

Д. С. Плахина, Н. И. Богданович, З. А. Канарская,  
А. В. Канарский

### АКТИВНЫЕ УГЛИ ИЗ СОЛОМЫ МАСЛЕНИЧНЫХ КУЛЬТУР

*Ключевые слова:* солома, активный уголь, пиролиз, изотермы адсорбции, удельная поверхность.

*Производство масленичных культур сопряжено с рядом проблем, в частности, с утилизацией вторичных ресурсов переработки соломы, шелухи, жмыха, остатков от прессования семян. Переработка соломы - это не только актуальная проблема, но и возможность для достижения устойчивого развития в аграрном секторе. Существует несколько способов переработки соломы: компостирование, силосование, изготовление топливных брикетов. Также российские ученые разработали технологии, позволяющие перерабатывать солому в удобрения, строительные материалы, бумагу и аналоги стекла. Еще один из способов переработки отходов – пиролиз. Пиролиз представляет собой метод термического разложения полимерных материалов или органических веществ под действием температуры в отсутствие окислительной среды. Известно, что активированный уголь, полученный из соломы масленичных культур применяется для очистки воды и газовых сред, в пищевой и фармацевтической промышленности, также находит применение в косметической индустрии для создания очищающих и детоксицирующих средств. В сельском хозяйстве его используют для улучшения почвы и уменьшения загрязнения водоёмов от химических удобрений. Цель работы заключалась в разработке технологических основ пиролиза отходов сельскохозяйственных культур с получением активных углей в режиме термохимической активации (ТХА) гидроксидом натрия (NaOH), а также был проведен анализ пористой структуры и адсорбционных свойств синтезируемых активных углей. Изучение характеристик пористой структуры проводилось методом низкотемпературной адсорбции азота (77 К). В результате исследования получены данные о пористой структуре полученных активных углей и сделаны соответствующие выводы.*

D. S. Plakhina, N. I. Bogdanovich, Z. A. Kanarskaya,  
A. V. Kanarskii

### ACTIVE COALS FROM OILSEED STRAW

*Keywords:* straw, active carbon, pyrolysis, adsorption isotherms, specific surface area.

*The production of oil crops is associated with a number of problems, in particular, with the utilization of secondary resources of processing straw, husk, cake, residues from pressing seeds. Straw processing is not only a pressing problem, but also an opportunity to achieve sustainable development in the agricultural sector. There are several ways to process straw: composting, silage, making fuel briquettes. Russian scientists have also developed technologies that allow processing straw into fertilizers, construction materials, paper and glass analogues. Pyrolysis is another way of recycling waste. Pyrolysis is a method of thermal decomposition of polymeric materials or organic substances under the influence of temperature in the absence of an oxidizing environment. It is known that activated carbon obtained from oilseed straw is used for purification of water and gas media, in food and pharmaceutical industries, it is also used in the cosmetics industry to create cleansing and detoxifying products. In agriculture it is used to improve soil and reduce pollution of water bodies from chemical fertilizers. The aim of the work was to develop a technological basis for the pyrolysis of agricultural crop waste with the production of active carbons in the thermochemical activation (TCA) mode with sodium hydroxide (NaOH), and the porous structure and adsorption properties of the synthesized active carbons were analyzed. The porous structure characteristics were studied by low temperature nitrogen adsorption method (77 K). As a result of the study, data on the porous structure of the obtained active carbons were obtained and conclusions on the work were drawn.*

### Введение

Активные угли являются неотъемлемыми компонентами многих промышленных процессов и имеют широкий спектр применений. Их высокая поверхностная активность и способность к адсорбции делают их эффективными адсорбентами, катализаторами и фильтрующими материалами [1-5].

Имеются различные варианты переработки соломы и шелухи на ценные продукты, такие как топливные брикеты, биогаз, корма для животноводства, удобрения в виде компоста, а также получение кремниевого соединения, используемого в качестве сорбентов и композиционных материалов.

В данном исследовании мы рассмотрим перспективное направление получения активных углей (АУ) из соломы масленичных культур. Солома,

как один из наиболее доступных и обновляемых растительных материалов, представляет собой привлекательный источник сырья для производства АУ [6-15].

Активированный уголь – высокопористый углеродный адсорбент, с развитой внутренней поверхностью (от 500 до 2000 м<sup>2</sup>/г), который получают из углеродосодержащих материалов органического происхождения. Активные угли (АУ) - гидрофобные адсорбенты, эффективно поглощающие органические и синтетические токсины из различных сред, в том числе почвенной. Для них характерны универсальность сорбционных свойств, высокая поглотительная способность, избирательность сорбции органических токсинов, удобная препаративная форма (зерно, порошок) и гидрофобность [8].

Результаты исследования могут иметь важное практическое значение для развития экологически чистых и эффективных методов очистки окружающей среды. Переход к использованию растительных источников сырья для производства активных углей может снизить негативное воздействие на окружающую среду и способствовать устойчивому развитию.

### Материалы и методы исследования

В качестве исходного сырья использовали солому масличных культур: горчицы белой (г.б), горчицы черной (г.ч), горчицы сарептской (г.с), рапса, редьки, предоставленную сотрудниками ГНУ «ВНИИ рапса Россельхозакадемии», г. Липецк.

Цвет соломы золотисто-желтый или светло-коричневый, в зависимости от стадии высушивания. Она состоит из длинных стеблей, которые могут быть гладкими или немного шероховатыми. Стебли могут достигать высоты до 1,5-2 метров. Для сухой соломы характерен растительный запах. Солома масличных культур отличается высокой прочностью, жесткостью и трудно поддается измельчению.

Химический состав отходов (солома, шелуха, жмых от семян) масличных культур очень сложен и до сих пор полностью не изучен. Солома содержит всего около 15 % воды и примерно на 85 % состоит из органического вещества. Отходы классифицируются как лигноцеллюлозная биомасса, которая в основном состоит из целлюлозы (23,8–54,6 мас.%), гемицеллюлозы (11,9–29,8 мас.%) и лигнина (12,7–37,3 мас.%), что позволяет рассматривать ее как перспективное сырье для получения АУ [16].

Были проведены исследования свойств активных углей, полученных в результате термохимической активации угля из соломы при различных дозировках гидроксида натрия, а именно 150, 175 и 200% к а.с.с. Температура предпирилиза при этом фиксировалась на уровне 500 °С, температура термохимической активации равнялась 650 °С и 700 °С. Полученный уголь отмывали от натриевых солей. Отмытый уголь высушивали и анализировали.

Важно отметить, что удельная поверхность активированных углей может изменяться в зависимости от способа и степени их активации, а также от типа исходного сырья, которое используется в процессе их получения.

Для практической реализации методики наиболее широко используются сорбционные волюметрические (измерение объема) анализаторы, основанные на методе низкотемпературной адсорбции азота [17]. Суть метода состоит в анализе сорбции газа твердым телом при постоянной криогенной температуре и постепенном повышении давления. Образец исследуемого вещества предварительно очищается путем нагрева в условиях вакуума либо путем продувки в динамической газовой атмосфере. После очистки в ячейку с образцом подается небольшое количество газа-адсорбата, молекулы которого адсорбируются на внутренней поверхности образца, постепенно образуя монослой. По количеству газа, ушедшего на

образование монослоя, зная поперечное сечение его молекул и массу образца, можно судить о величине удельной поверхности этого материала.

Характеристики полученных активных углей определяли адсорбцией азота при 77 К с использованием системы ускоренного измерения площади поверхности и пористости ASAP 2020 MP (Джорджия, США) - прибор, который позволяет анализировать микропористую структуру.

Определение йодного числа ( $A_{I_2}$ ) проводили по ГОСТ 33618-2015 [18]. Для установления осветляющей способности по метиленовому голубому (АмГ) использовали ГОСТ 4453-74 [19] при условии, что объем раствора индикатора, взятый для обработки активированным углем, составлял 50 мл вместо 25.

### Обсуждение результатов

Все полученные изотермы адсорбции (рис. 1-5) для полученных образцов соответствуют классификации ИЮПАК и относятся к I типу. Этот тип классификации характерен для микропористых твердых тел, которые имеют преобладающие целевидные поры, развитую микропористую систему и относительно невысокий объем пор других размеров.

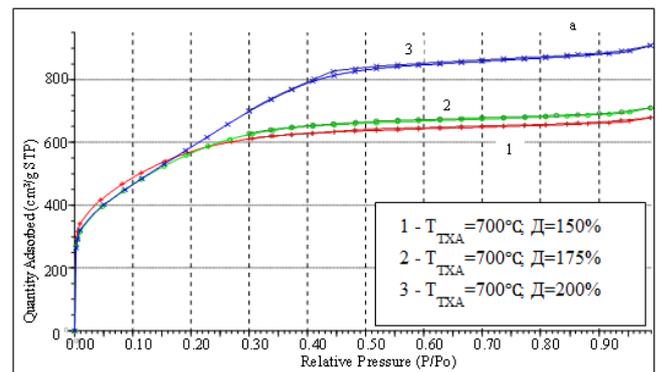


Рис. 1 – Изотермы адсорбции активных углей из соломы горчицы черной

Fig. 1 – Adsorption isotherms of active carbons from black mustard straw

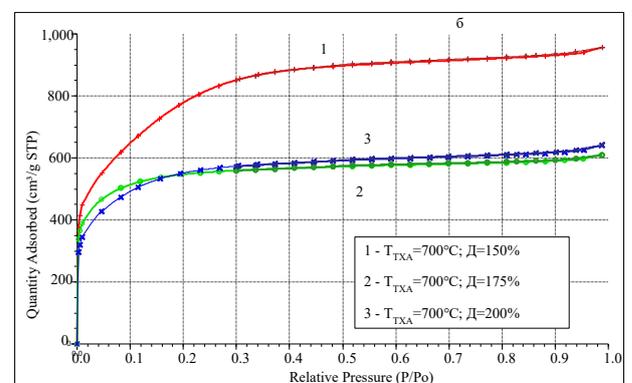


Рис. 2 – Изотермы адсорбции активных углей из соломы горчицы белой

Fig. 2 – Adsorption isotherms of active carbons from white mustard straw

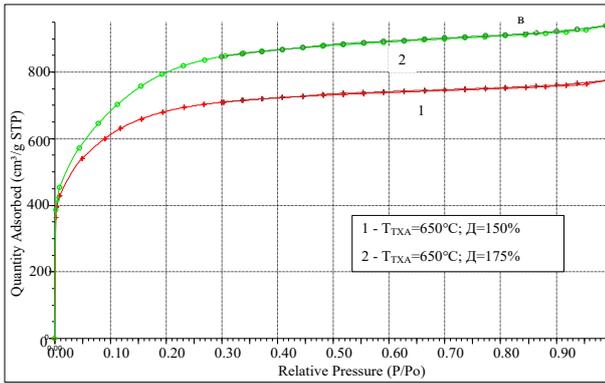


Рис. 3 – Изотермы адсорбции активных углей из соломы горчицы сарептской

Fig. 3 – Adsorption isotherms of active carbons from sareptskaya mustard straw

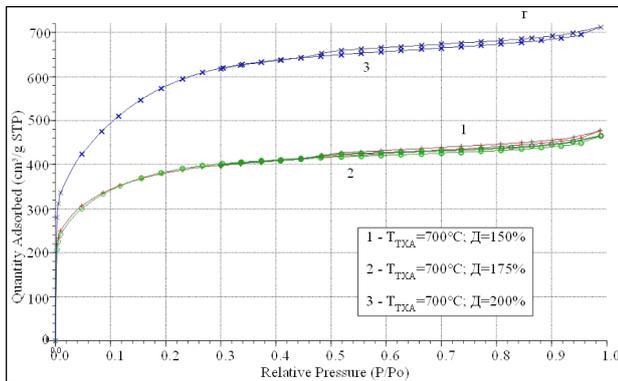


Рис. 4 – Изотермы адсорбции активных углей из соломы рапса

Fig. 4 – Adsorption isotherms of active carbons from rape straw

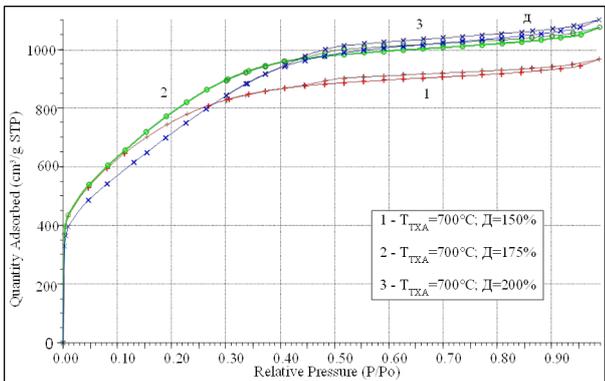


Рис. 5 – Изотермы адсорбции активных углей из соломы редьки

Fig. 5 – Adsorption isotherms of active carbons from radish straw

Изотермы адсорбции азота использовались для расчета параметров пористой структуры (таблица 1). Удельная поверхность образцов рассчитывалась по методу Brunauer–Emmett–Teller ( $S_{уд}$ , ВЕТ). Наиболее удобной формой уравнения ВЕТ для его приложения к экспериментальным данным является:

$$S_{уд} = \frac{1}{(a(P_0/P) - 1)} = \frac{1}{a_m C} + \frac{C - 1}{a_m C} (P/P_0),$$

где  $P$  – давление газа;  $P_0$  – давление его насыщенных паров;  $a$  – адсорбция, моль/г;  $a_m$  – удельная емкость монослоя, нсм<sup>3</sup>/г;  $C$  – константа ВЕТ, характеризующая взаимодействие адсорбент–адсорбат.

Таблица 1 – Объем пор АУ

Table 1 – Active coals (AC) pore volume

Образец	Объем пор, см <sup>3</sup> /г		
	Общий, ВЕТ	Микропор, ВЕТ	Мезопор, ВН
Горчица черная 150%	1,05	0,78	0,15
Горчица черная 175%	1,09	0,75	0,19
Горчица черная 200%	1,40	0,75	0,53
Горчица белая 150%	1,48	1,04	0,25
Горчица белая 175%	0,94	0,81	0,11
Горчица белая 200%	0,99	0,78	0,14
Горчица сарептская 150%	1,20	0,98	0,14
Горчица сарептская 200%	1,45	1,09	0,32
Рапс 150%	0,74	0,55	0,17
Рапс 175%	0,72	0,54	0,14
Рапс 200%	1,10	0,79	0,21
Редька 150%	1,49	0,99	0,32
Редька 175%	1,66	1,01	0,43
Редька 200%	1,70	0,95	0,64

Средняя полуширина микропор оценивалась методом Horvath-Kawazoe. Она изменяется в интервале от 1,15 до 1,18 нм (таблица 2).

Объем мезопор (размер 1,6–50 нм) определяли методом Barrett-Joyner-Halenda ( $V_{мез.}$ , ВН):

$$V_{pn} = \left( \frac{r_p^2}{r_{m^2 + \frac{\Delta t_2}{2}}} \right)^2 \cdot \left( \Delta V_n - V_{\Delta t_n} \sum_{j=1}^{n-1} A_{Cj} \right),$$

где  $r_p$  – радиус крупных пор;  $r_m$  – радиус капиллярных каналов;  $A_{Cj}$  – площадь уже опорожненных пор, из которых физически адсорбированный газ десорбировался;  $\Delta t_n$  – изменение толщины слоя; сумма в уравнении – это суммарная средняя площадь опорожнившихся за счет десорбции пор.

Активные угли с большим количеством микропор обладают наиболее развитой удельной поверхностью. Микропоры имеют высокое отношение удельной поверхности к объему, что делает их наиболее значимыми для общей удельной поверхности АУ. Объем микропор ( $V_{мик.}$ ) определяли несколькими методами: Horvath-Kawazoe, Дубинина–Радушкевича (Д-Р), Brunauer–Emmett–Teller (ВЕТ). По всем расчетным методам объем микропор оказался аналогичен.

Уравнение Д-Р послужило основой для разделения микропор на собственно микропоры и более крупные супермикропоры. Уравнение имеет следующий вид:

$$W = W_{01} \exp [-(A/\beta E_{01})^2] + W_{02} [-(A/\beta E_{02})^2],$$

где W - текущая величина адсорбции, выраженная через объем жидкости см<sup>3</sup>/г; W<sub>0</sub>- предельный объем адсорбционного пространства см<sup>3</sup>/г;β - коэффициент подобия, выражающий отношение характеристических энергий адсорбции стандартного и рассматриваемого паров; А – мольная работа адсорбции, кДж/моль (параметр, характеризующий размер микропор); E<sub>0</sub> - характеристическая энергия адсорбции стандартного пара.

**Таблица 2 – Средняя полуширина микропор и удельная поверхность АУ**

**Table 2 – Average micropore half-width and specific surface area of AC**

Образец	Средняя полуширина микропор, нм	Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /г	
		Общая, ВЕТ	Мезопор, ВН
Горчица черная 150%	1,18	1801	141
Горчица черная 175%	1,18	1889	182
Горчица черная 200%	1,16	2245	626
Горчица белая 150%	1,16	2681	243
Горчица белая 175%	1,15	1705	77,9
Горчица белая 200%	1,17	1772	106
Горчица сарептская 150%	1,15	2181	125
Горчица сарептская 200%	1,18	2492	185
Рапс 150%	1,15	1150	149
Рапс 175%	1,16	1239	103
Рапс 200%	1,15	1933	183
Редька 150%	1,18	2489	323
Редька 175%	1,18	2467	462
Редька 200%	1,17	2677	728

В таблице 3 представлены результаты исследования адсорбционных свойств полученных активных углей.

Адсорбционную способность угля по метиленовому голубому (А<sub>мг</sub>) определяли по формуле:

$$A_{мг} = \frac{(C_1 - C_2 \cdot k) \cdot 0,050}{m},$$

где С<sub>1</sub> – концентрация исходного раствора, мг/л; С<sub>2</sub> – концентрация раствора после обработки углем, мг/л; k – коэффициент разбавления раствора, взятого для анализа после контактирования с углем; m – масса навески угля, г; 0,050 – объем раствора МГ, взятого для анализа, л.

Адсорбционная активность по йоду (А<sub>й2</sub>), %, определялась по формуле:

$$A_{й2} = \frac{(V_1 \cdot V) \cdot 0,0127 \cdot 50 \cdot 100}{10 \cdot m},$$

где V<sub>1</sub> – объем 0,1 н раствора тиосульфата натрия,

израсходованного на титрование 10 мл раствора йода, мл; V – объем 0,1 н раствора тиосульфата натрия, израсходованного на титрование 10 мл раствора йода после обработки угля, мл; 0,0127 – масса йода, соответствующая 1 мл 0,1 н раствора тиосульфата натрия, г; 50 – объем йода, мл; m – масса навески угля, г.

**Таблица 3 – Адсорбционная активность АУ по йоду и МГ**

**Table 3 – Iodine and MG adsorption activity of AC**

Код	Т пиролиза, °С	Дозировка NaOH, %	А <sub>мг</sub> , мг/л	А <sub>й2</sub> , %
Г.ч.	700	150	855	236
Г.ч.	700	175	770	234
Г.ч.	700	200	897	234
Г.б.	700	150	1082	298
Г.б.	700	175	832	299
Г.б.	700	200	796	215
Г.с.	650	150	979	273
Г.с.	650	200	1044	285
Рапс	700	150	656	185
Рапс	700	175	633	177
Рапс	650	200	857	235
Редька	700	150	1039	295
Редька	700	175	1048	279
Редька	700	200	992	261

Адсорбционная активность по йоду характеризует преимущественно развитие микропористой структуры активного угля.

Адсорбция метиленового голубого (А<sub>мг</sub>) дает представление об удельной поверхности активного угля, образованной порами с полушириной больше 1,5 нм.

Увеличение дозировки щелочи не оказывает влияния на формирование адсорбционных свойств, следовательно, дозировку можно зафиксировать на самом низком уровне.

Самое высокое значение сорбционной активности по метиленовому голубому составило 1082 мг/г, что коррелирует с самой высокой величиной общей удельной поверхностью 2681 м<sup>2</sup>/г.

По требованиям ГОСТ4453-74 по метиленовому голубому адсорбционная активность должна составлять не ниже 225 мг/г, у наших углей этот показатель доходит до 1082 мг/г, следовательно, сорбционные свойства в 4-5 раз превосходят промышленно-выпускаемых активных углей в России.

### Выводы

Солома масленичных культур пригодна для получения активных углей, соответствующих действующим нормативным документам.

Характеристики активного угля, полученного из соломы масленичных культур, являются предпосылкой применения данного адсорбента в различных областях промышленности.

### Литература

1. X. Zhang, T. Wang, Z. Wang, X., Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 147, 104807 (2020).

2. Н.В. Кельцев, Основы адсорбционной техники. Химия, Москва, 1984. 592 с.
3. В.М. Мухин, А.В. Тарасов, В.Н. Клушин. Активные угли России. Metallurgy, Москва, 2000. 352 с.
4. А.М. Когановский, Н.А. Клименко, Т.М. Левченко, Р.М. Марутовский, И.Г. Рода, Очистка и использование сточных вод в промышленном водоснабжении. Химия, Москва, 1983. 288 с.
5. Х. Кинле, Э. Бадер, Активные угли и их промышленное применение. Химия, Ленинград, 1984. 216 с.
6. Е.А. Фарберова, Е.А. Тингаева, А.Д. Чучалина, А.Р. Кобелева, А.С. Максимова, Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология, 61, 3, 51-57 (2018).
7. В.М. Мухин, А.А. Курилкин, Н.Л. Воропаева, В.В. Гурьянов, В.В. Карпачев, К.В. Лексюкова, Успехи в химии и химической технологии, 29, 8, 96 – 98 (2015).
8. В.М. Мухин, Н.Л. Воропаева, В.В. Карпачев, Кормопроизводство, 1, 41(2014).
9. Н.И. Богданович, Н.Л. Воропаева, В.М. Мухин, Ю.Я. Спиридонов, В.В. Карпачев, А.П. Глинушкин, В.Н. Зеленков, К.А. Хвиюзова (Романенко), В сб. Нетрадиционные природные ресурсы, инновационные технологии и продукты. Москва, Белгород, 2018. Т 26. С. 138–151.
10. Ю.Я. Спиридонов, Н.И. Богданович, В.М. Мухин, К.А. Хвиюзова, Ю.С. Корельская, Материалы VIII Международной конференции Физикохимия растительных полимеров, Архангельск, Издательский дом им. В.Н. Булатова САФУ, Архангельск, 2019. С. 292–294.
11. К.А. Хвиюзова, Н.И. Богданович, Н.Л. Воропаева, В.В. Карпачев, Химия растительного сырья, 1, 337–346 (2020).
12. Н.Л. Воропаева, К.А. Романенко, Н.И. Богданович, Ю.С. Корельская, Д.С. Анциферова, В.М. Мухин, Материалы VII Международной конференции Физикохимия растительных полимеров, САФУ, Архангельск, 2017. С.58-61.
13. Н.Л. Воропаева, В.В. Карпачев, В.М. Мухин, Труды международной научно-технической конференции энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве, 4, 354-360 (2014).
14. X. Bai., G. Wang, Y. Sun, Y. Yu, J. Liu, D. Wang, Z. Wang, Bioresour Technol, 267, 38–45 (2018).
15. H. Chen, X. Chen, Y. Qin, J. Wei, H. Liu, Bioresour Technol, 228, 241–249 (2017).
16. Yong K. J., Wu T. Y. Second-generation bioenergy from oilseed crop residues: Recent technologies, techno-economic assessments and policies, Energy Conversion and Management, 2022. Т 267. С. 115869.
17. В.М. Мухин, В.Н. Клушин, Производство и применение углеродных адсорбентов. РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, 2012. 308 с.
18. ГОСТ 33618 – 2015. Уголь активированный. Метод определения йодного числа. Межгосударственный стандарт: дата введения 01.04.2017. М.: Стандартинформ, 2016. 8 с.
19. ГОСТ 4453–74. Уголь активированный осветляющий древесный порошкообразный. Технические условия: дата введения 01.01.76. М.: Изд-во стандартов, 1993. 21 с.

## References

1. X. Zhang, T. Wang, Z. Wang, X., Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 147, 104807 (2020).
2. N.V. Keltsev, Fundamentals of adsorption technique. Chemistry, Moscow, 1984. 592 p.
3. V.M. Mukhin, A.V. Tarasov, V.N. Klushin. Active coals of Russia. Metallurgy, Moscow, 2000. 352 p.
4. A.M. Koganovsky, N.A. Klimenko, T.M. Levchenko, R.M. Marutovsky, I.G. Roda, Purification and utilisation of waste water in industrial water supply. Chemistry, Moscow, 1983. 288 p.
5. H. Kinle, E. Bader, Active coals and their industrial application. Chemistry, Leningrad, 1984. 216 p.
6. E.A. Farberova, E.A. Tingaeva, A.D. Chuchalina, A.R. Kobleva, A.S. Maksimova, Izvestiya vysshee obrazovaniya. Chemistry and Chemical Technology, 61, 3, 51-57 (2018).
7. V.M. Mukhin, A.A. Kurilkin, N.L. Voropaeva, V.V. Guryanov, V.V. Karpachev, K.V. Leksyukova, Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii, 29, 8, 96 – 98 (2015).
8. V.M. Mukhin, N.L. Voropaeva, V.V. Karpachev, Kormoproizvodstvo, 1, 41(2014).
9. N.I. Bogdanovich, N.L. Voropaeva, V.M. Mukhin, Yu. Karpachev, A.P. Glinushkin, V.N. Zelenkov, K.A. Khviyuzova (Romanenko), In Proc. Non-traditional natural resources, innovative technologies and products. Moscow, Belgorod, 2018. VOL. 26. PP. 138-151.
10. Y.Y. Spiridonov, N.I. Bogdanovich, V.M. Mukhin, K.A. Khviyuzova, Y.S. Korelskaya, Proceedings of the VIII International Conference Physicochemistry of Plant Polymers, Arkhangelsk, V.N. Bulatov Publishing House. V.N. Bulatov SAFU, Arkhangelsk, 2019. P. 292-294.
11. K.A. Khviyuzova, N.I. Bogdanovich, N.L. Voropaeva, V.V. Karpachev, Chemistry of plant raw materials, 1, 337-346 (2020).
12. N.L. Voropaeva, K.A. Romanenko, N.I. Bogdanovich, Y.S. Korelskaya, D.S. Antsiferova, V.M. Mukhin, Proceedings of the VII International Conference Physicochemistry of Plant Polymers, SAFU, Arkhangelsk, 2017. P.58-61.
13. N.L. Voropaeva, V.V. Karpachev, V.M. Mukhin, Proceedings of the International Scientific and Technical Conference Energy Supply and Energy Saving in Agriculture, 4, 354-360 (2014).
14. X. Bai., G. Wang, Y. Sun, Y. Yu, J. Liu, D. Wang, Z. Wang, Bioresour Technol, 267, 38-45 (2018).
15. H. Chen, X. Chen, Y. Qin, J. Wei, H. Liu, Bioresour Technol, 228, 241-249 (2017).
16. Yong K. J., Wu T. Y. Second-generation bioenergy from oilseed crop residues: Recent technologies, techno-economic assessments and policies, Energy Conversion and Management, 2022. V. 267. P. 115869.
17. V.M. Mukhin, V.N. Klushin, Production and Application of Carbon Adsorbents. D.I. Mendeleev Russian Chemical Technology University, Moscow, 2012. 308 p.
18. GOST 33618 - 2015. Activated carbon. Method for determination of iodine number. Interstate standard: date of introduction 01.04.2017. Moscow: Standardinform, 2016. 8 p.
19. GOST 4453-74. Charcoal activated clarifying wood powdery powder. Specifications: date of introduction 01.01.76. M.: Izd-wo standards, 1993. 21 p.

© **Д. С. Плахина** – ведущий технолог, ООО «Архангельский водорослевый комбинат», Архангельск, Россия, plahina.d.s@ab1918.ru; **Н. И. Богданович** – доктор техн. наук, профессор, кафедра Целлюлозно-бумажных и лесохимических производств, Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова, Архангельск, Россия, n.bogdanovich@narfu.ru; **З. А. Канарская** – к.т.н., доцент, кафедра Пищевой биотехнологии (ПБТ), Казанский национальный исследовательский технологический университет (КНИТУ), Казань, Россия, zosya\_kanarskaya@mail.ru; **А. В. Канарский** – д.т.н., профессор, кафедра ПБТ, КНИТУ, alb46@mail.ru.

© **D. S. Plakhina** – Leading Technologist, LLC Arkhangelsk Algae Plant, Arkhangelsk, Russia, plahina.d.s@ab1918.ru; **N. I. Bogdanovich** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor, Department of Pulp, Paper and Wood Chemical Production, Lomonosov Northern (Arctic) Federal University, Arkhangelsk, Russia, n.bogdanovich@narfu.ru; **Z. A. Kanarskaya** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Department of Food Bio-Technology (FBT), Kazan National Research Technological University (KNRTU), Kazan, Russia, zosya\_kanarskaya@mail.ru; **A. V. Kanarsky** – Doctor of Sciences (Technical Sci.), Professor of the FBT department, KNRTU, alb46@mail.ru.