

Научная статья

УДК 661.183.2

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-169-179

Активные угли из водорослевого остатка альгинатного производства, содержащего измельченную древесину

*Д.С. Плахина¹, вед. технолог; ResearcherID: [KIG-7569-2024](#),**ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0737-2907>**Н.И. Богданович², д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [A-4662-2013](#),**ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5374-2943>*¹Архангельский водорослевый комбинат, просп. Ленинградский, д. 328, г. Архангельск, Россия, 163030; plahina.d.s@ab1918.ru²Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002

Поступила в редакцию 07.12.24 / Одобрена после рецензирования 10.03.25 / Принята к печати 15.03.25

Аннотация. Активные угли, получаемые из различных углеродсодержащих материалов, являются высокопористыми углеродными адсорбентами с развитой внутренней поверхностью. Особое внимание следует уделить многотоннажным отходам лесохимической промышленности и сельского хозяйства, переработки древесины. К таким отходам относятся древесный уголь, лигнин, опилки и щепа, куски коры, солома и шелуха от переработки готовой продукции, скорлупа орехов, косточки фруктов, листья плодовых деревьев. Пористое вещество, получаемое из древесного сырья, обладает высокой адсорбционной способностью, а также большой площадью удельной поверхности. В ходе глубокой переработки бурых водорослей на Архангельском водорослевом комбинате образуется большое количество органических отходов. Целью работы стало получение активных углей из альгинатного отхода, состоящего на 70 % из древесной муки. Для этого был использован метод термохимической активации с гидроксидом натрия в качестве активирующего агента. Исходное сырье имело влажность 76 % и разнообразный состав по минеральным и органическим веществам. Исследование проводили как планированный эксперимент. В качестве плана выбран центральный композиционный ротатбельный план 2-го порядка для 3 факторов. Независимыми переменными выступали дозировка гидроксида натрия, температура пиролиза и его продолжительность. По итогам исследования определены оптимальные значения этих факторов для получения активных углей из водорослевого отхода, а также оптимальные параметры, влияющие на сорбционную способность и пористую структуру активных углей. Работа имеет практическое значение, т. к. активированный уголь в порошкообразной и гранулированной формах широко используется в различных областях промышленности, включая фармацевтическую, пищевую, ликеро-водочную, очистку газовых сред, водоподготовку, очистку сточных вод, биомедицину, а также может применяться в сельском хозяйстве в качестве агросорбентов и компонентов для улучшения почвы. По результатам исследования можно заключить, что использование в качестве сырьевого материала органического отхода для синтеза активного угля методом термохимической активации с гидроксидом натрия представляет большой интерес.

Ключевые слова: альгинатное производство, вторичный ресурс альгинатного производства, древесная мука, активные угли, пиролиз, осветляющая способность, сорбция по гексану и водяному пару, планированный эксперимент

© Плахина Д.С., Богданович Н.И., 2025

Статья опубликована в открытом доступе и распространяется на условиях лицензии CC BY 4.0

Для цитирования: Плахина Д.С., Богданович Н.И. Активные угли из водорослевого остатка альгинатного производства, содержащего измельченную древесину // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 169–179. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-169-179>

Original article

Active Carbons from Algae Residue of Alginate Production Containing Groundwood

Darya S. Plakhina¹, *Leading Technologist; ResearcherID: [KIG-7569-2024](https://orcid.org/0009-0003-0737-2907),*

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0737-2907>

Nikolay I. Bogdanovich², *Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [A-4662-2013](https://orcid.org/0000-0002-5374-2943),*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5374-2943>

¹Arkhangelsk Seaweed Factory, prosp. Leningradskiy, 328, Arkhangelsk, 163030, Russian Federation; plakhina.d.s@ab1918.ru

²Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

Received on December 7, 2024 / Approved after reviewing on March 10, 2025 / Accepted on March 15, 2025

Abstract. Active carbons obtained from various carbon-containing materials are highly porous carbon adsorbents with a developed internal surface. Particular attention should be paid to large-tonnage waste from the wood-chemical industry and agriculture, as well as wood processing. Such waste includes charcoal, lignin, sawdust and chips, pieces of bark, straw and husks from the processing of finished products, nut shells, fruit pits, and leaves of fruit trees. The porous substance obtained from wood raw materials has a high adsorption capacity, as well as a large specific surface area. In the course of the deep processing of brown algae at the Arkhangelsk Seaweed Factory, a large amount of organic waste is generated. The aim of the work has been to obtain active carbons from alginate waste consisting of 70 % wood flour. For this purpose, the method of thermochemical activation with sodium hydroxide as an activating agent has been used. The initial raw material has had a moisture content of 76 % and a diverse composition of mineral and organic substances. The research has been carried out as a planned experiment. The design chosen has been a 2nd-order central composite rotatable one for 3 factors. The independent variables have been the sodium hydroxide dosage, pyrolysis temperature and its duration. Based on the results of the study, the optimal values of these factors for obtaining active carbons from algal waste have been determined, as well as the optimal parameters affecting the sorption capacity and porous structure of active carbons. The work is of practical importance, since active carbon in powder and granular forms is actively used in various industries, including pharmaceutical, food, distillery, gas purification, wastewater treatment, biomedicine, and can also be used in agriculture as agricultural sorbents and soil improvement components. Based on the results of the research, it can be concluded that the use of organic waste as a raw material for the synthesis of active carbon by thermochemical activation with sodium hydroxide is of great interest.

Keywords: alginate production, alginate production secondary resource, wood flour, active carbons, pyrolysis, clarification capacity, hexane and water vapor sorption, planned experiment

For citation: Plakhina D.S., Bogdanovich N.I. Active Carbons from Algae Residue of Alginate Production Containing Groundwood. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 169–179. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-169-179>

Введение

Активные угли – это высокопористые твердые вещества, полученные на основе углеродсодержащего сырья, обладающие развитой внутренней поверхностью (от сотен до двух тысяч квадратных метров на грамм) [1] и имеющие высокие поглотительные характеристики по примесям, находящимся в очищаемых средах (воздух, газы, вода, жидкости, почва). В их пористой структуре происходит поглощение различных органических микропримесей благодаря силам адсорбции (силам поверхностного взаимодействия) [7, 10].

При производстве различных марок активного угля одним из главных определяющих факторов является исходное сырье и его свойства, поэтому рационально управлять процессом активирования углей можно только в случае глубокого знания свойств исходного сырья [1, 12, 13].

Углеродные сорбенты получают из органических веществ биологического, растительного происхождения. В качестве сырья используют древесину различных пород, торф и торфяной полукокс с небольшим содержанием золы, ископаемые угли разной стадии метаморфизма (бурые, каменные угли, антрациты), полукокс и коксы на их основе и другие материалы, содержащие углерод [1, 3, 6, 11, 14].

Особое внимание следует уделить растительному сырью, т. к. получаемый из него уголь сохраняет исходную мелкопористую структуру и служит прекрасным источником для изготовления углеродных адсорбентов [7, 13]. Любая растительная биомасса, в основе химического строения которой лежат биополимеры – целлюлоза и лигнин, может быть подвергнута термической обработке, в результате которой образуются твердый углеродный остаток (уголь), жидкие вещества (пирогенные смолы) и газообразные продукты пиролиза [15]. Органический отход, полученный при комплексной переработке водорослей, также может быть использован как исходное сырье. Он представляет собой мелкоизмельченную массу в виде смеси древесной муки и остатков выработанных морских водорослей.

Активированный уголь в порошкообразной и гранулированной формах является хорошо известным универсальным адсорбентом, имеющим широкий спектр применения, включая очистку, рекультивацию загрязненной водной среды, очистку жидких и газообразных отходов, образующихся в промышленности, хранение и транспортировку газа, извлечение металлов из растворов, катализ растений и химических реакций, биомедицинские сферы [7, 8, 12, 13, 16–23].

Целью работы являлось получение активных углей методом термохимической активации с использованием гидроксида натрия в качестве активирующего агента [2, 4].

Задачи: в лабораторных условиях получить образцы активных углей из органических отходов от производства альгината натрия; оценить адсорбционные свойства этих углей.

Объекты и методы исследования

Сырьем для изготовления углеродных адсорбентов в данной работе являлся органический отход от производства альгината натрия путем комплекс-

ной переработки беломорских водорослей на ООО «Архангельский водорослевый комбинат». Отход образуется в результате фильтрации и отделения от жидкой фазы остатков щелочной экстракции бурых водорослей. Фильтрацию осуществляли через насыпной слой древесной муки, позволяющей более глубоко отделить механические примеси.

В лабораторных условиях определили исходную влажность сырья высушиванием в сушильном шкафу при температуре 105 °С до воздушно-сухого состояния. Влажность органического отхода составила 76 %, рН – 8,7. Отход имел разнообразный состав (% в пересчете на сухое вещество) как по минеральным, так и по органическим веществам [9]: органическое вещество – 92,13; в т. ч. клетчатка – 44,93; зола – 5,5; общий азот – 0,67; общий фосфор – 0,21; общий калий – 0,43; кальций – 1,06.

Исследование проводили с помощью планированного эксперимента. Так как выходные параметры в условиях опытов должны изменяться по простым функциональным зависимостям не выше 2-го порядка, в качестве плана был выбран центральный композиционный ротатабельный план 2-го порядка для 3 факторов (табл. 1) [5].

Таблица 1

Значения и интервалы варьирования факторов эксперимента [1]
The values and variability intervals of experimental factors [1]

Фактор	Интервал варьирования	Уровни варьирования факторов, x_i				
		-1,682 (- α)	-1	0	1	1,682 (+ α)
Температура процесса, °С (x_1)	30	650	670	700	730	750
Продолжительность пиролиза (τ), мин (x_2)	25	23	40	65	90	107
Дозировка NaOH, г/г (x_3)	20	116	130	150	170	184

Подготовленные образцы подвергали пиролизу в режиме термохимической активации на установке в лаборатории кафедры целлюлозно-бумажных и лесохимических производств. В качестве активирующего агента применяли гидроксид натрия. Заранее зная влажность исходного сырья и концентрацию раствора щелочи (гидроксида натрия), их смешивали в определенных отношениях. Полученную вязкую массу заливали в металлическую реторту и помещали в разогретую до определенной температуры печь для пиролиза. Сушка реакционной смеси происходила в реторте перед началом термохимического разложения. Продолжительность пиролиза составляла от 23–107 мин. [1].

Выгрузку угольного остатка осуществляли в водной фазе. Достигалось это путем заливания остывшей реторты примерно 400 мл дистиллированной воды и количественного переноса угля в стаканы для его дальнейшей обработки (выщелачивание, сушка, измельчение) и анализа [1].

Выходными характеристиками были выбраны: выход активных углей на а.с.с., осветляющая способность по метиленовому голубому ($A_{м.г}$), сорбция по гексану ($A_г$) и водяному пару ($A_в$) (табл. 2).

Выход активного угля рассчитывали на сухую массу исходного сырья по следующей формуле:

$$B = \frac{M_{AY}}{M_C \cdot \left(1 - \frac{W_C}{100}\right)} \cdot 100,$$

где M_{AY} – выход активного угля, г; M_C, W_C – масса, г, и влажность, %, исходного сырья соответственно.

Таблица 2

Матрица планирования и результаты эксперимента
The planning matrix and the results of the experiment

Код	x_1	x_2	x_3	Выход АУ, на а.с.с., %	Сорбционная активность, мг/г		
					$A_{м.г}$	$A_{г}$	$A_{в}$
АУ-1	670	40	130	15,16	974	949	995
АУ-2	730	40	130	12,29	1088	1078	1228
АУ-3	670	90	130	12,94	1051	1084	1199
АУ-4	730	90	130	12,66	1064	1249	1187
АУ-5	670	40	170	11,43	1028	1026	1087
АУ-6	730	40	170	11,10	1055	1121	1257
АУ-7	670	90	170	10,92	1048	1143	1268
АУ-8	730	90	170	8,14	1168	1505	893
АУ-9	650	65	150	13,95	1027	984	1092
АУ-10	750	65	150	9,59	1132	1411	906
АУ-11	700	23	150	15,79	967	849	895
АУ-12	700	107	150	10,95	1075	1110	1254
АУ-13	700	65	116	13,13	1085	1043	1187
АУ-14	700	65	184	8,84	1120	1238	1205
АУ-15	700	65	150	11,12	1116	1190	1205
АУ-16	700	65	150	11,07	1127	1185	1229
АУ-17	700	65	150	11,10	1106	1096	1167
АУ-18	700	65	150	11,38	1116	1041	1250
АУ-19	700	65	150	11,51	1120	1116	1239
АУ-20	700	65	150	11,49	1104	1173	1230

Примечание: АУ – активный уголь.

Осветляющая способность по метиленовому голубому характеризует способность активных углей сорбировать из водных растворов крупные молекулы органических веществ. Принято считать, что подобные молекулы сорбируются на поверхности пор (мезопор), а значит, по результатам анализа мы получаем информацию об их содержании в исследуемых углях [2, 4].

Для установления осветляющей способности по метиленовому голубому использовали стандартную методику (ГОСТ 4453–74. Уголь активированный осветляющий древесный порошкообразный). Ввиду высоких осветляющих свойств полученных углей объем добавляемого раствора метиленового голубого составил 50 мл. Методика основана на фотоколориметрическом определении светопропускания раствора метиленового голубого до и после обработки углем [1]. Оптическую плотность приготовленных растворов замеряли на сканирующем спектрофотометре UNICO (UNICO, США).

Навеску активного угля массой $0,05 \pm 0,0003$ г помещали в коническую колбу вместимостью 100 мл, прибавляли 50 мл раствора метиленового голубого, колбу закрывали пробкой и взбалтывали на аппарате 30 мин. После окончания взбалтывания уголь отфильтровывали через бумажный фильтр и определяли в отфильтрованном растворе концентрацию метиленового голубого.

Осветляющую способность угля по метиленовому голубому находили по формуле:

$$A = \frac{(c_1 - c_2 k) \cdot 0,050}{m},$$

где c_1 – концентрация исходного раствора красителя, мг/л; c_2 – 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 метиленового голубого, взятого для анализа, л [1].

Сорбцию паров гексана и водяных паров определяли эксикаторным методом. Во взвешенный и высушенный бюкс помещали навеску угля около 0,4 г, взвешенную с точностью 0,0003 г. Бюкс с открытой крышкой ставили в эксикатор, заполненный на $1/4$ объема гексаном или водой. Взвешивание бюксов проводили через 24 ч от начала эксперимента, т. к. именно через 24 ч наступает состояние равновесия. Равновесную величину сорбции паров гексана (водяных паров) рассчитывали как отношение привеса к его исходной навеске:

$$\Gamma = \frac{m_1 - m_2}{m_3} \cdot 1000,$$

где m_1 , m_2 – масса бюкса с навеской угля после и до взаимодействия с адсорбатом соответственно, г; m_3 – масса навески, г [1].

Результаты исследования и их обсуждение

Выходные параметры, представленные в табл. 2, были использованы для расчета коэффициентов уравнений регрессии. Уравнения со значимыми коэффициентами проверяли на адекватность экспериментальными данными по критерию Фишера при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и использовали для построения поверхностей отклика, которые наглядно иллюстрируют изменение параметров в зависимости от условий получения активного угля [5]. При заданном уровне значимости все полученные уравнения оказались адекватными экспериментальным данным.

Влияние условий активации на выход активного угля [1].

$$y_1 = 11,27 - 0,99x_1 - 0,99x_2 - 1,37x_3 + 0,69x_2^2.$$

Из уравнения видно, что на выход активного угля влияют все 3 фактора (температура, продолжительность активации и дозировка гидроксида натрия). Поверхности отклика (рис. 1) показывают, что наиболее низкий выход наблюдается у образцов с максимальными температурой термохимической активации, продолжительностью процесса и дозировкой активирующего агента. Это указывает на необходимость поддержания этих параметров на нижнем уровне при промышленной реализации процесса, что будет экономически выгодным с точки зрения энергозатрат.

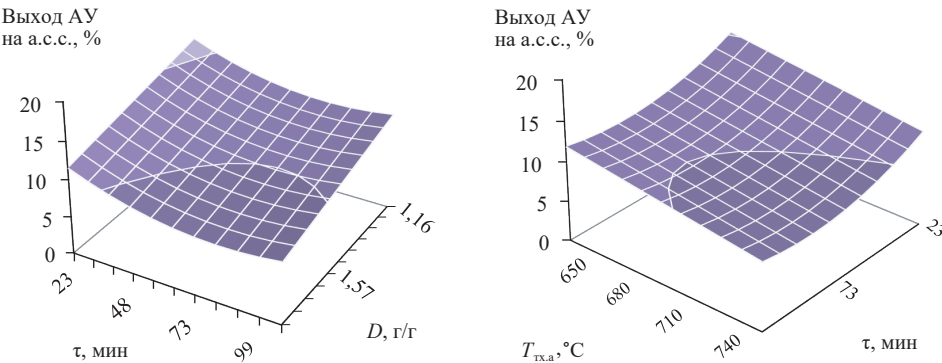


Рис. 1. Влияние режимных параметров на выход активных углей ($T_{тх.а}$ – термохимическая активация; D – дозировка NaOH)

Fig. 1. The influence of operating parameters on the yield of active carbons ($T_{тх.а}$ – thermochemical activation; D – NaOH dosage)

Влияние условий активации на адсорбционные свойства по метиленовому голубому [1].

$$y_2 = 1113,43 + 33,09x_1 + 26,68x_2 + 13,16x_3 + 9,85x_2x_3 - 13,17x_1^2 - 33,87x_2^2.$$

На рис. 2 можно увидеть, что адсорбционная активность по метиленовому голубому показывает линейную зависимость от температуры термохимической активации и дозировки щелочи. При повышении этих значений количество адсорбированных веществ будет линейно расти, значит, температура и дозировка оказывают положительное влияние. Также на сорбционные свойства по метиленовому голубому воздействует продолжительность активации. При максимальной и минимальной продолжительности процесса адсорбционные свойства по метиленовому голубому будут наименьшими. Максимальные значения наблюдаются при продолжительности активации 70 мин.

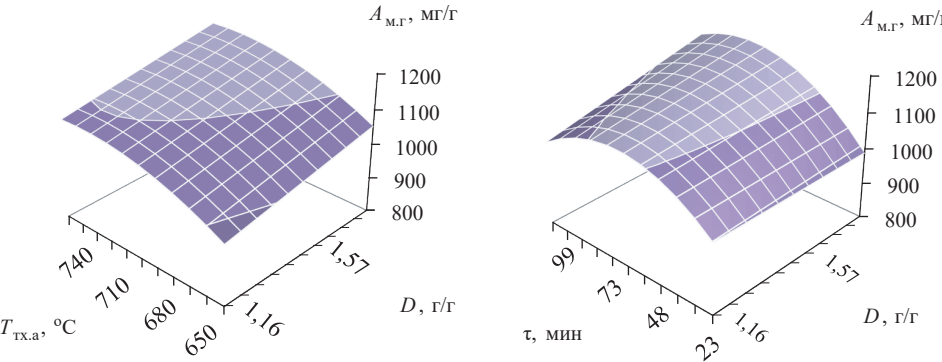


Рис. 2. Влияние режимных параметров на адсорбционные свойства по МГ

Fig. 2. The influence of operating parameters on methylene blue adsorption properties

Влияние условий активации на адсорбционные свойства по гексану [1].

$$y_3 = 1130,60 + 107,55x_1 + 91,20x_2 + 55,98x_3 + 37,87x_1x_2 + 24,28x_2x_3 + 31,50x_1^2 - 45,53x_2^2.$$

Как видно из уравнения регрессии и графических зависимостей (рис. 3), адсорбционная активность по гексану положительно связана со всеми режимны-

ми параметрами процесса. Значение адсорбции по парам гексана находится в линейной зависимости от температуры и дозировки гидроксида натрия. Аналогичное наблюдаем при максимальных температуре и продолжительности процесса. Следовательно, при наибольших значениях переменных факторов эксперимента адсорбционная активность по парам гексана будет максимальной.

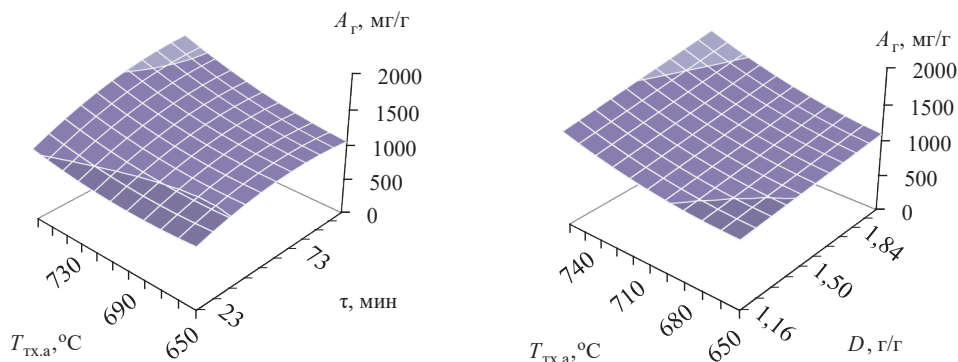


Рис. 3. Влияние режимных параметров на адсорбцию по гексану

Fig. 3. The influence of operating parameters on hexane adsorption

Влияние условий активации на сорбцию по водяному пару [1].

$$y_4 = 1216,82 + 42,73x_2 - 98,93x_1x_2 - 53,26x_1x_3 - 43,19x_2x_3 - 65,67x_1^2 + 39,06x_2^2.$$

Анализ поверхностей отклика (рис. 4) и уравнения регрессии показывает, что температура термохимической активации и продолжительность процесса в данном интервале варьирования характеризуются двойным взаимодействием. При повышении температуры максимальная сорбция по водяному пару будет наблюдаться при минимальной продолжительности процесса и, наоборот, при увеличении длительности процесса наибольшая сорбция по водяному пару соответствует минимальной температуре термохимической активации. На графике справа также видно двойное взаимодействие параметров. При невысокой дозировке активирующего агента повышение температуры термохимической активации положительно влияет на сорбцию по водяному пару, а при росте дозировки – отрицательно.

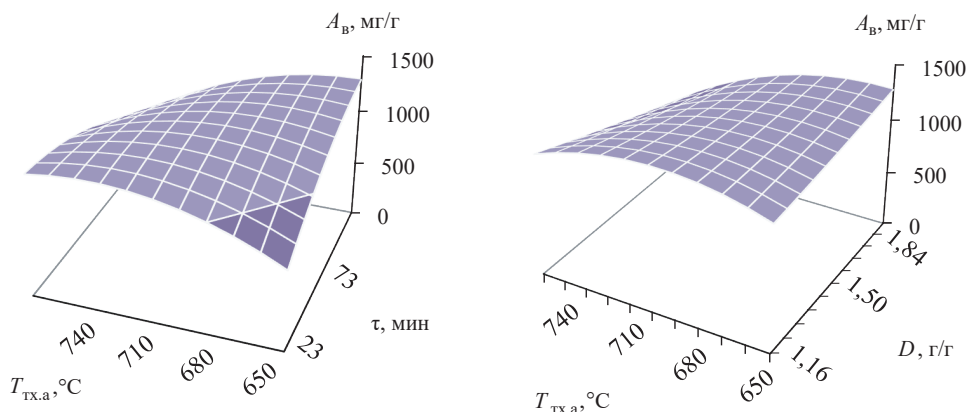


Рис. 4. Влияние режимных параметров на сорбцию по водяному пару

Fig. 4. The influence of operating parameters on water vapor sorption

Заключение

Выявлено, что продолжительность и температура активации положительно влияют на сорбционные характеристики полученных адсорбентов. Значительное увеличение температуры термохимической активации ведет к росту сорбционных свойств активных углей, поэтому важно поддерживать этот показатель на уровне 750 °С. Однако выявлена неоднозначная взаимосвязь влияния температуры термохимической активации и продолжительности процесса на формирование сорбционных свойств по водяному пару. Так, при низкой температуре с повышением продолжительности процесса сорбция резко возрастает до 1268 мг/г и, наоборот, при высокой температуре с уменьшением продолжительности активации сорбционная способность резко снижается. Полученные синтезированные адсорбенты обладают высокими адсорбционными свойствами, что позволяет рекомендовать их для использования в различных областях. Следует отметить, что осветляющая способность по метиленовому голубому в 4–5 раз превышает стандартные требования, предъявляемые к выпускаемым адсорбентам подобного класса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Анциферова (Плахина) Д.С. Термокаталитический пиролиз отходов переработки сельскохозяйственных культур: выпускная квалификац. работа. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2018. 111 с. Режим доступа: https://library.narfu.ru/components/com_irbis/pdf_view/?316956 (дата обращения: 15.06.24).

Antsiferova (Plakhina) D.S. *Thermocatalytic Pyrolysis of Crop Processing Waste: Final Qualifying Work*. Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2018. 111 p. (In Russ.).

2. Анциферова (Плахина) Д.С., Смирнова А.И. Пиролиз отходов сельскохозяйственных культур // Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых–2017: сб. ст. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2017. С. 115–118.

Antsiferova (Plakhina) D.S., Smirnova A.I. *Pyrolysis of Wastes of Agricultural Crops. Lomonosovskie nauchnye chteniya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh – 2017*: Collection of Articles. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2017, pp. 115–118. (In Russ.).

3. Баширов И.И. Получение формованного углеродного адсорбента из нефтяного сырья методами паровой и щелочной активации: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2016. 121 с.

Bashirov I.I. *Production of Molded Carbon Adsorbent from Oil Feedstock by Steam and Alkaline Activation Methods*: Cand. Tech. Sci. Diss. Ufa, 2016. 121 p. (In Russ.).

4. Белецкая М.Г., Богданович Н.И., Макаревич Н.А. Технология углеродных адсорбентов. Физико-химический анализ активных углей. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2015. 96 с.

Beletskaya M.G., Bogdanovich N.I., Makarevich N.A. *Carbon Adsorbent Technology. Physico-Chemical Analysis of Active Carbons*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2015. 96 p. (In Russ.).

5. Богданович Н.И., Кузнецова Л.Н., Третьяков С.И., Жабин В.И. Планирование эксперимента в примерах и расчетах. Архангельск: Сев. (Арктич.) федер. ун-т им. М.В. Ломоносова, 2010. 127 с.

Bogdanovich N.I., Kuznetsova L.N., Tretyakov S.I., Zhabin V.I. *Experiment Planning in Examples and Calculations*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, 2010. 127 p. (In Russ.).

6. Евдокимова Е.В. Получение активного угля на основе осиновой древесины: дис. ... канд. техн. наук. Екатеринбург, 2020. 111 с.
Evdokimova E.V. *Production of Active Carbon Based on Aspen Wood*: Cand. Tech. Sci. Diss. Yekaterinburg, 2020. 111 p. (In Russ.).
7. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. М.: Химия, 1984. 592 с.
Keltsev N.V. *Fundamentals of Adsorption Technology*. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 592 p. (In Russ.).
8. Когановский А.М., Клименко Н.А., Левченко Т.М., Марутовский Р.М., Рода И.Г. Очистка и использование сточных вод в промышленном водоснабжении. М.: Химия, 1983. 288 с.
Koganovskij A.M., Klimenko N.A., Levchenko T.M., Marutovskij R.M., Roda I.G. *Wastewater Treatment and Use in Industrial Water Supply*. Moscow, Khimiya Publ., 1983. 288 p. (In Russ.).
9. Кормовые добавки из морских водорослей и продуктов их переработки / под ред. А.В. Подкоровой. М.: ВНИРО, 2017. 70 с.
Feed Additives from Seaweeds and Their Processed Products. Ed by A.V. Podkorytova. Moscow, Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, 2017. 70 p. (In Russ.).
10. Макаревич Н.А. Межфазная граница «газ–жидкость–твердое тело». Архангельск: САФУ, 2018. 411 с.
Makarevich N.A. *Gas-Liquid-Solid Interface Boundary*. Arkhangelsk, Northern (Arctic) Federal University Publ., 2018. 411 p. (In Russ.).
11. Манина Т.С. Получение и исследование высокопористых углеродных сорбентов на основе естественно окисленных углей Кузбасса: дис. ... канд. хим. наук. Кемерово, 2013. 132 с.
Manina T.S. *Production and Research of Highly Porous Carbon Sorbents Based on Naturally Oxidized Coals of Kuzbass*: Cand. Chem. Sci. Diss. Kemerovo, 2013. 132 p. (In Russ.).
12. Мухин В.М., Курилкин А.А., Клущин В.Н. Применение активного угля, модифицированного гидроксидом калия, в очистке сточной воды на действующем предприятии // Сорбцион. и хроматографич. процессы. 2013. Т. 13, вып. 2. С. 188–191.
Mukhin V.M., Kurilkin A.A., Klushin V.N. The Application of Active Carbon Modified by Potassium Hydroxide in the Purification of Waste Water of Functional Entertainment. *Sorbtsionnye i Khromatograficheskie Protsessy*, 2013, vol. 13, iss. 2, pp. 188–191. (In Russ.).
13. Мухин В.М., Тарасов А.В., Клущин В.Н. Активные угли России / под ред. А.В. Тарасова. М.: Metallurgiya, 2000. 352 с.
Mukhin V.M., Tarasov A.V., Klushin V.N. *Active Carbons of Russia*. Ed. by A.V. Tarasov. Moscow, Metallurgiya Publ., 2000. 352 p. (In Russ.).
14. Романенко (Хвиюзова) К.А., Богданович Н.И., Канарский А.В. Получение активных углей пиролизом гидролизного лигнина // Изв. вузов. Лесн. журн. 2017. № 4. С. 162–171.
Romanenko (Khviuzova) K.A., Bogdanovich N.I., Kanarskiy A.V. Obtaining of Activated Carbons by Pyrolysis of Hydrolytic Lignin. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2017, no. 4, pp. 162–171. (In Russ.).
15. Славянский А.К., Шарков В.И., Ливеровский А.А. Химическая технология древесины. Гослесбумиздат, 1962. С. 16–18.
Slavyanskij A.K., Sharkov V.I., Liverovskij A.A. *Chemical Technology of Wood*. Goslesbumizdat Publ., 1962, pp. 16–18. (In Russ.).
16. Энтеросорбция / под ред. Н.А. Белякова. Л.: Центр сорбционных технологий, 1991. 336 с.
Enterosorption. Ed. by N.A. Belyakov. Leningrad, Centre of Sorption Technologies Publ., 1991. 336 p. (In Russ.).
17. Bansal R.C., Goyal M. *Activated Carbon Adsorption*. USA, New York, CRC Press, 2005. 520 p. <https://doi.org/10.1201/9781420028812>

18. Celis de J., Amadeo N.E., Cukierman A.L. In situ Modification of Activated Carbons Developed from a Native Invasive Wood on Removal of Trace Toxic Metals from Wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 161, iss. 1, pp. 217–223.

<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.03.075>

19. Hayashi J., Kazehaya A., Muroyama K., Watkinson A.P. Preparation of Activated Carbon from Lignin by Chemical Activation. *Carbon*, 2000, vol. 38, iss. 13, pp. 1873–1878.

[https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(00\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(00)00027-0)

20. Nanda S., Dalai A.K., Berruti F., Kozinski J.A. Biochar as an Exceptional Biore-source for Energy, Agronomy, Carbon Sequestration, Activated Carbon and Specialty Materials. *Waste and Biomass Valorization*, 2016, vol. 7, pp. 201–235.

<https://doi.org/10.1007/s12649-015-9459-z>

21. Mustranta A. *Novel Applications of Lipases*. Espoo, University of Turku, VTT Technical Research Centre of Finland, 1995. 83 p.

22. Ramanujan R.V., Purushotham S., Chia M.H. Processing and Characterization of Activated Carbon Coated Magnetic Particles for Biomedical Applications. *Materials Science and Engineering: C*, 2007, vol. 27, iss. 4, pp. 659–664.

<https://doi.org/10.1016/j.msec.2006.06.007>

23. Rivera-Utrilla J., Sanchez-Polo M., Gómez-Serrano V., Álvarez P.M., Alvim-Ferraz M.C.M., Dias J.M. Activated Carbon Modifications to Enhance its Water Treatment Applications. An Overview. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, vol. 187, iss. 1–3, pp. 1–23. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.01.033>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest