвязи концентрации ВМС со скоростью отложения пироуглерода и идентификация ВМС.

Экспериментальная часть

Эксперименты проводили в кварцевом реакторе диаметром 10–12 мм и длиной ~250 мм в диапазоне температур 650–900 °С.

Принципиальная схема лабораторной установки приведена на рис. 1.

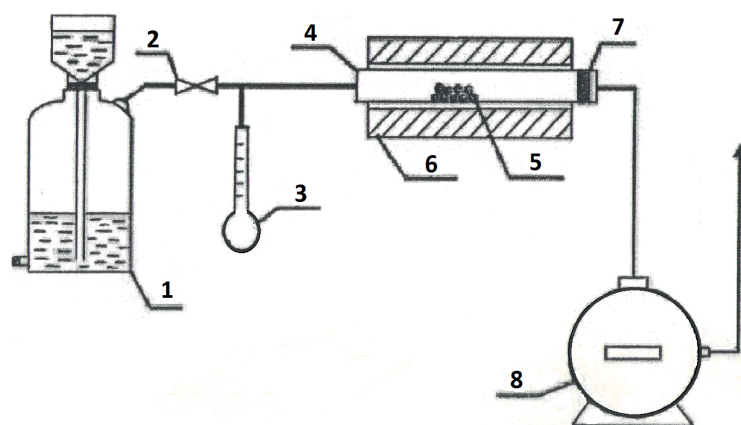


Рис. 1. Принципиальная схема лабораторной установки: 1 – газометр; 2 – вентиль регулировки расхода газа; 3 – реометр; 4 – реактор; 5 – тестируемый образец; 6 – электропечь; 7 – фильтр; 8 – газовый барабанный счетчик ГСБ-400.

Газ из газометра (1) подавали в кварцевый реактор (4), обогреваемый электропечью (6). Расход газа контролировали реометром (3) и регулировали вентилем (2). Температуру в печи регистрировали хромель-алюмелевой термопарой в комплекте с ТРМ «Овен» и варьировали путем изменения напряжения, подаваемого на клеммы печи. В центральной части реактора располагался тестируемый образец (5), по изменению массы которого судили о количестве от-

ложившегося пироуглерода. На выходе из реактора установлен фильтр (7) для улавливания ВМС, выходящих из реактора. Количество отходящего газа фиксировали газовым счетчиком ГСБ-400 (8).

Подложкой, на которую осаждали пироуглерод, служил технический углерод (ТУ) марки N234 (исходный) и подвергнутый предварительной графитации (N234гр). Графитацию ТУ проводили его термообработкой в течение 4 ч при температурах

2300–2400 °С в неокислительной среде в присутствии галогенов. В результате графитации увеличивались размеры кристаллитов углерода, размеры сажевых частиц при этом практически не изменялись, что согласуется с данными [10]. Средний размер сажевых частиц, рассчитанный по описанной в [11–13] методике, составлял ~32 нм. Параметр кристаллитов углерода L_a , который рассчитывали по формуле Шеррера, исходя из данных рентгеновской порошковой дифракции образцов [14], составлял 3.1 нм для образца N234 и 7.5 нм для N234гр. Заметим, что изменение размеров кристаллитов углерода при условии постоянства внешней поверхности сажевой частицы позволяло варьировать протяженность границ их контактов и количество активных центров, на которых могут адсорбироваться ВМС, образующиеся при пиролизе. Удельная поверхность образцов, определенная по низкотемпературной адсорбции азота, составляла ~ 130 м²/г; навески образцов ~0.05 и 0.10 г. Такой подбор образцов и их загрузок в реакционную зону позволял установить взаимосвязь между гетерогенным фактором, поверхностью, на которой осаждается пироуглерод (количеством активных центров, на которых формируются зародыши пироуглерода) и содержанием ВМС в газовой фазе. Результаты экспериментов сопоставляли с результатами, полученными на «пустом» реакторе, не содержащем подложки.

Гетерогенный фактор находили как отношение поверхности реакционной зоны к ее объему. Для

«пустого» реактора он был равен 300–400 м⁻¹. В присутствии ТУ вклад стенок реактора (0.008–0.009 м²) в поверхность реакционной зоны был ничтожен, а объем реакционной зоны при этом практически не менялся (объем навески составлял 0.03–0.05 см³). При загрузке в реактор ~0.05 г ТУ гетерогенный фактор составлял 250000–300000 м⁻¹, а при загрузке ~0.10 г ТУ – 460000–650000 м⁻¹.

О содержании ВМС в газовой фазе судили по изменению массы фильтра, установленного на выходе из реактора. По окончании эксперимента ВМС удаляли с фильтра растворителем, а их состав определялся на хроматографе Кристалл 5000.1 UniChrom с пламенно-ионизационным детектором. Делительная колонка Rtx-1 PONA 100 м × 0.25 мм × 0.5 мкм. Температура термостата колонок: начальная 40 °С, конечная – 220 °С, скорость подъема температуры 1.8 °С/мин.

ВМС и пироуглерод получали пиролизом пропан-бутановой фракции (ПБФ) или ацетиленсодержащего газа электрокрекинга, состав которого приведен в табл. 1. Расходы газов подбирали таким образом, чтобы суммарное содержание углерода в углеводородах сырья было сопоставимо. Составы исходного и конечного газов определяли на хроматографе 3700. Детектор – катарометр, ток моста 90 мА. Хроматографическая фаза – γ -Al₂O₃, промотированный NaOH. Длина колонки 7 м, диаметр 3 мм. Температура термостата колонок: начальная 60 °С, конечная 100 °С, скорость подъема температуры 5 °С/мин. Газ-носитель – азот, расход 4 л/ч.

Таблица 1. Изменение состава отходящего газа в процессе пироуплотнения. Температура пироуплотнения 700 °С, гетерогенный фактор в начале процесса ~ 260000 м⁻¹

Время от начала процесса, мин	Содержание компонента в газе, % об.								
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆	C ₂ H ₂	C ₄ H ₁₀	C ₄ H ₈
0 (исходный газ)	32.1	5.9	1.5	10.2	1.4	1.1	24.8	9.9	13.1
3	45.0	12.9	2.6	12.1	2.7	4.2	12.4	4.7	3.4
40	43.8	12.7	2.4	13.4	2.0	3.9	13.3	4.9	3.6
80	42.2	11.5	2.4	13.6	1.8	4.0	14.6	4.8	5.1
120	39.1	11.3	2.1	13.5	1.9	3.6	17.6	5.7	5.2
160	37.4	10.4	1.9	12.8	1.5	3.9	19.2	6.1	6.8
с 5 по 90 (эксперимент проводили в «пустом реакторе»)	36.8	10.0	1.7	12.5	1.6	3.8	20.3	6.2	7.1

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 показано изменение массы смол, уловленных, установленным на выходе из реактора фильтром.

Очевидно, что повышение температуры пиролиза приводит к возрастанию содержания ВМС в газовой фазе. Следует отметить, что содержание ВМС в газовом потоке зависит не только от температуры пиролиза, но и от гетерогенного фактора. Увеличение гетерогенного фактора (появление в реакционной

зоне дополнительной осадительной поверхности) приводит к возрастанию доли ВМС, осаждающихся в реакционной зоне, и снижению их концентрации в газовом потоке, выходящем из реактора.

Образовавшиеся при пиролизе продукты уплотнения адсорбируются в порах подложки (навески ТУ) и карбонизируются, образуя слой пироуглерода. В результате адсорбционная поверхность подложки и гетерогенный фактор снижаются, что, в свою очередь, влечет увеличение содержания ВМС в газовой фазе (рис. 3).

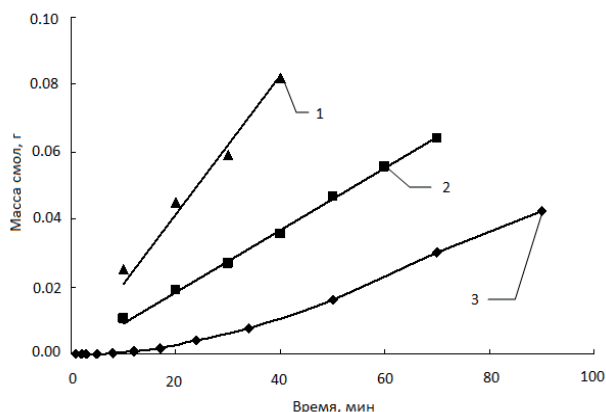


Рис. 2. Изменение массы смол, уловленных фильтром в процессе пиролиза ПБФ:
 1 – температура пиролиза 900 °С, «пустой» реактор;
 2 – температура пиролиза 735 °С, «пустой» реактор;
 3 – температура пиролиза 735 °С, масса подложки (N234) 0.0464 г.

Необходимо обратить внимание на результаты, полученные при пироуплотнении графитированного и неграфитированного образцов ТУ (зависимости 1 и 2 на рис. 3). При одинаковой массе загрузки образца в реакционную зону (~0.05 г) и сопоставимой адсорбционной поверхности (~6.5 м²) динамика изменения гетерогенного фактора в процессе их пироуплотнения и содержание ВМС в газовой фазе существенно различаются. При пироуплотнении образца технического углерода марки N234 (вне зависимости от массы исходной навески) на первых этапах процесса отмечается некоторое увеличение гетерогенного фактора, и только затем он начинает снижаться. В случае пироуплотнения образца N234гр гетерогенный фактор снижается сразу после начала пиролиза, однако в этом случае на последних стадиях процесса его значения были наибольшими. Подобное изменение гетерогенного фактора в процессе пироуплотнения образцов N234 и N234гр соответствует изменению их удельной поверхности и может быть объяснено с точки зрения двухстадийной модели механизма образования пироуглерода [7–9].

Большого внимания заслуживает факт, что содержание ВМС в газовом потоке пиролиза, проходящем над образцом N234гр, выше, чем содержание ВМС в потоке, проходящем над образцом N234 (температуры пиролиза, расходы газов и гетерогенные факторы сопоставимы). Это подтверждает предположение об адсорбции ВМС на активных центрах, локализующихся на границах контактов кристаллитов подложки. Увеличение размеров кристаллитов подложки L_a от 3.1 нм (образец N234) до 7.5 нм (образец N234гр) сопровождается сокращением протяженности границ их контактов [9] (снижением количества дефектов, как центров адсорбции) и приводит к увеличению содержания ВМС в газовом потоке.

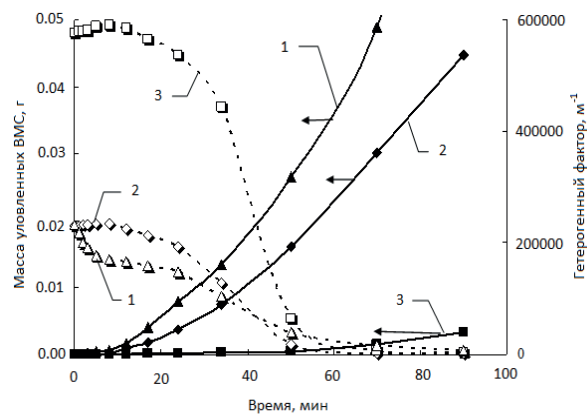


Рис. 3. Изменение гетерогенного фактора и массы уловленных ВМС в процессе пиролиза ПБФ. Температура 735 °С; подложка: 1 – образец N234гр, масса ~0.05 г; 2 – образец N234, масса ~0.05 г; 3 – образец N234, масса ~0.10 г.

В качестве подтверждения предположения об адсорбции ВМС на активных центрах и их последующей карбонизации с образованием пироуглерода служит взаимосвязь динамики изменения массы отложившегося пироуглерода и уловленных ВМС (рис. 4). Снижение скорости отложения пироуглерода сопровождается повышением содержания ВМС в газовой фазе.

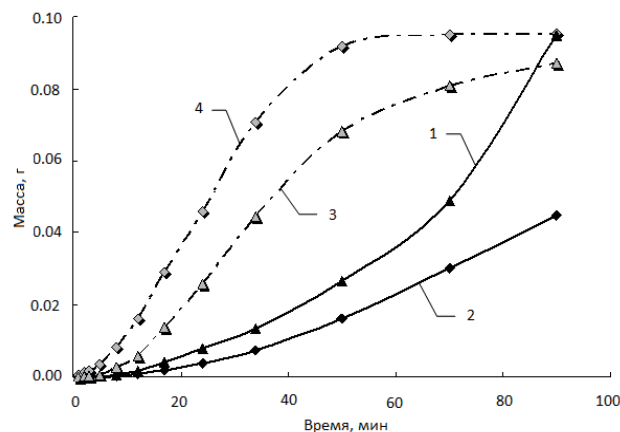


Рис. 4. Динамика изменения массы уловленных ВМС (1, 2) и отложившегося пироуглерода (3, 4) в процессе пироуплотнения образцов N234гр (1, 3) и N234 (2, 4). Исходный газ – ПБФ, температура 735 °С, начальные значения гетерогенного фактора ~ 260000 м⁻¹.

В связи с тем, что формирование пироуглерода на подложке происходит в результате карбонизации адсорбированных ВМС, состав отходящего газа должен зависеть от гетерогенного фактора. Известно [15, 16], что на заключительных стадиях коксования твердых горючих ископаемых и нефтяных остатков основными компонентами отходящего газа являются водород и метан. Поэтому логично допустить, что состав отходящего газа, полученного на «пустом» реакторе, будет отли-

чатся от состава газа, образующегося в присутствии подложки, большим содержанием этих компонентов. В табл. 1 представлены данные о составе газа электрокрекинга, составе газа, полученного на «пустом» реакторе, и динамике изменения состава газа, образующегося в процессе пироуплотнения образца N234.

На начальных этапах пироуплотнения, при больших значениях гетерогенного фактора ВМС, образовавшиеся при пиролизе, преимущественно адсорбируются на подложке и подвергаются «вторичному» разложению (карбонизации). В результате отходящий газ обогащается дополнительными количествами водорода и метана, а содержание в нем других компонентов меньше, чем в составе газа, полученного на «пустом» реакторе. По мере заполнения пор подложки пироуглеродом и блокировки им активных центров адсорбция ВМС снижается, соответственно, снижается и эмиссия водорода, метана, этена в газовую фазу, и состав газа постепенно приближается к составу газа, полученному на «пустом» реакторе.

Некоторые результаты анализа ВМС, образующихся в процессе пиролиза ПБФ и газа электрокрекинга, полученные методом хромато-масс-спектрометрии, приведены в табл. 2. Стоит обратить внимание на существенное влияние состава сырья на групповой состав образующихся ВМС. Продукты уплотнения, образовавшиеся при пиролизе газа электрокрекинга, содержат значительно больше аренов и гибридных углеводородов, чем высокомолекулярные продукты пиролиза ПБФ. При этом 2/3 из этих углеводородов содержат в молекуле два и более колец. Более высокая степень ароматизации высокомолекулярных продуктов пиролиза газа электрокрекинга по сравнению с высокомолекулярными продуктами пиролиза ПБФ объясняет большую скорость образования пироуглерода (на ~30%) в том случае, когда его получают разложением ацетиленсодержащего газа по сравнению с результатами, достигнутыми при пиролизе ПБФ.

Таблица 2. Влияние сырья и условий пиролиза на групповой состав образующихся ВМС

Групповой состав ВМС	Газ, подаваемый на пиролиз		
	Пропан-бутановая фракция		Газ электрокрекинга
	Температура пиролиза, °С		
	735	900	720
Алканы	33.4	36.3	6.6
Алкены и диены	16.6	18.2	13.4
Углеводороды циклического строения:	50.0	45.5	80.0
из них			
Бензола и его гомологов	66.6	60.0	33.3
Нафталина и его гомологов	16.7	20.0	16.7
Антрацена, фенантрена и их гомологов	-	-	16.7
Тетрациклических ареновых углеводородов	-	-	8.3
Полициклических углеводородов гибридного строения	16.7	20.0	25.0

Заключение

Представленные данные подтвердили предположение о механизме образования пироуглерода через стадии возникновения в газовой фазе высокомолекулярных продуктов пиролиза, их адсорбции на активных центрах, локализуемых на границах контактов фаз кристаллитов, и последующей карбонизации.

Особо следует отметить установленную взаимосвязь между поверхностью пироуплотняемого материала и составом отходящего газа. В настоящее время при создании углерод-углеродных материалов подачу углеводорода в реакционный объем ведут в

течение регламентированного времени (при непрерывной организации процесса) или заполняют автоклав углеводородом регламентированное количество раз (в случае периодического процесса), после чего определяются характеристики материала и, при необходимости, операции повторяются. Установленные закономерности создают предпосылки для управления процессом пироуплотнения по содержанию в отходящем газе ВМС, водорода и алканов C1÷C3. По мере заполнения пористого пространства подложки пироуглеродом содержание в отходящих газах ВМС увеличивается, а водорода и алканов C1÷C3 – снижается.

Список литературы:

1. Смирнова Н.С., Шляпин Д.А., Суровикин Ю.В., Аношкина Е.А., Темерев В.Л., Шитова Н.Б., Цырульников П.Г. Влияние углеродного носителя на каталитические характеристики Pd/сибунит и Pd-

References:

1. Smirnova N.S., Shlyapin D.A., Surovikin Yu.V., Anoshkina E.A., Temerev V.L., Shitova N.B., Tsyruльников P.G. The influence of the carbon support on the catalytic characteristics of Pd / sibunite and Pd-Ga / sibunite during

Ga/сибунит в процессе жидкофазного гидрирования ацетилена // *Химия Твердого Топлива*, 2015. № 1. С. 17–22.

2. Суrowикин Ю.В., Шайтанов А.Г., Резанов И.В. Электропроводность частиц нанокompозита на основе технического углерода // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2016. Т. 3. № 1. С. 296–300.

3. Суrowикин Ю.В., Лихолобов В.А., Сырьева А.В. Свойства пироуглеродной матрицы гранулированного нанокompозита // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2016. Т. 3. № 1. С. 288–295.

4. Grisdale R.O. The formation of black carbon // *J. Appl. Phys.* 1953. V. 24. № 9. P. 1082–1091.

5. Grisdale R.O. The formation of carbon black // *J. Appl. Phys.* 1953. V. 24. № 9. P. 1288–1296.

6. Костиков В.И. Углерод-углеродные композиционные материалы // *ЖВХО им. Д.И. Менделеева*. 1989. Т. 34. № 5. С. 492–501.

7. Теснер П.А., Городецкий А.Е., Бородин Л.М., Денисевич Е.В., Ляхов А.Г. Двухстадийная модель образования пироуглерода и ее экспериментальная проверка // *ДАН СССР*. 1977. Т. 235. № 2. С. 410–413.

8. Филимонов А.С., Пешнев Б.В., Асилова Н.Ю. Механизм образования пироуглерода на поверхности технического углерода // *Вестник МИТХТ*. 2013. Т. 8. № 3. С. 112–116.

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

10. Суrowикин Ю.В., Шайтанов А.Г., Сырьева А.В., Резанов И.В. Свойства частиц нанодисперсного технического углерода после термического воздействия // В сб.: *Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства. Материалы 5-й Междунар. науч.-техн. конф.* 2015. С. 119–120.

11. Эстрин Р.И. Разработка метода комплексного анализа сажа (технического углерода): дис. ... канд. техн. наук. М., 1988. 173 с.

12. Песин О.Ю., Эстрин Р.И. Метод комплексного анализа сажа (КомпАС) и перспективы его использования // *Химия твердого топлива*. 1997. № 3. С. 14–28.

13. Эстрин Р.И. Информационные возможности метода комплексного анализа сажа // *Наука и технология углеводородов*. 2000. № 4 (11). С. 92–101.

14. Гусев А.И. Наноструктуры, наноматериалы, нанотехнологии. М.: Физматлит, 2007. 416 с.

15. Химические вещества из угля / под ред. Фальбе Ю. М.: Химия, 1980. 616 с.

16. Сюняев З.И. Нефтяной углерод. М.: Химия, 1980. 271 с.

the liquid phase hydrogenation of acetylene // *Khimiya tverdogo topliva (Solid Fuel Chemistry)*. № 1. P. 17–22. (in Russ.).

2. Surovikin Yu.V., Shaytanov A.G., Rezanov I.V. Electrical conductivity of nanocomposite particles based on carbon black // *Dinamika system, mekhanizmov i mashin (The dynamics of Systems, Mechanisms and Machines)*. 2016. V. 3. № 1. P. 296–300. (in Russ.).

3. Surovikin Yu.V., Lykholobov V.A., Syrieva A.V. Properties of the pyrolytic matrix of a granular nanocomposite // *Dinamika system, mekhanizmov i mashin (The dynamics of Systems, Mechanisms and Machines)*. 2016. V. 3. № 1. P. 288–295. (in Russ.).

4. Grisdale R.O. The formation of black carbon // *J. Appl. Phys.* 1953. V. 24. № 9. P. 1082–1091.

5. Grisdale R.O. The formation of carbon black // *J. Appl. Phys.* 1953. V. 24. № 9. P. 1288–1296.

6. Kostikov V. I. Carbon-carbon composite materials // *ZhVHO im. D.I. Mendeleeva (Mendeleev Chemistry Journal)*. 1989. V. 34. № 5. P. 492–501. (in Russ.).

7. Tesner P.A., Gorodetsky A.E., Borodina L.M., Denisevich E.V., Lyahov A.G. Two-stage model of pyrocarbon formation and its experimental verification // *DAN SSSR (Reports of the Academy of Sciences of the USSR)*. 1977. V. 235. № 2. P. 410–413. (in Russ.).

8. Filimonov A.S., Peshnev B.V., Asilova N.Yu. The mechanism of pyrolytic carbon formation on the carbon black surface // *Vestnik MITHT (Fine Chemical Technologies)*. 2013. V. 8. № 3. P. 112–116. (in Russ.).

9. Filimonov A.S., Peshnev B.V., Surovikin Yu.V., Trofimova N.N., Asilova N.Yu. Influence of the carbon surface on the pattern of pyrolytic carbon formation // *Vestnik MITHT (Fine Chemical Technologies)*. 2014. V. 9. № 6. P. 99–102. (in Russ.).

10. Surovikin Yu.V., Shaytanov A.G., Syrieva A.V., Rezanov I.V. The properties of particles of nanodispersed technical carbon after thermal exposure // In book: *Tekhnika i tekhnologiya nephtekhimicheskogo i nephtegazovogo proizvodstva (Technique and technology of petrochemical and oil and gas production)*. The Materials of the 5th Int. scientific and technical conf. 2015. P. 119–120. (in Russ.).

11. Estrin R.I. Development of a method for the integrated analysis of soot (carbon black): The diss. ... Ph.D. (Engineering). Moscow, 1988. 173 p. (in Russ.).

12. Pesin O.Yu., Estrin R.I. The method of complex analysis of soot (CompAS) and the prospects for its use // *Khimiya tverdogo topliva (Solid Fuel Chemistry)*. 1997. № 3. P. 14–28. (in Russ.).

13. Estrin R.I. Information capabilities of the method of complex analysis of soot // *Nauka i tehnologiya uglevodorodov (Science and Technology of Hydrocarbons)*. 2000. № 4 (11). P. 92–101. (in Russ.).

14. Gusev A.I. Nanostructures, nanomaterials, nanotechnologies. Moscow: Phismatlit Publ., 2007. 416 p. (in Russ.).
15. Chemicals from coal / Ed. by Falbe Yu. Moscow: Khimiya Publ., 1980. 616 p. (in Russ.).
16. Sunyaev Z.I. Oil carbon. Moscow: Khimiya, Publ., 1980. 271 p. (in Russ.).

Об авторах:

Пешнев Борис Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

Филимонов Алексей Сергеевич, ассистент кафедры технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

Баулин Сергей Вячеславович, аспирант кафедры технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

Следзь Ольга Сергеевна, студентка кафедры технологии нефтехимического синтеза и искусственного жидкого топлива Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

Асилова Нина Юрьевна, доцент кафедры органической химии Института тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).