

Леса России и хозяйство в них. 2025. № 4 (95). С. 148–156.

Forests of Russia and economy in them. 2025. № 4 (95). P. 148–156.

Научная статья

УДК 661.183.2

DOI: 10.51318/FRET.2025.95.4.014

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ АДсорбЦИИ ТАНИНОВ НА УГЛЕРОДНЫХ НАНОПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛАХ

Т. М. Панова¹, О. Д. Авдюкова², И. К. Гиндулин³, А. В. Суховеева⁴,
Д. А. Зверева⁵

^{1–5} Уральский государственный лесотехнический университет,
Екатеринбург, Россия

Автор, ответственный за переписку: Авдюкова Оксана Дмитриевна,
avdyukovaod@gmail.com

Аннотация. Активные угли благодаря своим физико-химическим свойствам широко применяются в различных отраслях, включая пищевую промышленность. Например, активный древесный уголь эффективно удаляет высокомолекулярные соединения, вызывающие помутнение солодовых напитков. Исследования показали, что углеродные нанопористые адсорбенты можно производить из древесины различных пород, произрастающих на территории ее промышленной переработки, что делает их перспективным направлением в синтезе углеродных сорбентов. Технология использования активного угля зависит от свойств среды и размера сорбируемых молекул. Ключевое влияние на свойства угля оказывают параметры пиролиза и активации. Эксперименты с промышленными и лабораторными образцами, проведенные в научно-исследовательской лаборатории УГЛТУ, подтвердили возможность производства эффективных сорбентов стабильного качества с низкой себестоимостью за счет возможности регулирования процессов их получения. Применение экспериментальных углей из различных пород древесины на пивоваренных заводах Свердловской области позволит повысить коллоидную стойкость пива. Обработка нанопористым активным древесным углем не только улучшает качество продукта, но и позволяет создать более экономически эффективную по сравнению с существующими методами технологию.

Ключевые слова: нанопористые углеродные сорбенты, активные угли, адсорбция, коллоидная стойкость, модели адсорбции

Для цитирования: Исследование процессов адсорбции танинов на углеродных нанопористых материалах // Т. М. Панова, О. Д. Авдюкова, И. К. Гиндулин [и др.] // Леса России и хозяйство в них. 2025. № 4 (95). С. 148–156.

Original article

RESEARCH OF TANNIN ADSORPTION PROCESSES ON CARBON NANOPOROUS MATERIALS

Tatiana M. Panova¹, Oksana D. Avdyukova², Ildar K. Gindulin³,
Arina V. Sukhovceva⁴, Darya A. Zvereva⁵

¹⁻⁵ Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

Corresponding author: Oksana D. Avdyukova,
avdyukovaod@gmail.com

Abstract. Activated carbons are widely used in many industries including food production due to their physicochemical properties. For example, activated wood charcoal effectively removes high-molecular compounds causing turbidity of malt beverages. Researches have shown the possibility of producing carbon nanoporous adsorbents from various types of wood growing within industrial development zones, which is a promising direction for synthesizing coal-based sorbents. The technology for using activated carbon depends on the properties of the medium and the size of the molecules being sorbed. Pyrolysis and activation parameters significantly influence the properties of the carbon. Experiments with industrial and laboratory samples conducted at USFEU's research laboratory confirmed the feasibility of obtaining effective stable-quality sorbents with low costs by regulating technological processes. Application of experimental carbons made from different tree species at breweries in the Sverdlovsk region will increase beer colloid stability. Treatment with nanoporous activated charcoal improves product quality and creates an economically more efficient technology compared to existing methods.

Keywords: nanoporous carbon sorbents, activated carbons, adsorption, colloidal stability, adsorption models

For citation: Research of tannin adsorption processes on carbon nanoporous materials // T. M. Panova, O. D. Avdyukova, I. K. Gindulin [et al.] // Forests of Russia and economy of them. 2025. № 4 (95). P. 148–156.

Введение

В настоящее время активно ведутся работы по совершенствованию качественных характеристик и увеличению ассортимента ряда слабоалкогольных напитков с использованием инновационных технологических приемов и методов их адсорбционной очистки, в основе которых применяются углеродные нанопористые материалы различного происхождения.

Повсеместно проводятся научно-исследовательские работы в отрасли пищевой безопасности продуктов питания и напитков. Для указанных целей внедряются различные адсорбенты и усовершенствованные методы технологической обработки. Ведущую позицию занимают активные угли, получаемые из древесины различных пород (Гаврилова, Назаров, 2015).

Углеродные адсорбенты в сравнении с адсорбентами синтетического происхождения наделены более высокой селективностью, а содержание вредных веществ в них значительно меньше, чем у неорганических сорбентов (Кинле, Бадер, 1984). В связи с этим получение углеродных адсорбентов из древесины методом пиролиза с последующей активацией и их использование для глубокой очистки напитков, соков и водно-спиртовых растворов имеют важное практическое и научное значение.

Согласно экспериментальным данным, активный уголь возможно производить из наиболее распространенных на территории Уральского округа пород древесины, таких как береза, осина и сосна. Помимо этого, как показали полученные данные при использовании экспериментального активного

угля в лаборатории УГЛТУ, процесс адсорбции протекает эффективнее, чем при применении промышленного угля.

Цель, объекты и методика их исследования

Целью работы является исследование сорбционных свойств экспериментальных активных углей (АУ), полученных из древесных углей на основе березы, осины, сосны, по извлечению танинов.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи.

1. Исследовать процесс адсорбции танинов экспериментальными активными углями с применением моделей сорбции.
2. Определить показатели энергии Гиббса для исследуемых образцов АУ.
3. Оценить эффективность сорбции полифенолов из пива экспериментальными активными углями.

Объект исследования – экспериментальные древесные активные угли из разных пород древесины, полученные в научно-исследовательской лаборатории УГЛТУ.

Адсорбционную активность по йоду определяли по ГОСТ 6217, осветляющую способность – по индикатору метиленовому синему в соответствии с ГОСТ 4453–74.

Одним из компонентов, влияющих на коллоидную стойкость пива, являются полифенолы. В данной работе в качестве модельных растворов полифенолов были использованы растворы танина.

Для описания процесса адсорбции применяли следующие модели: модель Ленгмюра; модель Фрейндлиха; модель БЭТ; модель Темкина; модель Дубинина – Радужкевича; модель Френкеля – Хелси – Хилла; модель Флори – Хаггинса; модель Гаркинса – Джура.

Содержание танина определяли методом Франкена – Люикса. Значение сорбционной емкости рассчитывали по формуле

$$A = \frac{(C_s - C_e)}{mV}, \quad (1)$$

где A – сорбционная емкость, ммоль/г,

C_s – начальная концентрация адсорбата, ммоль/л,

C_e – равновесная концентрация адсорбата, ммоль/л,

m – навеска адсорбента, г,

V – объем раствора, дм³.

Для расчета предельной сорбции A_∞ и константы Ленгмюра применяли уравнение Ленгмюра в линейном виде:

$$\frac{1}{A} = \frac{1}{A_\infty} + \frac{1}{K_L A_\infty C_e}. \quad (2)$$

Энергию Гиббса определяли с помощью константы Ленгмюра по формуле

$$\Delta G = RT \ln (K_L), \quad (3)$$

где R – универсальная газовая постоянная,

T – температура,

K_L – константа Ленгмюра.

Результаты и их обсуждение

Проведена сравнительная оценка адсорбционных характеристик промышленного и экспериментальных АУ, данные представлены в табл. 1.

Все исследуемые образцы АУ соответствуют требованиям ГОСТ 6217 для древесных активных дробленых углей по адсорбционной активности по йоду и ГОСТ 4453 для активных осветляющих углей по метиленовому синему.

Результаты свидетельствуют, что все экспериментальные АУ характеризуются сравнительно высокой сорбционной активностью как по йоду, так и по метиленовому синему в сравнении с промышленным АУ.

Промышленный образец продемонстрировал достаточно низкие сорбционные свойства по йоду – 72 % и 270,8 мг/г по метиленовому синему.

Наибольшая сорбционная активность по йоду, характеризующая содержание микропор, наблюдается у АУ из березы – 103,2 % и АУ из осины – 102,3 %, в связи с этим АУ из данных пород древесины могут быть рекомендованы для сорбции низкомолекулярных соединений.

Сравнительно высокая сорбционная активность по метиленовому синему, характеризующая

содержание мезопор, также наблюдается у АУ из древесины березы (370 мг/г) и осины (371 мг/г). В результате этого для сорбции среднемолекулярных соединений также рекомендованы АУ из древесины березы и осины.

Активный уголь, полученный из сосны, в сравнении с березовым и осиновым АУ обладает пониженной сорбционной активностью и по йоду, и по метиленовому синему. Однако максимальные

значения адсорбционной активности по йоду (95,6 %) и по метиленовому синему (343 мг/г) превышают значения промышленного АУ и соответствуют требованиям нормативных документов (Исследование возможности..., 2010).

Далее нами исследованы процессы адсорбции танина полученными экспериментальными активными углями. На рис. 1 приведены изотермы сорбции.

Таблица 1

Table 1

Адсорбционные характеристики промышленного и экспериментальных активных углей
Adsorption characteristics of industrial and experimental activated carbons

Образец угля Sample of carbone	Адсорбционная активность по йоду, % Adsorption activity by iodine, %	Осветляющая способность по метиленовому синему, мг/г Brightening capacity of methylene blue, mg/g
Промышленный уголь марки CARBOCLEAN-SUN-V (УралХимСорб) Industrial carbon CARBOCLEAN-SUN-V (Ural Chemical Sorbent)	72,0	270,8
Березовый активный уголь Birch activated carbon	103,2	370,0
Осиновый активный уголь Aspen activated carbon	102,3	371,0
Сосновый активный уголь Pine activated carbon	95,6	343,0

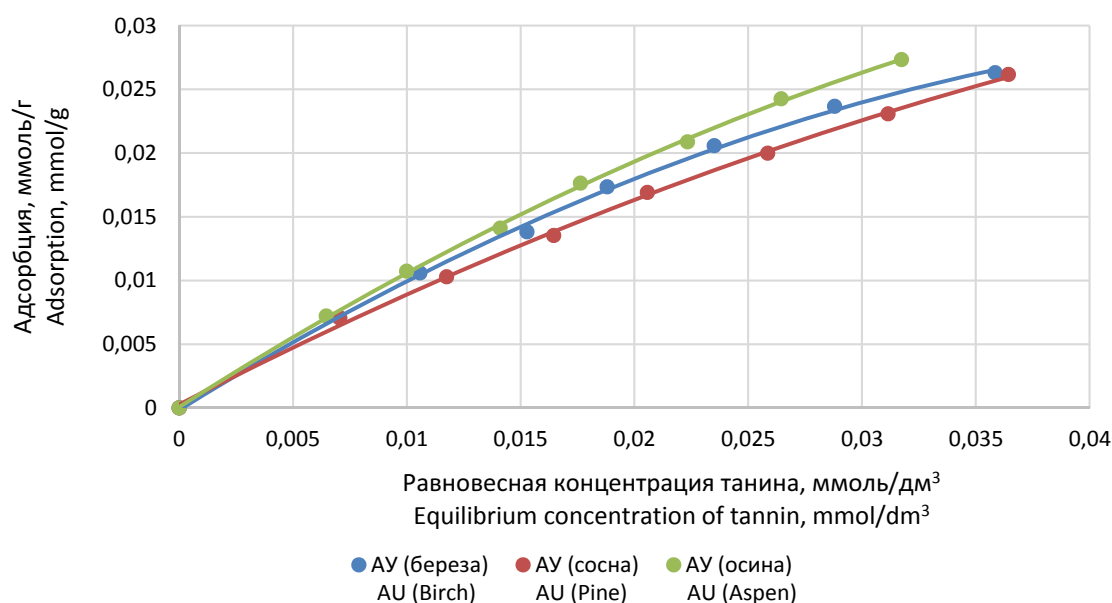


Рис. 1. Изотермы сорбции танина экспериментальными углями

Fig. 1. Isotherms of tannin sorption by experimental carbons

Изотермы сорбции танина экспериментальными углями демонстрируют максимальную активность осинового АУ, менее эффективным является АУ из березы, наименьшие значения – при обработке осиновым АУ.

Видно, что начальная часть изотерм характеризуется достаточно высокой крутизной, что свидетельствует о высокой сорбционной емкости всех углей при низких концентрациях танина.

По мере увеличения концентрации танина в растворе скорость сорбции замедляется и изотерма приближается к горизонтальной асимптоте, что соответствует насыщению сорбционных центров на угле (Кунце, 2001).

Результаты обработки данных по моделям адсорбции показали, что наиболее адекватно про-

цесс описывают модели Ленгмюра и Фрейндлиха. На рис. 2 и 3 приведены графики моделей Ленгмюра и Фрейндлиха для процесса сорбции танина березовым АУ.

На рис. 4 и 5 приведены графики моделей Ленгмюра и Фрейндлиха для процесса сорбции танина осиновым АУ.

На рис. 6 и 7 приведены графики моделей Ленгмюра и Фрейндлиха для процесса сорбции танина сосновым АУ.

Из графиков видно, что полученные уравнения характеризуются достаточно высокими коэффициентами аппроксимации, составляющими более 0,99 для всех используемых углей.

В табл. 2 приведены рассчитанные значения констант сорбции танина исследуемыми углями.

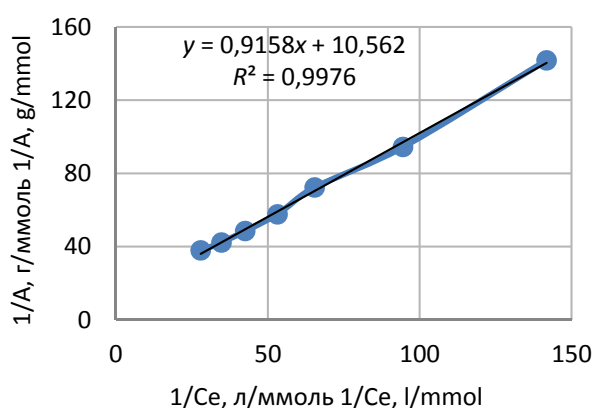


Рис. 2. Модель Ленгмюра для сорбции танина березовым АУ

Fig. 2. Langmuir model for tannin sorption by birch AC

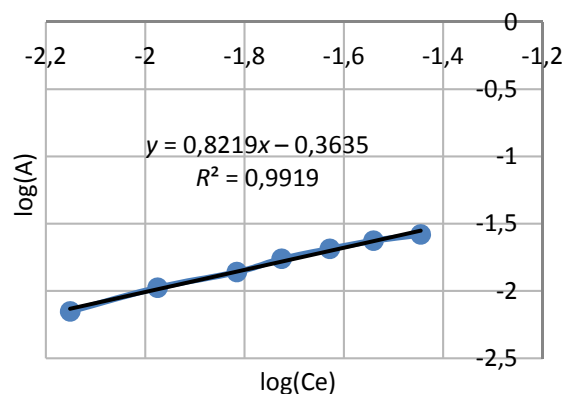


Рис. 3. Модель Фрейндлиха для сорбции танина березовым АУ

Fig. 3. The Freundlich model for tannin sorption by birch AC

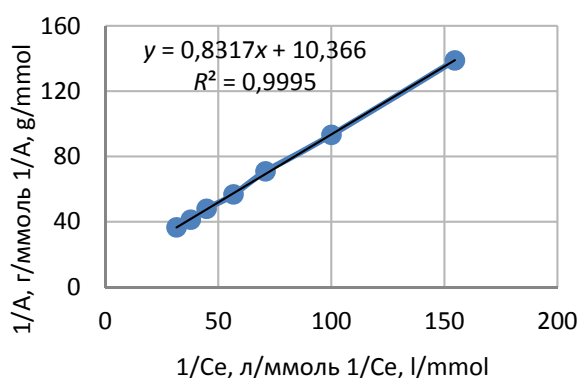


Рис. 4. Модель Ленгмюра для сорбции танина осиновым АУ

Fig. 4. Langmuir model for tannin sorption by aspen AC

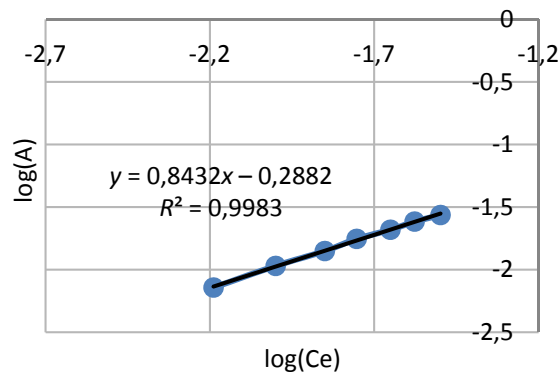


Рис. 5. Модель Фрейндлиха для сорбции танина осиновым АУ

Fig. 5. The Freundlich model for the sorption of tannin by aspen AC

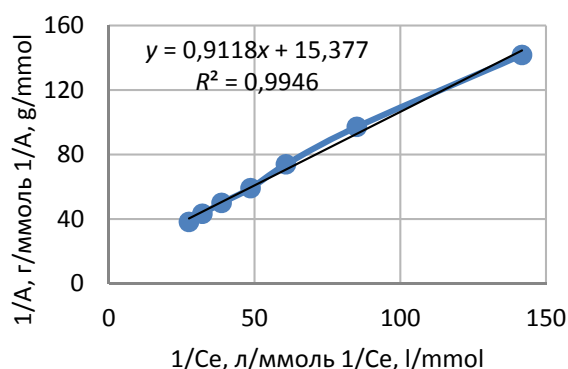


Рис. 6. Модель Ленгмюра для сорбции танина сосновым АУ

Fig. 6. Langmuir model for tannin sorption by pine AC

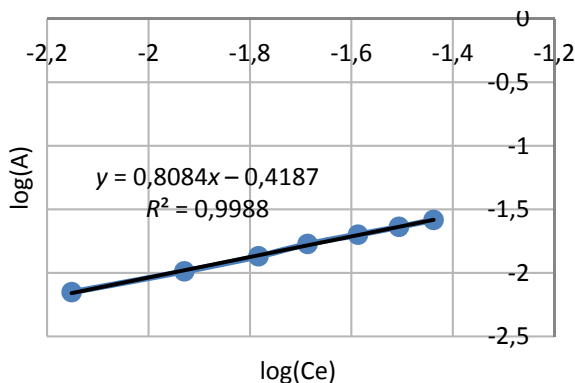


Рис. 7. Модель Фрейндлиха для сорбции танина сосновым АУ

Fig. 7. The Freundlich model for tannin sorption by pine AC

Таблица 2

Table 2

Рассчитанные значения констант сорбции танина исследуемыми углями

Calculated values of tannin sorption constants by the researched carbon

Образец АУ Sample AC	Предельная сорбция A_{∞} , ммоль/г Maximum sorption A_{∞} , mmol/g	Константа Ленгмюра K_L Langmuir's constant K_L	Коэффициент разделения R_L Separation coefficient R_L	Константы Фрейндлиха Freundlich constants	
				K_F	n
Березовый Birch	0,095	11,53	0,38	0,43	0,82
Сосновый Pine	0,065	16,86	0,29	0,38	0,81
Осиновый Aspen	0,096	12,46	0,36	0,51	0,84

Как известно, высокие значения предельной сорбции и низкие значения константы Ленгмюра характерны для сорбентов с высокой активностью. Полученные результаты свидетельствуют, что максимальной предельной адсорбцией характеризуются осиновый и березовый АУ. При использовании соснового АУ предельная сорбция заметно ниже. Положительные значения коэффициента разделения доказывают, что условия сорбции благоприятны для всех исследуемых АУ (Михеева и др., 2013).

Константа Фрейндлиха K_F , характеризующая сорбционную способность, имеет наибольшее значение для осинового угля, немного ниже у березового, самое низкое значение – для соснового АУ.

Константа n , оценивающая интенсивность взаимодействия сорбента с адсорбатом, свидетель-

ствует, что по мере заполнения поверхности энергия связей возрастает для всех испытуемых АУ (Панова, 2020).

Рассчитанные показатели энергии Гиббса приведены в табл. 3.

Отрицательные значения энергии Гиббса свидетельствуют о самопроизвольном протекании процесса адсорбции танина на всех исследуемых АУ. Значения энергии Гиббса показывают, что сосновый уголь характеризуется сравнительно большей скоростью процесса сорбции, связанной с наличием развитой структуры транспортных пор.

Для изучения возможности использования активных древесных углей для повышения коллоидной стойкости пива изучено их влияние на степень извлечения полифенолов при обработке пива (Панова и др., 2022).

Таблица 3

Table 3

Показатели энергии Гиббса для исследуемых образцов АУ
Gibbs energy indicators for the researched AC samples

Образец АУ AC Sample	Энергия Гиббса, ΔG , Дж/моль Gibbs Energy, ΔG , Дж/моль
Березовый Birch	–6058
Сосновый Pine	–6999
Осиновый Aspen	–6250

Нефильтрованное пиво обрабатывалось промышленным углем и углями, полученными из древесины березы, сосны и осины. Результаты исследования представлены в табл. 4.

Из табл. 4 видно, что степень извлечения высокомолекулярных полифенолов из нефильтрованного пива составляет 22–26 %, что способствует повышению коллоидной стойкости пива.

Таблица 4

Table 4

Влияние обработки пива активными углями на степень извлечения полифенолов
The effect of beer treatment with activated carbons on the degree of polyphenol extraction

Уголь Carbon	Продолжительность сорбции, мин Sorption duration, min	Дозировка АУ, % к массе пива AC dosage, % by weight of beer	Степень извлечения АУ танинов из пива, мг/дм ³ Degree of extraction of tannins from beer, mg/dm ³
Промышленный уголь марки CARBOCLEAN-SUN-V (УралХимСорб) CARBOCLEAN-SUN-V industrial carbon (Uralkhimsorb)	5	0,1	21,9
Березовый АУ Birch AC	5	0,1	25,9
Осиновый АУ Aspen AC	5	0,1	26,4
Сосновый АУ Pine AC	5	0,1	24,7

Выводы

1. Сорбционная активность экспериментальных АУ обусловлена морфологическим строением древесины лиственных и хвойных пород. Распределение анатомических элементов и структурная организация лигноуглеводной матрицы оказывают влияние на формирование пористости и удельной поверхности АУ. Оптимизация технологических режимов пиролиза и активации позволяет целенаправленно изменять физико-химические характеристики АУ, повышая эффективность их сорб-

ционных свойств применительно к конкретным целям использования.

2. Наилучшими сорбционными свойствами и максимальной предельной адсорбцией по извлечению танина характеризуются осиновой и березовый АУ.

3. Отрицательные значения энергии Гиббса свидетельствуют о самопроизвольном протекании процесса адсорбции танина на всех исследуемых АУ. На основании исследования термодинамических свойств углей можно сделать вывод

о том, что на процессы адсорбции танинов активными углями в большей мере влияют диффузионные процессы.

4. Максимальная степень извлечения полифенолов из пива наблюдается при использовании АУ из осины, что объясняется его высокой пористостью и большой площадью поверхности по-

сле применения оптимальных режимов пиролиза и активации, следовательно, сравнительно наибольшей сорбционной активностью.

5. Таким образом, на эффективность процесса сорбции оказывают влияние не только параметры получения АУ, но и используемая порода древесины.

Список источников

- Гаврилова Н. Н., Назаров В. В. Анализ пористой структуры на основе адсорбционных данных : учеб. пособие. М. : РХТУ им. Д. И. Менделеева, 2015. 132 с.
- ГОСТ 6217–74. Уголь древесный активный дробленый. Технические условия : Межгосударственный стандарт. М. : Изд-во стандартов, 1974. 8 с.
- Исследование возможности применения древесного угля для стабилизации пива / Ю. Л. Юрьев, Т. М. Панова, Н. А. Дроздова, К. Ю. Тропина // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. 2010. № 5. С. 120–124.
- Кинле Х., Бадер Э. Активные угли и их промышленное применение. Л. : Химия, 1984. 216 с.
- Кунце В. Технология солода и пива : пер. с нем. СПб. : Профессия, 2001. 912 с.
- Михеева Е. В., Пикула Н. П., Асташкина А. П. Коллоидная химия. Томск : Томск. политехн. ун-т, 2013. 184 с.
- ОСТ 4453–74. Уголь активный осветляющий древесный порошкообразный. Технические условия : Межгосударственный стандарт. М. : Изд-во стандартов, 1976. 23 с.
- Панова Т. М. Получение и применение модифицированных древесных углей в технологии пивоварения : дис. ... канд. техн. наук / Панова Татьяна Михайловна. Екатеринбург, 2020. 153 с.
- Панова Т. М., Евдокимова Е. В., Мальцев Г. И. Применение продуктов пиролиза древесины в биотехнологии // Деревообрабатывающая промышленность. 2022. № 4. С. 84–88.

References

- Gavrilova N. N., Nazarov V. V. Analysis of porous structure based on adsorption data : textbook manual. Moscow : D. I. Mendeleev Russian Technical University, 2015. 132 p.
- GOST 6217–74. Active crushed charcoal. Technical specifications : Interstate standard. Moscow : Publishing House of Standards, 1974. 8 p.
- Investigation of the possibility of using charcoal to stabilize beer / Yu. I. Yuryev, T. M. Panova, N. A. Drozdova, K. Yu. Tropina // News of higher educational institutions. Forest magazine. 2010. № 5. P. 120–124. (In Russ.)
- Kienle X., Bader E. Activated carbons and their industrial applications. Leningrad : Chemistry, 1984. 216 p.
- Kunze V. Technology of malt and beer : translated from German. St. Petersburg : Profession, 2001. 912 p.
- Mikheeva E. V., Pikula N. P., Astashkina A. P. Colloidal chemistry. Tomsk : Tomsk Polytechnic University, 2013. 184 p.
- OST 4453–74. Active lightening charcoal, powdered wood. Technical specifications : Interstate standard. Moscow : Publishing House of Standards, 1976. 23 p.
- Panova T. M., Evdokimova E. V., Maltsev G. I. Application of wood pyrolysis products in biotechnology // The woodworking industry. 2022. № 4. P. 84–88. (In Russ.)
- Panova T. M. Production and application of modified charcoal in brewing technology : dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Panova Tatiana Mikhailovna. Yekaterinburg, 2020. 153 p.

Информация об авторах

Татьяна Михайловна Панова – кандидат технических наук,
panovatm@m.usfeu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-82290-3606>

Оксана Дмитриевна Авдюкова – аспирант,
avdyukovaod@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-0742-3455>

Ильдар Касимович Гиндулин – кандидат технических наук,
gindulinik@m.usfeu.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3249-3228>

Арина Валерьевна Суховеева – студент,
av.suhoveeva@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0005-1895-1650>

Дарья Александровна Зверева – студент.
dshz456@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-5033-2044>

Information about the authors

Tatyana M. Panova – Candidate of Technical Sciences,
panovatm@m.usfeu.ru, <http://orcid.org/0000-0001-82290-3606>

Oksana D. Avdyukova – Graduate student,
avdyukovaod@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0003-0742-3455>

Ildar K. Gindulin – Candidate of Technical Sciences,
gindulinik@m.usfeu.ru, <http://orcid.org/0000-0003-3249-3228>

Arina V. Sukhoveeva – student,
av.suhoveeva@gmail.com, <http://orcid.org/0009-0005-1895-1650>

Darya A. Zvereva – student.
dshz456@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0000-5033-2044>

Статья поступила в редакцию 30.07.2025; принята к публикации 15.09.2025.

The article was submitted 30.07.2025; accepted for publication 15.09.2025.
