

УДК 67.05:66.040.287
DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4386
Шифр специальности ВАК: 4.3.1

Характеристики гранулированного активированного угля из смеси отходов растительного сырья

Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников✉

Казанский национальный исследовательский технологический университет, Россия, г. Казань

✉vcvcvc12345678@gmail.com

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью увеличения использования возобновляемых источников энергии в экономике для снижения вредного воздействия на окружающую среду. *Цель:* оценка возможности получения термохимическим методом высококачественных углеродистых адсорбентов из гранулированной смеси различных отходов растительного происхождения. *Объекты:* образцы неликвидной кусковой древесины березы, скорлупы грецкого ореха, лузги семян подсолнечника, костры льна, каменный уголь-антрацит. *Методы:* физические эксперименты: кондуктивного пиролиза, водопаровой активации и дифференциально-термического анализа. Зольность и влажность образцов определены согласно ГОСТ Р 56881-2016 и ГОСТ 33503-2015. Измерение изотерм адсорбции по азоту проводили на анализаторе N OVA-1200e. Равновесная активность по толуолу определена согласно ГОСТ 8703-74, адсорбционная активность по йоду – согласно ГОСТ 6217-74. Определение плотности гранул осуществлялось по ГОСТ 15139-69. *Результаты.* Установлены рациональные параметры получения углеродистых адсорбентов из гранул растительного сырья. Определен удельный выход продуктов пиролиза смеси растительного сырья с пиролизной смолой. Удельный выход продуктов карбонизации гранулированной уплотнённой массы показал рост в 25 % в сравнении с неуплотнённой смесью растительного сырья. Показано, что наиболее значимыми параметрами, влияющими на развитие микропористой структуры углеродных гранул из уплотнённой массы растительного сырья, являются плотность исходных гранул растительного сырья и степень выгорания активируемых карбонизатов. Рациональными параметрами для получения активированного угля с наиболее высокими адсорбционными способностями являются гранулы плотностью 1200 кг/м³ при степени выгорания продукта карбонизации 70 %. Установлено, что полученные образцы адсорбентов из гранул растительного сырья имеют высокие адсорбционные характеристики, сравнимые с активированными углями, полученными из ископаемого сырья.

Ключевые слова: растительное сырьё, активированный уголь, медленный кондуктивный пиролиз, водопаровая активация, степень выгорания, адсорбционная активность по йоду, равновесная активность по толуолу

Благодарности: Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-26-00036, <https://rscf.ru/project/23-26-00036/>

Для цитирования: Сафин Р.Г., Сотников В.Г. Характеристики гранулированного активированного угля из смеси отходов растительного сырья // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 7. – С. 196–205. DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4386

UDC 67.05: 66.040.287
DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4386

Characteristics of granulated activated carbon from a mixture of plant raw material waste

R.G. Safin, V.G. Sotnikov✉

Kazan National Research Technological University, Kazan, Russian Federation

✉vcvcvc12345678@gmail.com

Abstract. Relevance. The need to increase the use of renewable energy sources in the economy to reduce the harmful effects on the environment. **Aim.** To assess the possibility of obtaining by the thermochemical method high-quality carbon adsorbents from a granular mixture of various wastes of plant origin. **Objects.** Samples of illiquid lumpy birch wood, walnut shells, sunflower seed husk, flax fires, anthracite coal. **Methods.** Physical experiments: conductive pyrolysis, water-steam activation and differential thermal analysis. The ash content and moisture content of the samples were determined according to SS R 56881-2016 and SS 33503-2015. Nitrogen adsorption isotherms were measured using a NOVA-1200e analyzer. The equilibrium activity for toluene was determined according to SS 8703-74, the adsorption activity for iodine was determined according to SS 6217-74. The determination of the density of the granules was carried out according to SS 15139-69. **Results.** The authors have established rational parameters for obtaining carbon adsorbents from granules of vegetable raw materials. The specific yield of pyrolysis products of a mixture of vegetable raw materials with pyrolysis resin was determined. The specific yield of carbonization products of the granular compacted mass showed an increase of 25% in comparison with the non-compacted mixture of vegetable raw materials. Rational parameters for obtaining activated carbon with the highest adsorption capacity are granules with a density of 1200 kg/m³ with a degree of burnout of the carbonization product of 70%. It was established that the obtained samples of adsorbents from granules of plant raw materials have high adsorption characteristics comparable to activated carbons obtained from fossil raw materials.

Keywords: vegetable raw materials, activated carbon, slow conductive pyrolysis, water-steam activation, degree of burnout, iodine adsorption activity, toluene equilibrium activity

Acknowledgements: The study was supported by the Russian Science Foundation grant no. 23-26-00036, <https://rscf.ru/project/23-26-00036/>

For citation: Safin R.G., Sotnikov V.G. Characteristics of granulated activated carbon from a mixture of plant raw material waste. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 7, pp. 196–205. DOI: 10.18799/24131830/2024/7/4386

Введение

Активированный уголь – адсорбент углеродистого типа, имеющий развитую микропористую структуру. Для промышленного производства активных углей чаще всего используют древесину, каменный уголь, бурый уголь, торф, скорлупу кокосовых орехов, причем до 70 % сырьевой базы составляют ископаемые угли, преимущества которых заключаются в высокой пористости и относительно низкой стоимости. Однако добыча ископаемого угля наносит вред экологии, также ископаемое топливо имеет ограниченный ресурс, который в скором времени будет исчерпан. В качестве перспективной альтернативы ископаемому сырью для получения активных углей могут быть рассмотрены различные отходы растительного происхождения [1–10].

Переработка растительных отходов является важным этапом улучшения жизни человека, как с экологической, так и с технической стороны. Целесообразность переработки обусловлена малой интенсивностью переработки данного сырья и большими предпосылками получения качественных материалов и новых источников энергии. Переработка вторичного растительного сырья способствует развитию экономики страны. Этому способствуют также экологические предпосылки. Земля сегодня является огромным резервуаром для скопления большого количества сельскохозяйственных отходов, которые пагубно влияют на состояние окружающей среды. Однако они являются хорошим сырьём для получения ценных материалов. Одним из таких материалов, получаемых при кон-

версии растительного сырья, является активированный уголь. Производство активных углей может вестись медленным кондуктивным пиролизом с последующей водопаровой активацией. Данный метод предполагает наличие большой сырьевой базы. При ориентации на один или два вида растительного сырья производство может иметь низкую эффективность. Исходя из этого, целесообразней будет переработка смесей различных видов растительного сырья. Известно также, что большинство растительных отходов имеют довольно низкую плотность и при термической переработке структура частиц представляет собой крупнодисперсную пыль. Поэтому при переработке растительных отходов в активированный уголь целесообразно получение гранулированных адсорбентов, которые также имеют преимущества при регенерации вследствие отсутствия пылевыведения. Процесс гранулирования обеспечивает также стабильные прочностные и геометрические характеристики [11–26].

Целью данной работы является исследование адсорбционных и физико-механических характеристик гранулированных адсорбентов, полученных из смеси растительных отходов методом медленного кондуктивного пиролиза с последующей водопаровой активацией.

Методы и материалы

В качестве сырья для получения образцов активированного угля использовались: неликвидная кусковая древесина березы, скорлупа грецкого ореха, лузга семян подсолнечника, костра льна. Также

был использован каменный уголь в качестве сравнительного образца. Характеристики образцов исследованы после достижения воздушно-сухого состояния в лабораторных условиях. Зольность и влажность образцов определены согласно ГОСТ Р 56881-2016 и ГОСТ 33503-2015.

Для подготовки к серии экспериментов сырье было измельчено до размеров 0,1 мм и высушено до достижения воздушно-сухого состояния, затем 4 вида сырья в равных количествах смешивались с пиролизной смолой в соотношении 10:1. Готовую смесь пластифицировали в экструдере и гранулировали в цилиндры диаметром 2,8 мм и длиной 4...6 мм. Давление варьировалось в пределах 20...80 МПа. Плотность полученных гранул находилась в пределах 600...1500 кг/м³.

Термогравиметрический анализ был проведен с помощью дериватографа Термоскан-2 в инертной среде гелия для исключения окисления образцов. При этом высушенные измельченные образцы сырья массой 0,3±0,03 г помещали в керамический тигель высотой 10 мм, диаметром 5 мм. Нагревание производили с 30 до 650 °С со скоростью подъема температуры 5 град/мин. Экзотермический температурный диапазон образцов определяли на ТГ-ДСК-анализаторе ZCT-1.

Медленный кондуктивный пиролиз растительного сырья проводили на установке, представленной на рис. 1, при температурном режиме 530 °С для растительного сырья и 650 °С для каменного угля со скоростью прогрета 5 °С/мин. Процесс пи-

ролиза длился до завершения выхода пиролизных газов, контроль выхода происходил с помощью замеров данных с мерника дистиллята и сборника газов. Установка состоит из муфельной печи – 2, в которую помещается камера пиролиза – 1. Конденсация пиролизных газов происходит в сепараторе – 3. Жидкая фракция стекает в мерник дистиллята – 4, а газ через гидрозатвор – 5 отбирается в сборник газа – 6.

Активация карбонизатов из растительных предшественников протекает при температуре водяного пара в диапазоне 800–900 °С [24], активация карбонизатов из каменноугольных предшественников протекает при температуре 800–1000 °С [25]. Исходя из ранее проведенных исследований [7], была выбрана температура водяного пара 900 °С. Угольные гранулы подвергали процессу водопаровой активации в течение 15–70 мин [7, 13] с целью определения степени выгорания Υ , %, которая получена как обратная величина для удельной массы твердого продукта карбонизации в установке, представленной на рис. 2.

Карбонизаты помещали в среднюю часть узла активации – 1, в котором имеются: перфорированная крышка – 3, трубопроводы подвода перегретого пара – 6 и отвода газов активации – 5. Узел активации помещали в муфельную печь – 7, которую разогревали до температуры 870 °С. Подача пара осуществлялась из парогенератора – 8 в змеевик – 4, который перегревал пар и подавал его в узел активации.

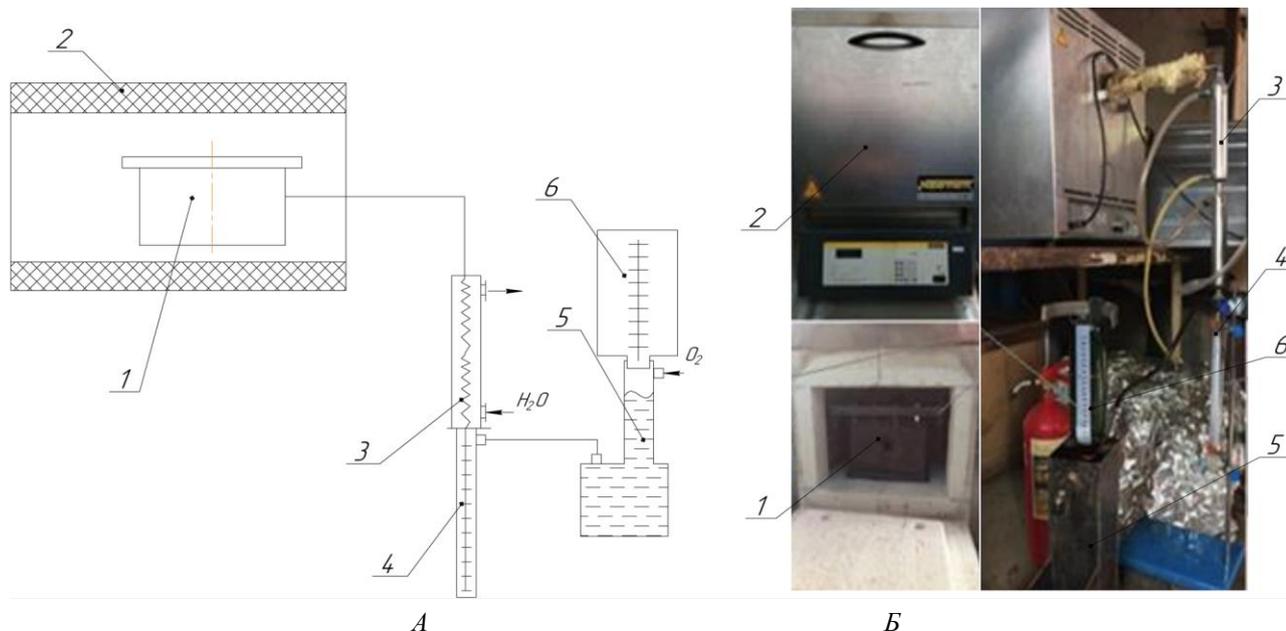


Рис. 1. Схема (А) и внешний вид (Б) экспериментальной установки для пирогенетической переработки растительных отходов: 1 – камера пиролиза; 2 – муфельная печь; 3 – сепаратор; 4 – мерник дистиллята; 5 – гидрозатвор; 6 – сборник газа

Fig. 1. Scheme (A) and external view (B) of the experimental setup for pyrolytic processing of plant waste: 1 – pyrolysis chamber; 2 – muffle furnace; 3 – separator; 4 – distillate dipstick; 5 – water seal; 6 – gas collector

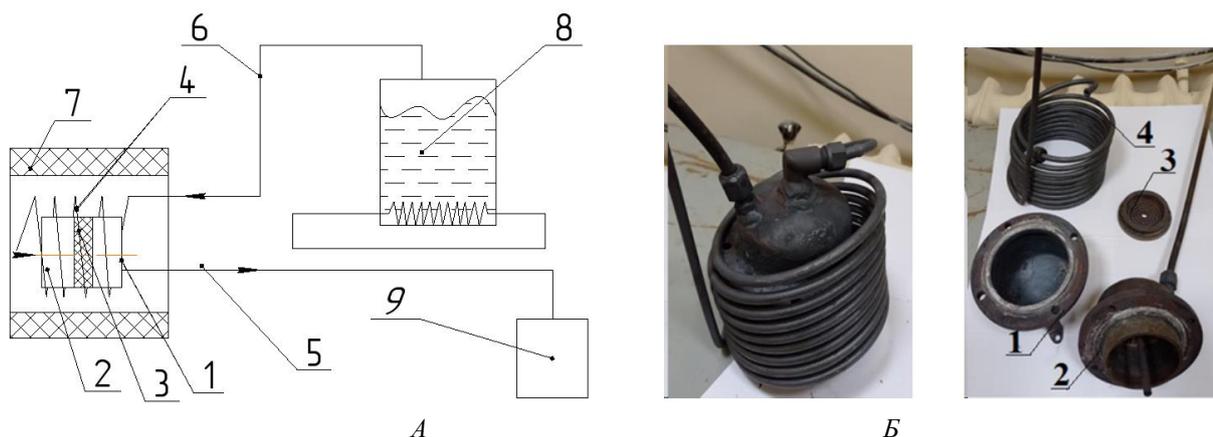


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для активации твердого остатка (А) и внешний вид узла активации (Б): 1 – средняя часть узла активации; 2 – верхняя часть узла активации; 3 – перфорированная крышка; 4 – змеевик; 5 – трубопровод отвода газов активации; 6 – патрубок подвода перегретого пара; 7 – муфельная печь; 8 – парогенератор; 9 – сепаратор

Fig. 2. Scheme of the experimental setup for solid residue activation (A) and the appearance of the activation unit (B): 1 – middle part of the activation unit; 2 – upper part of the activation node; 3 – perforated cover; 4 – coil; 5 – pipeline for removal of activation gases; 6 – branch pipe for supplying superheated steam; 7 – muffle furnace; 8 – steam generator; 9 – separator

Пар фильтровался через уголь, в результате из него выделялись газы активации, которые вместе с остатком водяного пара выводились из узла активации в сепаратор – 9. На данной установке экспериментальным путем определялась степень выгорания карбонизированного продукта. Продолжительность активации для требуемых значений выгорания определялась аналитическим путем, методика расчета представлена в работе [7].

Определение удельных масс продуктов пиролиза осуществлялось методом прямого взвешивания карбонизатов и пиролизного дистиллята, масса газа получена сопоставлением его плотности с объемом вытесненной жидкости. Также была проведена прямая калькуляция продуктов пиролиза. Анализ параметров пористой структуры углеродных сорбентов проводился с использованием быстродействующего анализатора сорбции газов NOVA-1200e методом снятия изотермы адсорбции азота при температуре 77 К. Равновесная активность по толуолу определялась согласно ГОСТ 8703-74. Адсорбционная активность по йоду определялась согласно ГОСТ 6217-74. Определение плотности гранул осуществлялось по ГОСТ 15139-69.

Обсуждение результатов

На рис. 3 представлены результаты исследования по уплотнению смеси растительной биомассы в гранулы.

Из кривой видно, что создание гранул высокой плотности требует значительных давлений, а соответственно, и затрат на создание аппаратного оформления.

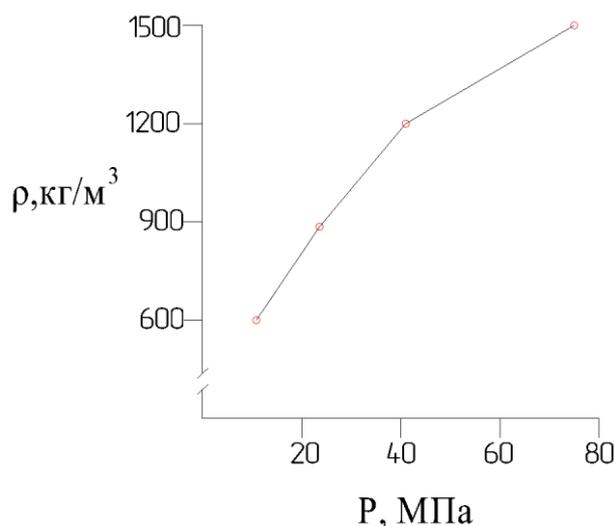


Рис. 3. Зависимость плотности гранул растительного сырья от давления при грануляции

Fig. 3. Dependence of the density of plant raw material granules on pressure during granulation

На рис. 4 представлены зависимости степени выгорания от продолжительности водопаровой активации исследуемых образцов при различных плотностях исходного сырья.

По кривым заметно значительное влияние плотности растительного сырья на начальном этапе активации. В процессе активации более плотное сырье выгорает с меньшей скоростью, в результате чего образуется более развитая структура пор, чем у менее плотного сырья. Также значительную роль играет структура сырья, что видно на примере активации каменного угля, процесс выгорания кото-

рого занимает гораздо более продолжительное время.

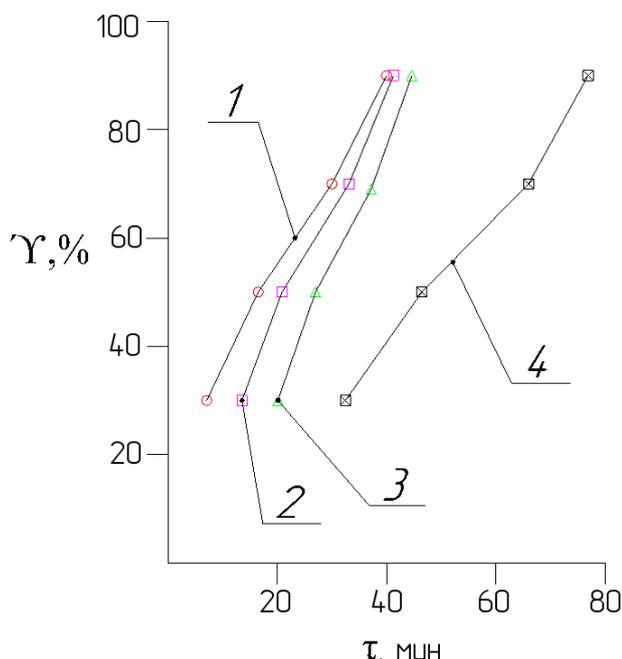


Рис. 4. Зависимость степени выгорания от продолжительности активации при различных плотностях гранул сырья, кг/м³: 1 – 600; 2 – 900; 3 – 1200; 4 – каменный уголь (антрацит) плотностью 1600 кг/м³

Fig. 4. Burnout degree dependence on activation duration at different densities of raw material granules, kg/m³: 1 – 600; 2 – 900; 3 – 1200; 4 – hard coal (anthracite) with a density of 1600 kg/m³

В табл. 1 представлены данные по удельному выходу продуктов пиролиза смеси растительного сырья, гранулированного растительного сырья с плотностью гранул 900 кг/м³ и каменного угля.

Таблица 1. Удельный выход продуктов пиролиза

Table 1. Specific yield of pyrolysis products

Параметры Parameters, %	Сырье Raw material	Смесь растительного сырья Mixture of vegetable raw materials	Гранулы растительного сырья Granules of vegetable raw materials	Каменный уголь Hard coal
Зольность/Ash content		0,4	0,5	3,8
Выход конденсируемых продуктов Yield of condensed products		50,0	44,0	4,0
Выход неконденсируемых продуктов Yield of non-condensed products		15,0	12,0	14,0
Углеродистый твердый остаток Carbon solid residue		35	44	82

Анализ таблицы показывает, что растительные отходы имеют более низкие значения зольности по сравнению с каменным углем. Предварительное смешение с пиролизной смолой, уплотнение биомассы и последующая грануляция положительно сказываются на удельном выходе основного продукта – твёрдого углеродистого остатка, прирост составил 9%. Это объясняется тем, что летучие продукты в уплотненной биомассе встречают сопротивление при фильтрации через биомассу, более тяжелые соединения лигнина не могут покинуть сырье и адсорбируются углеродистым остатком. Связующее вещество – пиролизная смола, также положительно влияет на выход карбонизированных продуктов, так как в своей основе имеет высокие удельные массы лигнина, который является основным структурным компонентом для образования угля. Однако, в свою очередь, очевиден больший выход продуктов карбонизации каменного угля в сравнении с растительным сырьем.

Результаты термогравиметрического исследования представлены в табл. 2. Фиксировались: начальная температура удаления летучих веществ, температурный диапазон максимальной потери массы исходного сырья, конечная температура удаления летучих веществ. Параметры сырья были аналогичны представленным в табл. 1.

Таблица 2. Термохимические параметры термического разложения

Table 2. Thermochemical parameters of thermal decomposition

Параметры Parameters, °C	Сырье Raw material	Смесь растительного сырья Mixture of vegetable raw materials	Гранулы растительного сырья Granules of vegetable raw materials	Каменный уголь Hard coal
Начальная температура удаления летучих компонентов Initial temperature for removal of volatile components		192	215	416
Экзотермический температурный диапазон Exothermic temperature range		297–398	305–403	489–565
Конечная температура удаления летучих компонентов Final devolatilization temperature		415	418	643

Смешение с пиролизной смолой и последующая грануляция сырья не сильно повышают его термическую устойчивость и температурные режимы процесса пиролиза. Каменный уголь обладает значительно большей термической устойчивостью, поэтому требуются значительные тепловые затраты на полную карбонизацию каменного угля.

Результаты анализа пористой структуры карбонизата и адсорбентов, полученных из растительных отходов, представлены в табл. 3. Данные приведены для образцов активированного угля со степенью выгорания в ~50 % и плотностью 900 кг/м³.

Таблица 3. Объем пор карбонизата (К) и активированного угля (АУ)

Table 3. Pore volume of carbonizate (C) and activated carbon (AC)

Параметры, см ³ /г Parameters, cm ³ /g	Сырье растительного сырья Mixture of vegetable raw materials		Гранулы растительного сырья Granules of vegetable raw materials		Каменный уголь Hard coal	
	К/С	АУ/АС	К/С	АУ/АС	К/С	АУ/АС
Объем пор Pore volume	1,43	1,56	1,48	1,73	1,21	1,23
Объем макропор Macropore volume	1,02	1,02	1,14	1,14	0,78	0,78
Объем мезопор Mesopore volume	0,29	0,23	0,23	0,21	0,24	0,19
Объем микропор Micropore volume	0,12	0,31	0,11	0,38	0,19	0,26

Анализ табл. 3 показал, что образование микропор при активации частично происходит из-за разрушения мезопор. Уплотненная гранулированная масса показывает лучшие результаты по микропористой структуре по сравнению с неуплотненной. Активированный уголь из каменного угля показал худший результат по микропористой структуре вследствие недостаточной степени выгорания. Авторы работы [26] проводили исследование по получению цилиндрических активированных углей методом химической активации. Полученные результаты исследования коррелируются с данными из табл. 3.

На рис. 5 представлена динамика образования микропор в активированных углях из образцов уплотненной гранулированной массы и каменного угля в зависимости от их степени выгорания.

Из представленных зависимостей видно, что динамика образования микропор у двух образцов различна. Образование микропористой структуры у растительного сырья происходит равномерно. Максимальные значения прироста микропор у уплотненного растительного сырья происходят в диапазоне 30–70 % выгорания исходного карбонизата. Более высокая плотность каменного угля предполагает большие усилия для создания микропористой структуры. Выгорание половины удельной массы угля приводит к образованию мезо- и макропор, которые при дальнейшем выгорании сырья разру-

шаются и развивают микропоры. Активированный уголь из каменного угля имеет больший удельный выход по сравнению с активированным углем из гранул растительного сырья, но уступает по объему микропор.

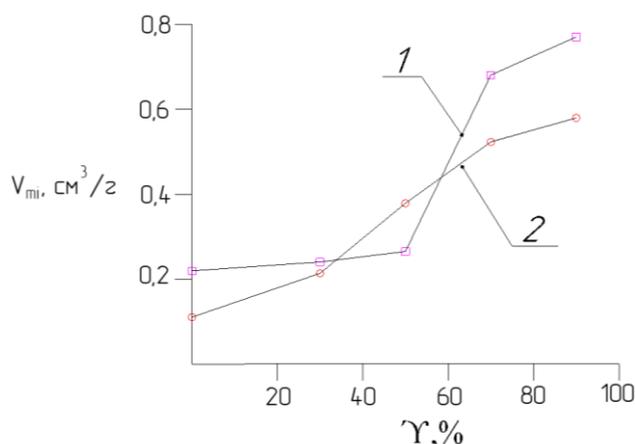


Рис. 5. Динамика образования микропор в активированных углях в зависимости от степени выгорания исходных продуктов карбонизации: 1 – уплотненное гранулированное растительное сырье; 2 – каменный уголь

Fig. 5. Dynamics of formation of micropores in activated carbons depending on the degree of burnout of the initial carbonization products: 1 – compacted granular plant material; 2 – hard coal

Полученные данные свидетельствуют о том, что углеродосодержащее сырье высокой плотности позволяет получать более развитую пористую структуру. Плотность исследуемых образцов составляет для образцов: биомассы в среднем 350 кг/м³, гранул из уплотненной биомассы 900 кг/м³, каменного угля (антрацита) 1600 кг/м³. Исходя из этого можно сделать вывод, что повышение уплотнения исходной биомассы может привести к улучшению качества активированного угля. На рис. 6 представлена зависимость объема микропор активированного угля от плотности исходного растительного сырья при различных степенях обгорания.

Из представленных кривых видно, что плотность сырья сильно влияет на характер пористой структуры. При этом степень уплотнения сырья для достижения наиболее развитой структуры микропор должна быть значительной. Так, уплотнение исходной растительной биомассы плотностью 350 кг/м³ до плотности 600 кг/м³ не дало значительного прироста в объеме микропор. Наиболее рационально уплотнить растительную биомассу до плотности 1200 кг/м³. Дальнейшее уплотнение вызывает незначительное увеличение объема микропор.

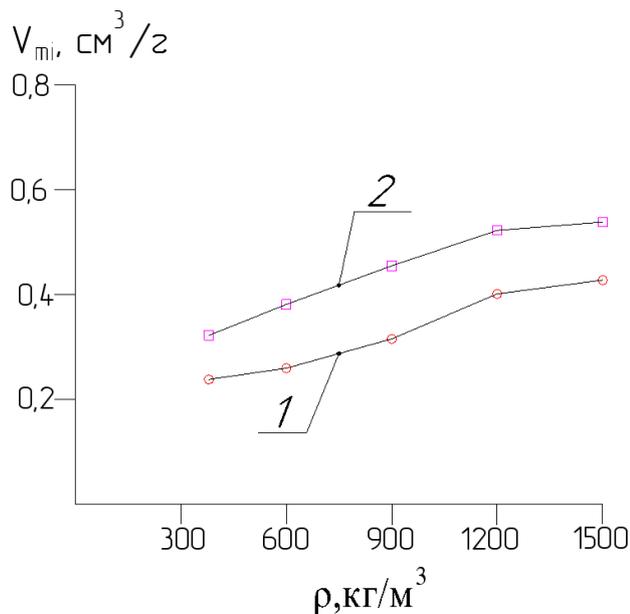


Рис. 6. Зависимость объема микропор активированного угля от плотности исходного гранулированного растительного сырья при степени обгорания: 1 – 50 %; 2 – 70 %

Fig. 6. Dependence of the volume of activated carbon micropores on the density of the initial granular plant material at burning degree of: 1 – 50%; 2 – 70%

Максимальные значения объема микропор у образца плотностью 1200 кг/м³ и степенью выгорания 70 % не превысили значения объема микропор каменноугольного активированного угля с аналогичной степенью выгорания. Максимальные значения объема микропор у активированного угля из гранулированного растительного сырья составили: 0,61 см³/г, а у активированного угля из антрацита – 0,68 см³/г, что в целом позволяет использовать растительный активированный уголь вместо ископаемого аналога в качестве высококачественного адсорбента. В табл. 4 представлены основные адсорбционные характеристики полученных образцов активированного угля.

Из табл. 4 видно, что полученные образцы имеют сопоставимые удельные поверхности и адсорбционные характеристики по активности. Полученные активированные угли имеют высокие показатели исследуемых адсорбционных свойств, значительно превосходящие значения ГОСТ 6217-74 и ГОСТ 8703-74. Авторы работы [27] провели исследование по сравнению адсорбционной активности активированных углей из древесных материалов

На рис. 7 представлены зависимости адсорбционной способности активированного угля от степени обгорания при водопаровой активации для гранул плотностью 1200 кг/м³.

Таблица 4. Адсорбционные характеристики активированного угля

Table 4. Adsorption characteristics of activated carbon

Сырье Raw material	Гранулы растительного сырья плотностью 900 кг/м ³ Vegetable granules with the density of 900 kg/m ³	Гранулы растительного сырья плотностью 1200 кг/м ³ Vegetable granules with the density of 1200 kg/m ³	Каменный уголь Hard coal
Параметры Parameters			
Удельная площадь поверхности, м ² /г Specific area surface, m ² /g	1654	1764	1632
Адсорбционная активность по йоду, %, ГОСТ 6217-74 БАУ-А, не менее 60 % Adsorption activity for iodine, %, SS 6217-74 BAU-A, not less than 60%	108	122	131
Равновесная активность по толуолу, ГОСТ 8703-74, не менее 145 г/дм ³ Equilibrium activity in toluene, SS 8703-74, not less than 145 g/dm ³	238	276	297

Как видно из кривых, для достижения равновесной активности по толуолу значений ГОСТ 8703-74 для марки AP-A водопаровую активацию угля необходимо проводить до степени выгорания активированного угля 32–37 %. Для достижения адсорбционной активности значений ГОСТ 6217-74 марки БАУ-А водопаровую активацию угля необходимо проводить до степени обгорания активированного угля 28–32 %. Таким образом, проведенные исследования показывают высокую адсорбционную эффективность гранулированных адсорбентов, полученных из смеси растительного сырья, не уступающих адсорбентам из ископаемого сырья. Авторы работы [27] провели исследование по сравнению адсорбционной активности активированных углей из древесных материалов без предварительного уплотнения, значение адсорбционной активности по йоду соотносимо с приведенными результатами данного исследования. Наибольшее значение адсорбционной активности по йоду показала плотная древесина березы, при активации которой образуется более развитая микропористая структура, менее плотная древесина яблони и сосновые шишки имеют меньшие значения йодного числа и объем пор, что подтверждает результаты данного исследования о том, что уплотнение сырья ведет к улучшению пористой структуры адсорбента.

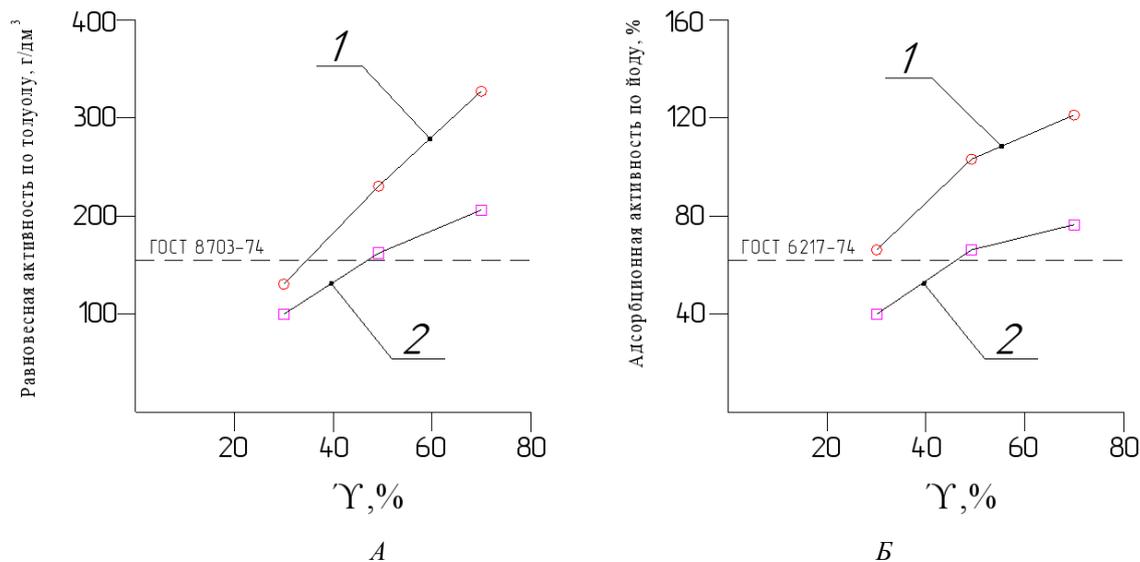


Рис. 7. Динамика изменения поглотительной способности от степени обгорания активированного угля: А) равновесная активность по толуолу, г/дм³; Б) адсорбционная активность по йоду, %. 1 – активированный уголь из гранулированного растительного сырья; 2 – активированный уголь из растительного сырья

Fig. 7. Dynamics of changes in adsorption capacity depending on the degree of burning of activated carbon: А) equilibrium activity for toluene, g/dm³; Б) adsorption activity for iodine, %. 1 – activated carbon from granulated vegetable raw materials; 2 – activated carbon from vegetable raw materials

Заключение

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Лабораторные образцы продемонстрировали высокие значения равновесной активности по толуолу и адсорбционной активности по йоду, сравнимые с активированным углем, полученным из ископаемого антрацита, что может свидетельствовать о возможности получения гранулированного активированного угля с развитой микропористой структурой из смеси

растительного сырья со связующим веществом – пиролизной смолой.

2. Ключевыми параметрами при формировании микропористой структуры у гранул из смеси растительного сырья являются степень выгорания угля при активации и плотность исходного сырья.
3. Активированные угли из смеси уплотненной растительной массы, демонстрируют лучшие адсорбционные показатели относительно образцов активированного угля без предварительного уплотнения растительной массы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Процесс пиролиза биомассы как источник получения альтернативного топлива / В.М. Капустин, Е.А. Чернышева, Ю.В. Кожевникова, В.Ю. Асаула // Технологии нефти и газа. – 2011. – № 3 (74). – С. 31–35.
2. Исследование тепловых эффектов пиролиза соломы для оценки возможности его реализации в автотермическом режиме / А.В. Астафьев, Р.Б. Табакаев, Д.Е. Мусафинов, А.С. Заворин, Ю.В. Дубинин, Н.А. Языков, В.А. Яковлев // Химия растительного сырья. – 2019. – № 2. – С. 271–280.
3. Энергия из отходов текстильного производства / А.А. Демесинова, А.Б. Айдарова, Г.М. Молдогазиева, Э.Е. Досмуратова // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. – 2019. – № 1 (379). – С. 71–75.
4. Пукашева Г.Н., Коробкова А.Ю. Анализ возможностей получения угольных адсорбентов из отходов синтетических тканей. Особенности химии поверхности угольных адсорбентов // Проблемы и решения теоретических и прикладных задач сервисных технологий. – М.: МГУС, 2006. – С. 92–98.
5. Safin R.G., Ziatdinov R.R., Sotnikov V.G. Optimizing the structure of a production system for activated carbon // Russ. Engin. Res. – 2022. – Vol. 42. – P. 867–870.
6. Проблемы аппаратного оформления процессов переработки измельченной древесины в активные угли / Ю.Л. Юрьев, В.П. Орлов, С.А. Панюта, Т.В. Штеба // Лесной журнал. – 2000. – № 5–6. – С. 52–57.
7. Сафин Р.Г., Сотников В.Г. Пирогенетическая переработка растительных отходов в активированный уголь: монография. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2022. – 108 с.
8. Контроль качества активированного угля методом ядерного магнитного резонанса / Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников, Л.Ю. Грунин, М.С. Иванова, Д.Ф. Зиятдинова // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2022. – № 5 (389). – С. 173–185.
9. Enhancement of ciprofloxacin sorption on chitosan/ biochar hydrogel beads / M.Z. Afzal, X.-F. Sun, J. Liu, C. Song, S.-G. Wang, A. Javed // Science of the Total Environment. – 2018. – Vol. 639. – P. 560–569.

10. Fonseca F.G., Soares Dias A.P. Almond shells: catalytic fixed-bed pyrolysis and volatilization kinetics // *Renewable Energy*. – 2021. – Vol. 180. – P. 1380–1390.
11. Lehmann J. Terra Preta Nova – where to from here? / *Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision* / Eds. W.I. Woods, W.G. Teixeira, J. Lehmann, C. Steiner, A. Winkler Prins, L. Rebellato. – Dordrecht, Springer, 2009. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9031-8_28.
12. Structural characterization and magnetic behavior of nickel nanoparticles encapsulated in monolithic wood-derived porous carbon / V.V. Popov, A.A. Spitsyn, D.A. Ponomarev et al. // *J Mater Sci*. – 2021. – Vol. 56. – P. 18493–18507. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06409-9>.
13. Кочева Л.С., Карманов А.П., Канарский А.В. Диатомиты и лигнины как адсорбенты микотоксинов // *Химия растительного сырья*. – 2022. – № 2. – С. 73–84.
14. Belyy V., Kuzivanov I., Istomina E. Water stable colloidal lignin-PVP particles prepared by electrospray // *International Journal of Biological Macromolecules*. – 2021. – Vol. 190. – P. 533–542.
15. Arenas L.R. Removal efficiency and adsorption mechanisms of CeO₂ nanoparticles onto granular activated carbon used in drinking water treatment plants // *Science of the total environment*. – 2023. – Vol. 856. – P. 159261.
16. Jamaludin N.F.M. Biohydrogen production with utilisation of magnetite nanoparticles embedded in granular activated carbon from coconut shell // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2023. – Vol. 48. – № 31. – P. 11695–11708.
17. Zhang J. Advanced water treatment process by simultaneous coupling granular activated carbon (GAC) and powdered carbon with ultrafiltration: role of GAC particle shape and powdered carbon type // *Water Research*. – 2023. – P. 119606.
18. Li L. Effect of granular activated carbon and chloroform on chain elongation with simple substrate ethanol and acetate // *Environmental Research*. – 2023. – P. 115324.
19. Yan Y. Chromium removal from contaminated soil using a novel FeOx/granular activated carbon-based three-dimensional electrokinetic system // *Chemical Engineering Journal*. – 2023. – Vol. 455. – P. 140613.
20. Xing X. Electrochemical regeneration of granular activated carbon saturated by p-nitrophenol in BDD anode system // *Process Safety and Environmental Protection*. – 2023. – Vol. 170. – P. 207–214.
21. Gurung A. et al. Denitrification in microbial fuel cells using granular activated carbon as an effective biocathode // *Energies*. – 2023. – Vol. 16. – № 2. – P. 709.
22. Liu L. Performance enhancement of an upflow anaerobic dynamic membrane bioreactor via granular activated carbon addition for domestic wastewater treatment // *Sustainability*. – 2023. – Vol. 15. – № 2. – P. 1055.
23. Al-sareji O.J. Removal of emerging pollutants from water using enzyme-immobilized activated carbon from coconut shell // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2023. – Vol. 11. – № 3. – P. 109803.
24. Дроздова Н.А., Юрьев Ю.Л. Активация березового и осинового угля // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2012. – Т. 15. – № 13. – С. 147–148.
25. Взаимодействие карбонизированного угля с перегретым водяным паром / Е.И. Кагакин, А.Р. Богомолов, С.А. Шевырев, Н.А. Прибатурин // *Ползуновский вестник*. – 2013. – № 1. – С. 135–138.
26. Получение гранулированного активного угля из отходов растительного сырья / Е.А. Фарберова, Е.А. Тиньгаева, А.Д. Чучалина и др. // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. – 2018. – Т. 61. – № 3. – С. 51–57. DOI: 10.6060/tcct.20186103.5612.
27. Сравнение адсорбционной способности углеродных сорбентов из различных растительных предшественников / А.А. Спицын, М.И. Минич, Д.А. Пономарев, Н.И. Богданович // *Химия растительного сырья*. – 2021. – № 4. – С. 345–350. DOI: 10.14258/jcprm.2021049250

Информация об авторах

Рушан Гареевич Сафин, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой переработки древесных материалов Казанского национального исследовательского технологического университета, Россия, 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68. safin@kstu.ru

Виктор Георгиевич Сотников, аспирант, ассистент кафедры переработки древесных материалов Казанского национального исследовательского технологического университета, Россия, 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68. vcvvc12345678@gmail.com

Поступила в редакцию: 08.09.2023

Поступила после рецензирования: 16.10.2023

Принята к публикации: 23.05.2024

REFERENCES

1. Kapustin V.M., Chernysheva E.A., Kozhevnikova Yu.V., Asaula V.Yu. Biomass pyrolysis process as a source of alternative fuel production. *Technologies of oil and gas*, 2011, no. 3 (74), pp. 31–35. (In Russ.)
2. Astafiev A.V., Tabakaev R.B., Musafirov D.E., Zavorin A.S., Dubinin Yu.V., Yazykov N.A., Yakovlev V.A. Study of the thermal effects of straw pyrolysis to assess the possibility of its implementation in autothermal mode. *Chemistry of plant raw materials*, 2019, no. 2, pp. 271–280. (In Russ.)
3. Demesinova A.A., Aidarova A.B., Moldogazieva G.M., Dosmuratova E.E. Energy from waste products of textile production. *Izvestiya vuzov. Technology of the textile industry*, 2019, no. 1 (379), pp. 71–75. (In Russ.)
4. Pukasheva G.N., Korobkova A.Yu. Analysis of the possibilities of obtaining coal adsorbents from synthetic fabric waste. Peculiarities of surface chemistry of coal adsorbents. *Problems and solutions of theoretical and applied problems of service technologies*. Moscow, MGUS Publ., 2006. pp. 92–98. (In Russ.)

5. Safin R.G., Ziatdinov R.R., Sotnikov V.G. Optimizing the structure of a production system for activated carbon. *Russ. Engine. Res.*, 2022, no. 42, pp. 867–870.
6. Yuryev Yu.L., Orlov V.P., Panyuta S.A., Shteba T.V. Problems of hardware design of the processes of processing shredded wood into active coals. *Forest Journal*, 2000, no. 5, pp. 52–57. (In Russ.)
7. Safin R.G., Sotnikov V.G. *Pyrogenetic processing of plant waste into activated carbon: monograph*. Kazan, KNRTU Publ. House, 2022. 1380 p. (In Russ.)
8. Safin R.G., Sotnikov V.G., Grunin L.Yu., Ivanova M.S., Ziatdinova D.F. Control of the quality of activated carbon by the method of nuclear magnetic resonance. *Izvestia of higher educational institutions. Forest magazine*, 2022, no. 5 (389), no. 173–185. (In Russ.)
9. Afzal M.Z., Sun X.-F., Liu J., Song C., Wang S.-G., Javed A. Enhancement of ciprofloxacin sorption on chitosan/ biochar hydrogel beads. *Science of the Total Environment*, 2018, vol. 639, pp. 560–569.
10. Fonseca F.G., Soares Dias A.P. Almond shells: catalytic fixed-bed pyrolysis and volatilization kinetics. *Renewable Energy*, 2021, vol. 180, pp. 1380–1390.
11. Lehmann J. Terra Preta Nova – where to from here? *Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision*. Eds. W.I. Woods, W.G. Teixeira, J. Lehmann, C. Steiner, A. Winkler Prins, L. Rebellato. Dordrecht, Springer, 2009. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9031-8_28.
12. Popov V.V., Kirilenko D.A., Orlova T.S. Structural characterization and magnetic behavior of nickel nanoparticles encapsulated in monolithic wood-derived porous carbon. *Journal of Materials Science*, 2021, vol. 56, pp. 18493–18507. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06409-9>.
13. Kocheva L.S., Karmanov A.P., Kanarsky A.V. Diatomites and lignins as adsorbents of mycotoxins. *Chemistry of vegetable raw materials*, 2022, no. 2, pp. 73–84. (In Russ.)
14. Belyy V., Kuzivanov I., Istomina E. Water stable colloidal lignin-PVP particles prepared by electrospray. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2021, vol. 190, pp. 533–542.
15. Arenas L. R. Removal efficiency and adsorption mechanisms of CeO₂ nanoparticles onto granular activated carbon used in drinking water treatment plants. *Science of the total environment*, 2023, vol. 856, pp. 159261.
16. Jamaludin N. F. M. Biohydrogen production with utilization of magnetite nanoparticles embedded in granular activated carbon from coconut shell. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, vol. 48, no. 31, pp. 11695–11708.
17. Zhang J. Advanced water treatment process by simultaneous coupling granular activated carbon (GAC) and powdered carbon with ultrafiltration: Role of GAC particle shape and powdered carbon type. *Water Research*, 2023, pp. 119606.
18. Li L. Effect of granular activated carbon and chloroform on chain elongation with simple substrate ethanol and acetate. *Environmental Research*, 2023, pp. 115324.
19. Yan Y. Chromium removal from contaminated soil using a novel FeOx/granular activated carbon-based three-dimensional electrokinetic system. *Chemical Engineering Journal*, 2023, vol. 455, pp. 140613.
20. Xing X. Electrochemical regeneration of granular activated carbon saturated by p-nitrophenol in BDD anode system. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, vol. 170, pp. 207–214.
21. Gurung A. Denitrification in microbial fuel cells using granular activated carbon as an effective biocathode. *Energies*, 2023, vol. 16, no. 2, pp. 709.
22. Liu L. Performance enhancement of an upflow anaerobic dynamic membrane bioreactor via granular activated carbon addition for domestic wastewater treatment. *Sustainability*, 2023, vol. 15, no. 2, pp. 1055.
23. Al-sareji O.J. Removal of emerging pollutants from water using enzyme-immobilized activated carbon from coconut shell. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2023, vol. 11, no. 3, pp. 109803.
24. Drozdova N.A., Yuryev Yu.L. Activation of birch and aspen coal. *Bulletin of the Kazan Technological University*, 2012, vol. 15, no. 13, pp. 147–148. (In Russ.)
25. Kagakin E.I., Bogomolov A.R., Shevyrev S.A., Pribaturin N.A. Interaction of carbonized coal with superheated water steam. *Polzunovsky Bulletin*, 2013, no. 1, pp. 135–138. (In Russ.)
26. Farberova E.A., Tingaeva E.A., Chuchalina A.D. Preparation of granular activated carbon from plant waste. *News of higher educational institutions. Series: Chemistry and chemical technology*, 2018, vol. 61, no. 3, pp. 51–57. (In Russ.) DOI: 10.6060/tcct.20186103.5612.
27. Spitsyn A.A., Minich M.I., Ponomarev D.A., Bogdanovich N.I. Comparison of the adsorption capacity of carbon sorbents from various plant precursors. *Chemistry of plant raw materials*, 2021, no. 4, pp. 345–350. (In Russ.) DOI: 10.14258/jcprm.2021049250

Information about the authors

Rushan G. Safin, Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Wood Materials Processing, Kazan National Research Technological University, 68, K. Marks street, Kazan, 420015, Russian Federation. safin@kstu.ru

Viktor G. Sotnikov, Postgraduate Student, Assistant, Kazan National Research Technological University, 68, K. Marks street, Kazan, 420015, Russian Federation. vcvcvc12345678@gmail.com

Received: 08.09.2023

Revised: 16.10.2023

Accepted: 23.05.2024