

УДК 678.046.3

**В. В. Боброва¹, Н. Р. Прокопчук¹,
С. А. Ефремов², С. В. Нечипуренко²**

¹Белорусский государственный технологический университет

²Казахский национальный университет имени аль-Фараби

УГЛЕРОД-КРЕМНИСТЫЙ НАПОЛНИТЕЛЬ ДЛЯ ЭЛАСТОМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Разработка полимерных композиционных материалов с использованием различных экологически чистых наполнителей является областью активных исследований. Основная цель данной работы заключается в изучении структуры и химического состава углерод-кремнистого композита (УКК), полученного путем карбонизации смеси рисовой шелухи и рисового стебля в пиролизной печи без доступа кислорода, при температуре 550–600°C, до и после механоактивации. Химический состав УКК определен методом рентгенофазового анализа. Установлено, что композит состоит из углерода (35,0–60,0 ± 2,0%), диоксида кремния (30,0–50,0 ± 2,0%) и примесей оксидов металлов различной природы, а также содержит аморфную фракцию оксида кремния. Изучены основные физико-химические характеристики углерод-кремнистого композита. Методом сканирующей электронной микроскопии исследована структура композита. Выявлено, что она представляет собой в основном агрегаты со средним размером частиц 50,9 мкм, состоящие из слоистых образований с развитой внутренней системой пор. Определена площадь поверхности композита методом многоточечной адсорбции газов азота по методу БЭТ, которая составляет 36 м²/г. Осуществлена механоактивация УКК путем измельчения в вибрационной и планетарной мельницах при различном времени. Зафиксировано, что продолжительность механоактивации углерод-кремнистого композита способствует увеличению удельной поверхности композита.

Ключевые слова: рисовая шелуха, механоактивация, углерод, диоксид кремния, активность.

Для цитирования: Боброва В. В., Прокопчук Н. Р., Ефремов С. А., Нечипуренко С. В. Углерод-кремнистый наполнитель для эластомерных композиций // Труды БГТУ. Сер. 2, Химические технологии, биотехнологии, геоэкология. 2022. № 1 (253). С. 89–95.

**V. V. Bobrova¹, N. R. Prokopchuk¹,
S. A. Efremov², S. V. Nechipurenko²**

¹Belarusian State Technological University

²Al-Farabi Kazakh National University

CARBON-SILICON FILLER FOR ELASTOMER COMPOSITIONS

The development of polymer composite materials using various environmentally friendly fillers is an area of active research. The main purpose of this work is to study the structure and chemical composition of a carbon-silicon composite (CSC) obtained by carbonization of a mixture of rice husks and a rice stalk in a pyrolysis furnace, without oxygen, at a temperature of 550–600°C, before and after mechanical activation. The chemical composition of CSC was determined by X-ray phase analysis. It has been established that the composite consists of carbon 35.0–60.0 ± 2.0%, silicon dioxide 30.0–50.0 ± 2.0%, and impurities of metal oxides of various nature. It has been established that CSC contains an amorphous fraction of silicon oxide. The main physicochemical characteristics of the carbon-silicon composite have been studied. The structure of the composite was studied by scanning electron microscopy. It has been established that the structure of the CSC is mainly aggregates with an average particle size of 50.9 μm, consisting of layered formations with a developed internal system of pores. The surface area of the composite was determined by the method of multipoint adsorption of nitrogen gases according to the BET method, which is 36 m²/g. The mechanical activation of the CSC was carried out by grinding in a vibratory and planetary mill at different times. It has been established that the duration of mechanical activation of the carbon-silicon composite contributes to an increase in the specific surface area of the composite.

Key words: rice husk, mechanical activation, carbon, silicon dioxide, activity.

For citation: Bobrova V. V., Prokopchuk N. R., Efremov S. A., Nechipurenko S. V. Carbon-silicon filler for elastomer compositions. *Proceedings of BSTU, issue 2, Chemical Engineering, Biotechnologies, Geoecology*, 2022, no. 1 (253), pp. 89–95 (In Russian).

Введение. Нестабильность цен, экологические проблемы и высокие затраты на производство технического углерода, который является основным наполнителем в резиновой промышленности [1–3], стимулируют проведение исследований, нацеленных на создание новых типов наполнителей, отвечающих современным требованиям, предъявляемым к ингредиентам для производства резины. Среди них могут быть наполнители, полученные из природного сырья [4]. Возобновляемое сырье растительного происхождения является доступным и достаточно дешевым источником для производства ингредиентов и эластомерных композиций. Широко распространенным натуральным растительным сырьем для производства аморфного кремнезема является рисовая шелуха (РШ) и рисовая лузга [5, 6] – органические отходы, которые производятся в больших количествах. РШ – основной побочный продукт производства риса, который представляет собой волокна на основе целлюлозы и содержит приблизительно 20% кремнезема [7, 8]. Диоксид кремния является основным минеральным компонентом РШ, которая также содержит примеси металлов, процентное содержание каждого при этом составляет меньше 1% [9–10]. При сжигании РШ может быть получено около 20% золы [11, 12], которая в свою очередь содержит около 87–98% диоксида кремния [13, 14].

Ранее [15] нами проведено исследование химического состава и поверхности углерод-кремнистого композита. Целью данной работы стало исследование влияния процесса механоактивации на важнейшие характеристики УКК, определяющие его усиливающую способность: удельная поверхность частиц, их морфология (структура), пористость (количество и размер пор), наличие функциональных групп на поверхности.

Основная часть. Для получения углерод-кремнистого композита рисовый стебель (РС) измельчали на роторно-ножевой мельнице до фракции 5,0 мм. Затем смешивали рисовый стебель и рисовую шелуху в пропорции 2,0:0,5 или 0,5:2,0 соответственно. Высушенная композиция подвергалась процессу карбонизации в пиролизной печи без доступа кислорода, при температуре 550–600°C. Далее полученный карбонизат измельчали до фракции ниже 25,0 мкм.

Полученный дисперсный материал – углерод-кремнистый композит, является готовым продуктом для использования в качестве наполнителя для эластомерных композиций, а также в виде углеродного наполнителя для композиционных материалов и имеет химический состав, полученный рентгеноспектральным анализом (табл. 1).

Таблица 1

Химический состав углерод-кремнистого композита

Химический состав	Содержание, %
Углерод	47,26
SiO ₂	50,38
Na ₂ O	0,04
MgO	0,16
Al ₂ O ₃	0,01
P ₂ O ₅	0,11
K ₂ O	1,72
CaO	0,28
TiO ₂	0,01
MnO	0,02
Fe ₂ O ₃	0,01

Как видно из табл. 1, карбонизат включает углеродсодержащую и минеральную части, в состав которых входят компоненты в количестве, достаточном для производства активированного углеродного материала и диоксида кремния. Т. е. карбонизат может являться объектом исследований для процессов выделения диоксида кремния из минеральной составляющей и активации для углеродсодержащей составляющей.

Были исследованы основные физико-химические характеристики УКК:

- плотность – 0,5 кг/м³;
- фракция помола – ниже 25,0 мкм;
- pH водной суспензии – 7–9;
- абсорбция дибутилфталата 100 – от 45 до 90 см³/100 г;
- зольность (более 90% SiO₂) – до 45%;
- содержание углерода – до 50%;
- содержание летучих веществ – не более 5%;
- удельное электросопротивление – 218 54,4 Ом·м·10⁻⁶;
- удельная теплота сгорания – 2700 ккал/кг;
- содержание Fe₂O₃ – не более 0,04%;
- содержание общего фосфора – не более 0,05%;
- содержание общей серы – не более 0,03%;
- насыпная плотность – 420 кг/м³;
- структура – аморфная.

Морфологию и структуру образца УКК анализировали на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-5610 LV при разном увеличении (рис. 1).

Из приведенных микрофотографий видно, что структура УКК представляет собой в основном агрегаты со средним размером частиц 50,9 мкм, состоящие из слоистых образований с развитой внутренней системой пор (рис. 1, б). Как известно [16], кремний, образующийся в процессе естественной эволюции рисовой шелухи, распределяется в материале в виде монокремниевой кислоты, которая перемещается к внешней оболочке шелухи, где в результате испарения и концентрирования она превращается в целлюлозно-кремнеземную мембрану [17, 18].

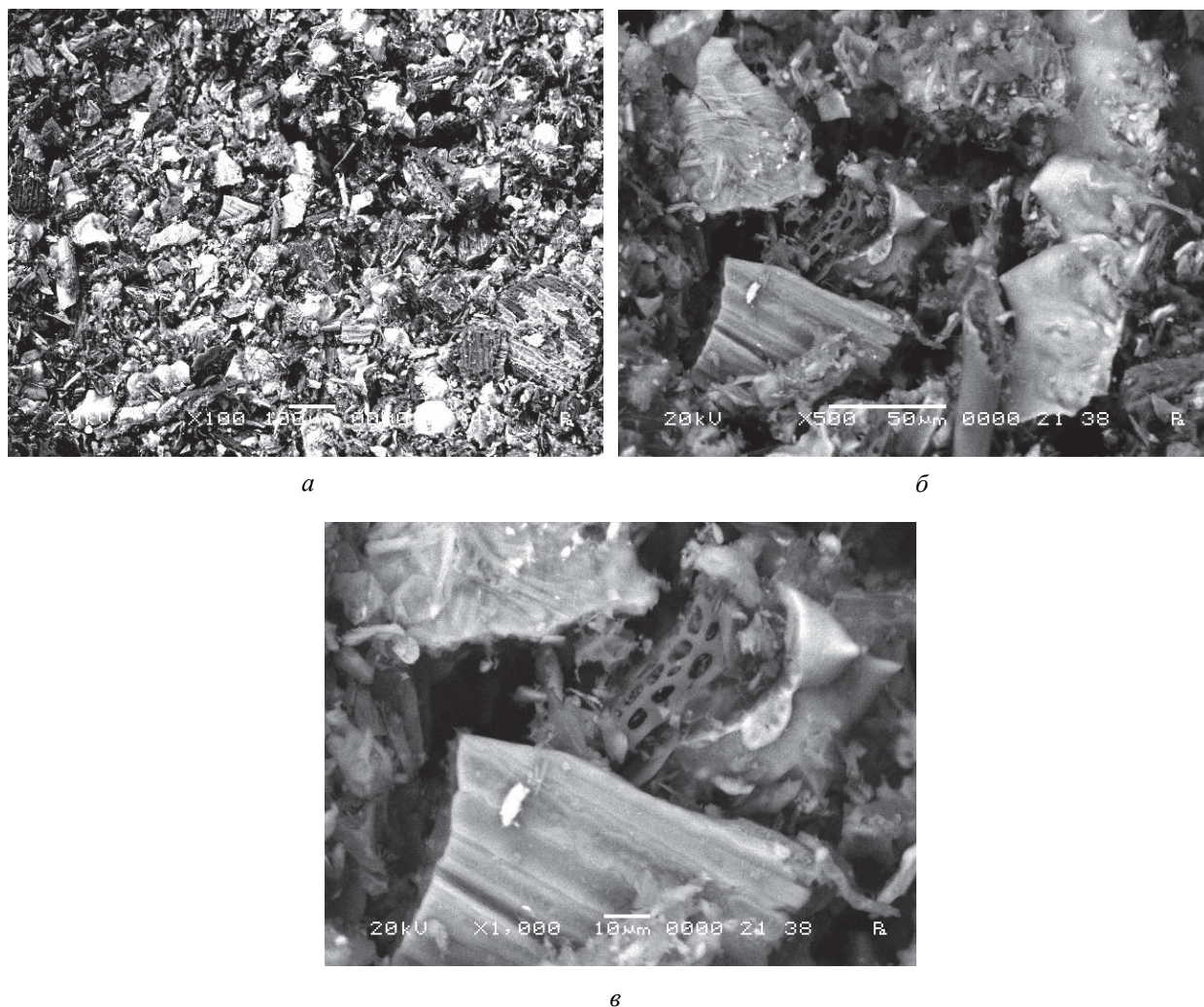


Рис. 1. SEM-изображение УКК при разном увеличении:
а) $\times 100$; б) $\times 500$; в) $\times 1000$

Это обуславливает образование поверхностной «кремнеземной сетки» (рис. 1, в), которая отчетливо видна на поверхности внешнего слоя материала. В дальнейшем этот нежелательный эффект может привести к затруднению в доставке реагентов внутрь углеродной матрицы на стадии активации. Поэтому проведение карбонизации при высоких температурах нецелесообразно для процесса производства активированного углеродного материала. Исходя из изложенного можно заключить, что процесс карбонизации РШ целесообразно проводить при температуре 600°C .

Определение площади поверхности УКК осуществляли на основе теории Брунауэра, Эммета и Тейлора (БЭТ) адсорбции газов с помощью многоточечных определений [19]. Средняя удельная площадь поверхности частиц составила $36 \text{ м}^2/\text{г}$.

Для выявления текстурных параметров, таких как объем и средний радиус пор образца УКК, была снята изотерма адсорбции азота при 77 К (рис. 2).

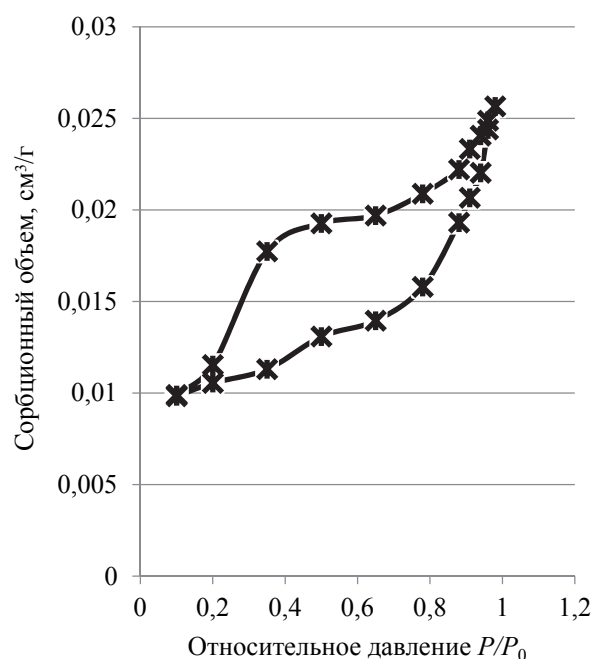


Рис. 2. Изотерма адсорбции образца УКК

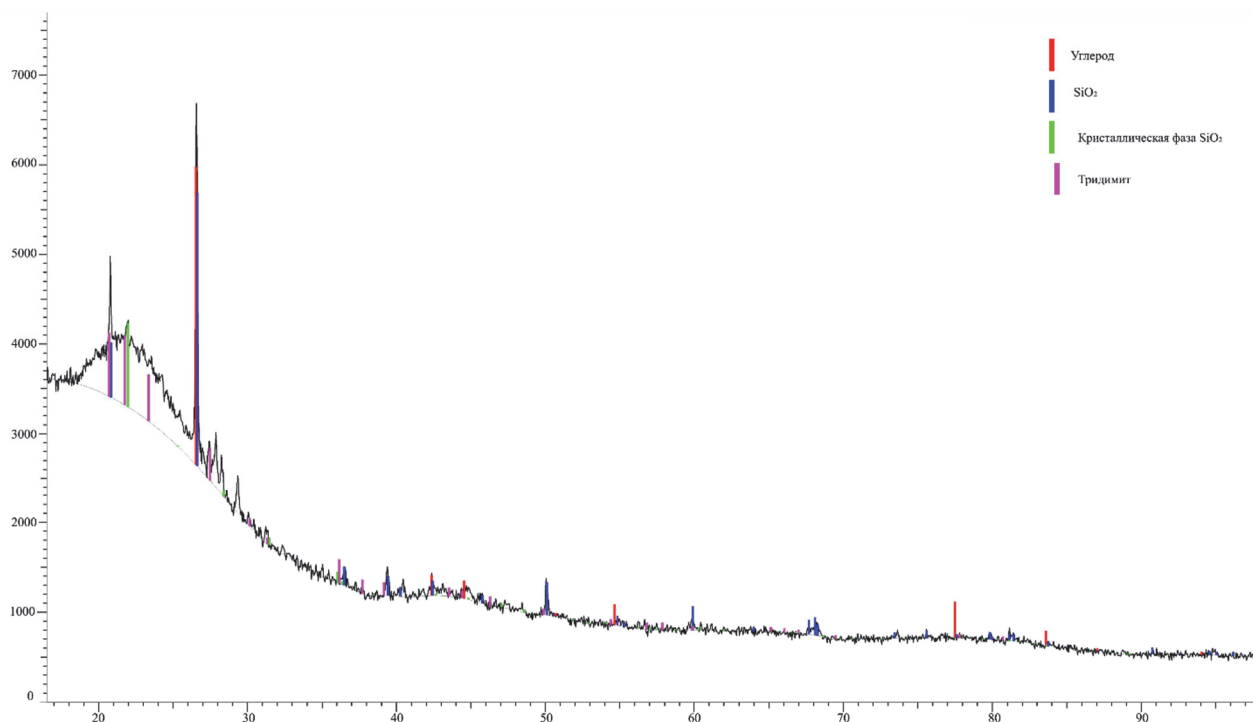


Рис. 3. Рентгенограмма образца УКК

Как видно из рис. 2, изотерма от образца УКК характеризуется крутым подъемом при малых относительных давлениях. Это позволяет сделать вывод об однородности пор данного наполнителя по размерам и о том, что они очень тонки и заполняются в первом акте адсорбционного процесса. По классификации IUPAC подобные изотермы относятся к IV типу изотерм, т. е. к изотермам, характерным для мезопористых материалов с размером пор 2–50 нм. При относительном давлении ($P/P_0 > 0,1$) кривая характеризуется наличием петли гистерезиса между адсорбционной и десорбционной ветвями, связанной с необратимой капиллярной конденсацией азота в мезопорах наполнителя при высоких относительных давлениях.

Средний радиус пор рассчитывали по методу Баррета – Джойнера – Халенды (BJH – Barrett, Joyner and Halenda) по изотерме десорбции. Данный метод может быть успешно применен практически ко всем типам пористых материалов. В основу модели положено допущение о цилиндрической форме пор и то, что радиус поры равен сумме радиуса Кельвина и толщины адсорбированной на стенке поры пленки [20]. На основании расчетов получено, что средний размер пор УКК находится в интервале от 1,5 до 49,5 нм.

Проведенный рентгенофазовый анализ показал, что углерод в УКК присутствует в аморфном состоянии (рис. 3). Вместе с тем на рентгенограмме присутствуют рефлексы, соответствующие кристаллическому диоксиду кремния и кремниевой кислоте.

Таким образом, исследуемый углерод-кремнистый композит представляет собой малоактивный наполнитель, который может использоваться для эластомерных композиций.

С целью повышения активности поверхности частиц УКК была проведена их механоактивация для изменения удельной поверхности ее частиц.

Для механоактивации поверхности углерод-кремнистого композита использовались вибрационная и планетарная мельницы. Время активации было выбрано в диапазоне от 1 до 5 мин с интервалом в 1 мин.

Эффективность механоактивации УКК в зависимости от продолжительности помола оценивали по изменению площади удельной поверхности частиц композита и сорбционному объему частиц. Полученные данные представлены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Показатели поверхности механоактивированного УКК в вибрационной мельнице

УКК	Удельная поверхность, м ² /г	Сорбционный объем, см ³ /г
Без механоактивации	36	0,026
Механоактивированный в течение, мин		
1 (УКК 1В)	41	0,023
2 (УКК 2В)	57	0,031
3 (УКК 3В)	74	0,040
4 (УКК 4В)	43	0,022
5 (УКК 5В)	39	0,021

Таблица 3
Показатели поверхности механоактивированного
УКК в планетарной мельнице

УКК	Удельная поверхность, м ² /г	Сорбционный объем, см ³ /г
Без механоактивации	36	0,026
Механоактивированный в течение, мин		
1 (УКК 1П)	61	0,036
2 (УКК 2П)	85	0,046
3 (УКК 3П)	81	0,061
4 (УКК 4П)	111	0,070
5 (УКК 5П)	52	0,026

На основе экспериментальных результатов (табл. 2 и 3) можно сделать вывод, что наибольшая удельная поверхность УКК достигается при механоактивации на вибрационной мельнице в

течение 3 мин и на планетарной в течение 4 мин. Из полученных данных следует, что результаты исследований по продолжительности помола УКК будут использованы на последующих этапах работы.

Выводы. Таким образом, в ходе выполнения работ установлено, что углерод-кремнистый композит содержит 47,26% углерода, 50,38% оксида кремния и 2,36% примесей оксидов металлов различной природы. Рентгенофазовый анализ показал, что углерод в УКК присутствует в аморфном состоянии, но при этом наблюдаются рефлексы, соответствующие кристаллическому диоксиду кремния и кремниевой кислоте.

В процессе механоактивации достигается увеличение удельной поверхности углерод-кремнистого композита.

Список литературы

1. Орлов В. Ю., Комаров В. Ю., Ляпина Л. А. Производство и использование технического углерода для резин. Ярославль: Александр Рутман, 2002. 512 с.
2. Шашок Ж. С., Усс Е. П., Касперович А. В. Исследование влияния различных марок технического углерода на технические свойства резин // Труды БГТУ. 2016. № 4 (186): Химия, технология орган. в-в и биотехнология. С. 5–10.
3. Нарыжный Д. А., Харламов Е. В., Антипина С. Г. Изучение влияния содержания технического углерода и продолжительности вулканизации на качество резин // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5. Ч. 2. С. 227.
4. Резниченко С. В., Морозов Ю. Л. Большой справочник резинщика. М.: Техинформ, 2012. 744 с.
5. Chemical and nanomechanical analysis of rice husk modified by ATRP-grafted oligomer / S. M. Morsi [et al.] // Journal of Colloid and Interface Science. 2011. Vol. 360, no. 2. P. 377–385.
6. Shcherbakova T. P., Vaseneva I. N. A Biogenic Silica Synthesis Method // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. 2020. Vol. 54. P. 297–303.
7. Characterization of biogenic silica generated by thermo chemical treatment of rice husk / H. A. Alyosef [et al.] // Particulate Science and Technology: An International Journal. 2013. Vol. 31, no. 6. P. 524–532. DOI: org/10.1080/02726351.2013.782931.
8. Исследование возможностей использования продуктов сгорания рисовой шелухи для шин и РТИ / Ю. В. Азарова [и др.] // Проблемы шин и резинотехнических композитов: материалы докл. Междунар. конф., Москва, 18–19 окт. 2005 г. М., 2005. С. 32–34.
9. Bakar R. A., Yahya R., Gan S. N. Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk // 5th International Conference on Recent Advances in Materials, Minerals and Environment (RAMM) & 2nd International Postgraduate Conference on Materials, Mineral and Polymer (MAMIP). Malaysia, 4–6 August 2015. P. 189–195.
10. Properties and Industrial Applications of Rice husk: a review / A. Kumar [et al.] // International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2012. Vol. 2, no. 10. P. 86–90.
11. Pozzolanic Characterization of Waste Rice Husk Ash (RHA) From Muar, Malaysia / J. Hadipramana [et al.] // IOP Conference Series: materials Science and Engineering. 2016. Vol. 160, no. 11. P. 1–10.
12. Hieu N. M., Korobochkin V. V., Tu N. V. A study of silica separation in the production of activated carbon from rice husk in Viet Nam // Procedia Chemistry. 2015. Vol. 15. P. 308–312. DOI: 10.1016/j.proche.2015.10.049.
13. Rice Husk Ash as Raw Material for the Synthesis of Silicon and Potassium Slow-Release Fertilizer / A. A. França [et al.] // Journal of the Brazilian Chemical Society. Vol. 28, no. 11. P. 2211–2217.
14. Comparison between rice husk ash grown in different regions for stabilizing fly ash from a solid waste incinerator / L. Benassi [et al.] // Journal of Environmental Management. 2015. Vol. 159. P. 128–134.
15. Инновационный наполнитель эластомеров на основе растительного сырья / В. В. Боброва [и др.] // НЕФТЕХИМИЯ-2021: материалы IV Междунар. науч.-техн. форума по хим. технологиям и нефтегазопереработке, Минск, 22–23 нояб. 2021 г. Минск, 2021. С. 113–116.

16. Нгуен М. Х. Процессы термической переработки рисовой шелухи при получении активированного углеродного материала и их аппаратурное обеспечение: дис. ... канд. техн. наук: 04.04.2018. Томск, 2018. 190 л.

17. Рис и его качество / под ред. Е. П. Козьминой. М.: Колос, 1976. 400 с.

18. Воронков М. Г., Зельчан Г. И., Лукевиц А. Ю. Кремний и жизнь. Рига: Зинатне, 1978. 578 с.

19. Кельцев Н. В. Основы адсорбционной техники. М.: Химия, 1984. 592 с.

20. Грег С., Синг К. Адсорбция, удельная поверхность, пористость. М.: Мир, 1984. 306 с.

References

1. Orlov V. Yu., Komarov V. Yu., Lyapina L. A. *Proizvodstvo i ispol'zovaniye tekhnicheskogo ugleroda dlya rezin* [Production and use of carbon black for rubber]. Yaroslavl, Aleksandr Rutman Publ., 2002. 512 p. (In Russian).

2. Shashok Zh. S., Uss E. P., Kasperovich A. V. Study of the influence of various grades of carbon black on the technical properties of rubber. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2016, no. 4 (186): Chemistry, Technology of Organic Substances and Biotechnology, pp. 5–10 (In Russian).

3. Naryzhnyy D. A., Harlamov E. V., Antipina S. G. Study of the influence of carbon black content and the duration of vulcanization on the quality of rubber. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii* [Modern high technologies], 2014, no. 5, part 2, p. 227 (In Russian).

4. Reznichenko S. V., Morozov Yu. L. *Bol'shoy spravochnik rezinshchika* [The Great Rubberman's Handbook]. Moscow, Tekhninform Publ., 2012. 744 p. (In Russian).

5. Morsi S. M., Pakzad A., Amin A., Yassar R. S., Heiden P. A. Chemical and nanomechanical analysis of rice husk modified by ATRP-grafted oligomer. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2011, vol. 360, no. 2, pp. 377–385.

6. Shcherbakova T. P., Vaseneva I. N. A Biogenic Silica Synthesis Method. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2020, vol. 54, pp. 297–303.

7. Alyosef H. A., Eilert A., Welscher J., Ibrahim S. S., Denecke R., Schwieger W., Enke D. Characterization of biogenic silica generated by thermo chemical treatment of rice husk. *Particulate Science and Technology: An International Journal*, 2013, vol. 31, no. 6, pp. 524–532. DOI: org/10.1080/02726351.2013.782931.

8. Azarova Yu. V., Tolstova O. N., Kosso R. A., Ten P. V., Hohryakov A. A., Morozov Yu. I. Study of the possibilities of using rice husk combustion products for tires and rubber goods. *Problemy shin i rezinokordnykh kompozitov: materialy dokladov Mezhdunarodnoy konferentsii* [Problems of Tires and Rubber Cord Composites: Proceedings of the International Conference]. Moscow, 2005, pp. 32–34 (In Russian).

9. Bakar R. A., Yahya R., Gan S. N. Production of High Purity Amorphous Silica from Rice Husk. *5th International Conference on Recent Advances in Materials, Minerals and Environment (RAMM) & 2nd International Postgraduate Conference on Materials, Mineral and Polymer (MAMIP)*. Malaysia, 2015, pp. 189–195.

10. Kumar A., Mohanta K., Kumar D., Om P. Properties and Industrial Applications of Rice husk: a review. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*. 2012, vol. 2, no. 10, pp. 86–90.

11. Hadipramana J., Riza F. V., Rahman I. A., Loon L. Y., Adnan S. H., Zaidi A. M. A. Pozzolanic Characterization of Waste Rice Husk Ash (RHA) From Muar, Malaysia. *IOP Conference Series: materials Science and Engineering*, 2016, vol. 160, no. 11, pp. 1–10.

12. Hieu N. M., Korobochkin V. V., Tu N. V. A study of silica separation in the production of activated carbon from rice husk in Viet Nam. *Procedia Chemistry*, 2015, vol. 15, pp. 308–312. DOI: 10.1016/j.proche.2015.10.049.

13. França A. A., Schultz J., Borges R., Wypych F., Mangrich A. S. Rice Husk Ash as Raw Material for the Synthesis of Silicon and Potassium Slow-Release Fertilizer. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, vol. 28, no. 11, pp. 2211–2217.

14. Benassi L., Bosio A., Dalipi R., Borgese L., Rodella N., Pasquali M., Depero L. E., Bergese P., Bontempi E. Comparison between rice husk ash grown in different regions for stabilizing fly ash from a solid waste incinerator. *Journal of Environmental Management*, 2015, vol. 159, pp. 128–134.

15. Bobrova V. V., Prokopchuk N. R., Kasperovich A. V., Farafontov V. N., Efremov S. A., Antipov A. F. Innovative plant-based elastomer filler. *NEFTEKHIMIYA-2021: materialy IV Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma po khimicheskim tekhnologiyam i neftegazopererabotke* [PETROCHEMISTRY-2021: materials of the IV International scientific and technical forum on chemical technologies and oil and gas processing]. Minsk, 2021, pp. 113–116 (In Russian).

16. Nguen M. H. *Protssy termicheskoy pererabotki risovoy shelukhi pri poluchenii aktivirovannogo uglerodnogo materiala i ikh apparaturnoye obespecheniye*. Dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk

[The processes of thermal processing of rice husks in the production of activated carbon material and their hardware. Dissertation PhD (Engineering)]. Tomsk, 2018. 190 p.

17. *Ris i yego kachestvo* [Rice and its quality]. Edit. by E. P. Koz'mina. Moscow, Kolos Publ., 1976. 400 p.

18. Voronkov M. G., Zel'chan G. I., Lukevits A. Yu. *Kremniy i zhizn'* [Silicon and life]. Riga, Zinatne Publ., 1978. 578 p.

19. Kel'tsev N. V. *Osnovy adsorbtsionnoy tekhniki* [Fundamentals of adsorption technology]. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 592 p.

20. Greg S., Sing K. *Adsorbtsiya, udel'naya poverkhnost', poristost'* [Adsorption, specific surface area, porosity]. Moscow, Mir Publ., 1984. 306 p.

Информация об авторах

Боброва Валерия Владимировна – аспирант кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: lerik_bobrik94@mail.ru

Прокопчук Николай Романович – член-корреспондент НАН Беларуси, доктор химических наук, профессор, профессор кафедры полимерных композиционных материалов. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: nrprok@gmail.com

Ефремов Сергей Анатольевич – академик КазНАЕН, доктор химических наук, профессор, заместитель директора центра физико-химических методов исследования и анализа. Казахский национальный университет имени аль-Фараби (050040, г. Алматы, пр-т Аль-Фараби, 71, Республика Казахстан). E-mail: efremosa@mail.ru

Нечипуренко Сергей Витальевич – кандидат технических наук, ассоциированный профессор, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией композиционных материалов центра физико-химических методов исследования и анализа. Казахский национальный университет имени аль-Фараби (050040, г. Алматы, пр-т Аль-Фараби, 71, Республика Казахстан). E-mail: nechipurenkos@mail.ru

Information about the authors

Bobrova Valeria Vladimirovna – PhD student, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lerik_bobrik94@mail.ru

Prokopchuk Nikolay Romanovich – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, DSc (Chemistry), Professor, Professor, the Department of Polymer Composite Materials. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nrprok@gmail.com

Efremov Sergey Anatolyevich – Academician of Kazakhstan National Academy of Natural Sciences, DSc (Chemistry), Professor, Deputy Director of the Center for Physico-Chemical Methods of Research and Analysis. Al-Farabi Kazakh National University (71, Al-Farabi Ave., 050040, Almaty, Republic of Kazakhstan). E-mail: efremosa@mail.ru

Nechipurenko Sergey Vitalievich – PhD (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, Head of the Laboratories of Composite Materials of the Center of Physico-Chemical Methods of Research and Analysis. Al-Farabi Kazakh National University (71, Al-Farabi Ave., 050040, Almaty, Republic of Kazakhstan). E-mail: nechipurenkos@mail.ru

Поступила 25.11.2021