

Леса России и хозяйство в них. 2024. № 1 (88). С. 171–180.

Forests of Russia and economy in them. 2024. № 1 (88). P. 171–180.

Научная статья

УДК 541.183+674.8

DOI: 10.51318/FRET.2023.88.1.018

УГЛЕРОДНЫЕ СОРБЕНТЫ НА ОСНОВЕ ДРЕВЕСНЫХ И РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Даниил Юрьевич Дворянкин¹, Мария Евгеньевна Сафонова²,
Ирина Андреевна Клепалова³, Инна Геннадьевна Первова⁴

^{1, 2, 3, 4} Уральский государственный лесотехнический университет, Екатеринбург, Россия

¹ daniil.dvoryankin.02@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0006-8710-1446>

² klepalovaia@m.usfeu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5906-5787>

³ msafonova76@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-8213-7777>

⁴ pervovaig@m.usfeu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1635-8643>

Аннотация. Актуальным направлением исследований продолжает оставаться разработка методов переработки древесных опилок и растительных отходов с получением сорбционных материалов, применяемых для замены традиционных дорогостоящих сорбентов в процессах очистки природных вод и особенно для доочистки производственных сточных вод от ионов токсичных металлов. Целью исследования являлось изучение сорбционных свойств по отношению к ионам меди в статических и динамических условиях углеродных сорбентов, полученных на основе модифицированных различными способами древесно-растительных отходов. Установлено, что термическая модификация приводит к увеличению общего числа кислородсодержащих групп в обожженных при $300 \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 35 мин образцах сосновых опилок и скорлупы кедрового ореха (фракции 0,55–0,75 мм) примерно в 2 раза с практически равным соотношением между карбоксильными и гидроксильными группами. При химической модификации 5н HNO_3 наблюдается значительное увеличение числа гидроксильных групп в обработанных кислотой углеродных сорбентах. Последовательно проведенная термическая и химическая модификация способствует не только увеличению общего числа кислородсодержащих групп, но и получению углеродных сорбентов с максимальной сорбционной емкостью порядка 12 мг/г. Выявлено, что и термическая и химическая обработка способствует получению сорбентов, механизм извлечения ионов Cu(II) на которых обусловлен мономолекулярной адсорбцией и описывается моделью Ленгмюра с коэффициентом аппроксимации, близким к 1. Повторное определение кислородсодержащих функциональных групп в составе исследуемых углеродных сорбентов после однократной адсорбции показало сохранение их количества и даже увеличение в 2 раза для некоторых образцов. Испытания в динамических условиях позволяют рекомендовать методы химической и термохимической модификации для получения сорбентов с высокой способностью регенерации, что обуславливает возможность их применения в адсорбционных установках очистки сточных вод.

Ключевые слова: сорбенты, древесные опилки, скорлупа кедрового ореха, модификация, адсорбция

Для цитирования: Углеродные сорбенты на основе древесных и растительных отходов / Д. Ю. Дворянкин, М. Е. Сафонова, И. А. Клепалова, И. Г. Первова // Леса России и хозяйство в них. 2024. № 1 (88). С. 171–180.

Original article

BIO-BASED CARBON ADSORBENTS

Daniil Yu. Dvoryankin¹, Maria E. Safonova², Irina A. Klepalova³, Inna G. Pervova⁴

^{1, 2, 3, 4} Ural State Forest Engineering University, Yekaterinburg, Russia

¹ daniil.dvoryankin.02@mail.ru, <http://orcid.org/0009-0006-8710-1446>

² klepalovaia@m.usfeu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-5906-5787>

³ msafonova76@gmail.com, <http://orcid.org/0000-0002-8213-7777>

⁴ pervovaig@m.usfeu.ru, <http://orcid.org/0000-0002-1635-8643>

Abstract. Nowadays, researchers continue to focus their efforts on developing techniques to prepare novel low-cost effective and renewable bio-based sorption materials as alternatives to traditional expensive and non-renewable adsorbents used for treatment of natural water and for removal of heavy metal ions from industrial wastewater. The aim of the research was to study the sorption properties in relation to copper ions under static and dynamic conditions of bio-based carbon adsorbents modified in various ways. It has been established that thermal modification leads to an increase in the total number of oxygen-containing groups in samples of pine sawdust (PS) and Siberian pine nut shells (SPNS) (fraction 0,55–0,75 mm) fired at $300 \pm 10^\circ\text{C}$ for 35 minutes by about 2 times, with almost equal ratio between carboxyl and hydroxyl groups. Chemical modification with 5N HNO_3 results to significant increase in the number of hydroxyl groups in acid-treated carbon adsorbents. Subsequently carried out thermal and chemical modifications contribute not only to an increase in the total number of oxygen-containing groups, but also to the production of carbon adsorbents with a maximum sorption capacity of about 12 mg/g. It was revealed that both thermal and chemical treatments contribute to the production of sorbents, the mechanism of extraction of Cu(II) ions on which is due to monomolecular adsorption and is described by the Langmuir model with an approximation coefficient close to 1. The repeated determination of oxygen-containing functional groups in the composition of the studied carbon sorbents after a single adsorption showed the keeping their amount the same and even an increase by a ratio of 2 to 1 for some samples. Tests under dynamic conditions make it possible to recommend chemical and thermochemical modifications for obtaining sorbents with a high regeneration capacity, which makes them suitable for use in adsorption plants for wastewater treatment.

Keywords: sorbents, sawdust, Siberian pine nut shell, modification, adsorption

For citation: Bio-based carbon adsorbents / D. Yu. Dvoryankin, M. E. Safonova, I. A. Klepalova, I. G. Pervova // Forests of Russia and economy in them. 2024. № 1 (88). P. 171–180.

Введение

В связи с усилением экологических приоритетов все большее внимание уделяется переработке в полезные материалы древесно-растительных отходов, которых ежегодно в России образуется более 40 млн м³ (Колесникова, 2013). По этой причине все больше работ ведут по получе-

нию сорбентов из лигноцеллюлозосодержащего сырья, руководствуясь принципами эффективности и экономичности при выборе методов и средств для очистки природных вод и обезвреживании сточных вод от ионов токсичных металлов. Существующие технологии по переработке опилок и растительных отходов не решают

проблему полного и рационального использования этого вида сырья, поэтому актуально применение их для замены традиционных дорогостоящих сорбентов, особенно на этапе доочистки. Однако технологические сложности для внедрения таких сорбентов заключаются в неоднородности состава лигноцеллюлозосодержащих отходов и количества активных центров и функциональных групп, обуславливающих эффективность и механизм удаления ионов металлов из водных сред. Решением является применение методов термического и химического воздействия на лигнин и целлюлозу (Рыженков, 2015; Современные представления..., 2001), входящих в состав древесно-растительных отходов, активно поддающихся модификации. Получаемые в результате такой модификации материалы благодаря изменению их функциональности и структуры, а также развитой поверхности частиц обеспечивают эффективное удаление загрязнителей за счет сочетания процесса хемосорбции с физической сорбцией (Сорбенты..., 2000).

Цель, объекты и методика исследования

Целью исследования является изучение сорбционных свойств модифицированных древесно-растительных отходов по отношению к ионам меди в статических и динамических условиях.

Объектами исследования выбраны измельченные древесные опилки (ДО) фракции 0,75–2,00 мм (нативный образец 1) и скорлупа кедрового ореха (СКО) фракции 0,55–0,75 мм (нативный образец 2). Исходные растительные отходы подвергались термической модификации, которая осуществлялась в муфельной печи при температуре $300 \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 35 мин. При данной температуре исходное сырье поддается термической деструкции, результатом которой является удаление термически нестабильных экстрактивных соединений, разложение целлюлозы путем дегидратации и увеличение степени содержания углерода до 78 % (Оффан и др., 1999; Астафьев, 2021). В результате применения термомодификации в данной работе получены образец 1.1 на основе обожженных ДО и образец 2.1 на основе термообработан-

ной СКО. Выход при такой модификации составил примерно 45–50 % от исходного сырья.

Химическая модификация лигноцеллюлозосодержащих материалов основана на воздействии растворителей и/или других соединений, которые изменяют структуру либо за счет сольволиза и нарушения водородных связей, либо в результате химических реакций, способствующих образованию на поверхности получаемого сорбента активных функциональных групп (Никитин и др., 1978). В данном исследовании была осуществлена обработка исходных образцов 1 и 2 раствором 5н HNO_3 по следующей методике: навеска исходного сырья 3 г заливалась 100 см^3 кислоты, в течение 5 ч при температуре 80°C производилось перемешивание на вибростенде, затем химически модифицированные древесно-растительные отходы отмывались дистиллированной водой от избытка кислоты и высушивались на воздухе с получением химически модифицированных углеродных сорбентов – образца 1.2 на основе ДО и образца 2.2 на основе СКО.

Для сравнения влияния на сорбционные свойства условий получения сорбентов из растительных отходов использовался комплексный метод модификации, который включал последовательно проведенную термическую при температуре $300 \pm 10^\circ\text{C}$ в течение 35 мин и химическую модификацию 5н HNO_3 . Таким способом были получены термохимически модифицированные образцы 1.3 (на основе ДО) и 2.3 (на основе СКО).

Для количественного определения функциональных кислородсодержащих групп в углеродных материалах применили упрощенный метод Бозма (Boehm, 2002; Новый подход..., 2013). Общее количество кислородсодержащих групп $E_{\text{общ}}$ определялось путем взаимодействия образца с раствором NaOH . Количество карбоксильных групп E_c определялось путем взаимодействия образца с NaHCO_3 . Расчет карбоксильных E_c , гидроксильных E_h групп в составе сорбента, мг·экв/г, проводили по формуле

$$E_i = \frac{(a - b)N \cdot 50}{mV_{np}}, \quad (1)$$

где a – количество 0,1н раствора HCl , пошедшее на титрование контрольной пробы, мл;

b – количество 0,1н раствора HCl, пошедшее на титрование анализируемой пробы (филтрат), мл;

N – нормальность растворов, взаимодействующих с образцами;

50 – объем 0,1н раствора, взятый для взаимодействия с образцами;

m – навеска образца, г.

Количество гидроксильных групп E_h определялось по разности $E_{общ} - E_c$.

Для всех исследуемых углеродных материалов изучались сорбционные свойства в статическом режиме в условиях установления равновесия при комнатной температуре и постоянном перемешивании в водных растворах сульфата меди с концентрацией ионов от 100 до 500 мг/дм³. Филтрат и промывные воды анализировали на остаточную концентрацию ионов меди методом комплексонометрического титрования трилоном Б (Лурье, 1971). После промывки сорбент для дальнейших исследований высушивали до воздушно-сухого состояния.

Количество сорбированных ионов металла, мг/г, – сорбционную емкость CE – рассчитывали по формуле

$$CE = \frac{(C_1 - C_2)V}{m \cdot 1000}, \quad (2)$$

где C_1 – исходное содержание ионов металла в исходном растворе, мг/дм³;

C_2 – остаточное содержание ионов металла в филтрате, мг/дм³;

V – объем исходного раствора соли металла, см³;

m – масса сорбента, г.

Величина полной динамической обменной емкости ($ПДОЕ$), мг/г, рассчитывалась по формуле

$$ПДОЕ = \frac{CV_{полный}}{m_{сорбента}}, \quad (3)$$

где C – концентрация ионов металла в пропускаемом растворе, мг/дм³;

$V_{полный}$ – количество раствора, пропущенного через слой сорбента до момента выравнивания концентраций, дм³;

$m_{сорбента}$ – масса сорбента, г.

Результаты и обсуждения

Отметим, что в результате различных методов модификации в составе модифицированных сорбентов происходит увеличение общего числа кислородсодержащих групп относительно исходного сырья (табл. 1). Термическая модификация приводит к увеличению общего числа кислородсодержащих групп в образцах 1.1 и 2.1 примерно в 2 раза с практически равным соотношением между карбоксильными и гидроксильными группами. При химической модификации 5н HNO₃ как для ДО, так и для СКО наблюдается значительное увеличение числа гидроксильных групп в обработанных кислотой образцах 1.2 и 2.2. Комплексный метод модификации приводит к увеличению общего числа кислородсодержащих групп, причем для ДО соотношение карбоксильных групп к гидроксильным равно 1:1,5, а для СКО соотношение равно 1:4.

Известно (Сорбционные свойства..., 2009; Никифорова и др., 2010), что в зависимости от природы лигноцеллюлозосодержащего сорбента кислородсодержащие функциональные группы могут обеспечивать извлечение ионов металлов за счет протекания различных механизмов, включая комплексообразование, ионный обмен или же смешанный механизм.

Для выяснения особенностей протекания процесса адсорбции ионов меди(II) модифицированными углеродными сорбентами на основе ДО и СКО первоначально была изучена их сорбционная емкость в статическом режиме при комнатной температуре и постоянном перемешивании в течение 5 ч из водных растворов сульфата меди с концентрацией ионов от 100 до 500 мг/дм³. Графики изотерм адсорбции ионов меди(II) на всех образцах древесных опилок и скорлупы кедрового ореха (рис. 1, 2) по классификации БДДТ (Грег, Синг, 1984) относятся к I типу, который характерен для микропористых тел. Согласно классификации Гильса (Парфит, Рочестер, 1986), изотермы соответствуют L-типу с выгнутой частью относительно оси равновесной концентрации, по мере увеличения концентрации ионов металла адсорбция достигает насыщения и переходит в плато.

Таблица 1
Table 1

Функциональный состав углеродных сорбентов Functional parameters of carbon adsorbents

ДО фракция 0,75–2,00 мм Pine sawdust (SP) fraction 0,75–2,00 mm				
Образец Sample	$E_{общ}$, мг·экв/г E_{total} , mg·eq/g	E_c , мг·экв/г E_c , mg·eq/g	E_h , мг·экв/г E_h , mg·eq/g	$CE_{max}(Cu)$, мг/г Maximum sorption capacity(Cu), mg/g
1	2,30	2,30	0	3,13
1.1	5,33	2,66	2,67	10,90
1.2	7,00	1,50	5,50	7,68
1.3	8,00	3,20	4,80	12,60
СКО фракция 0,55–0,75 мм Siberian pine nut shells (SPNS) fraction 0,55–0,75 mm				
2	8,00	2,00	6,00	3,20
2.1	17,60	8,60	9,00	11,25
2.2	18,10	7,10	11,00	8,16
2.3	16,06	3,33	12,73	11,98

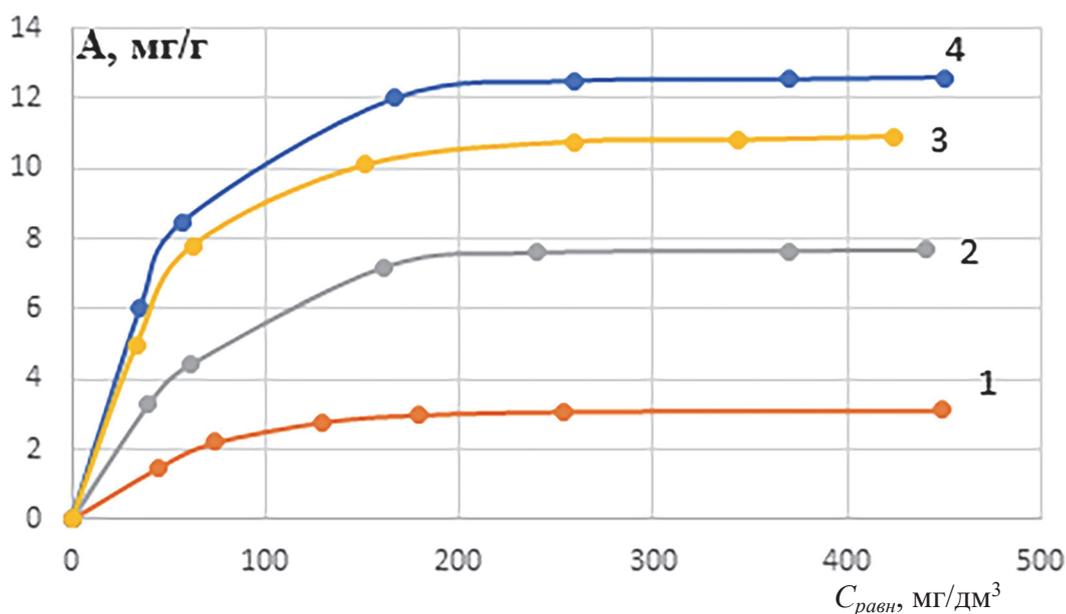


Рис. 1. Изотермы адсорбции ионов Cu(II) углеродными сорбентами на основе ДО:

- 1 – нативный образец 1; 2 – термомодифицированный образец 1.1;
- 3 – сорбент 1.2, химически модифицированный 5н HNO₃;
- 4 – сорбент 1.3, термохимически модифицированный 5н HNO₃

Fig. 1. Adsorption isotherm plots for the removal of Cu(II) ions by sawdust-based carbon adsorbents:
1 – initial sample 1; 2 – thermally modified sample 1.1; 3 – sorbent 1.2, chemically modified 5N HNO₃;
4 – sorbent 1.3, thermochemically modified 5N HNO₃

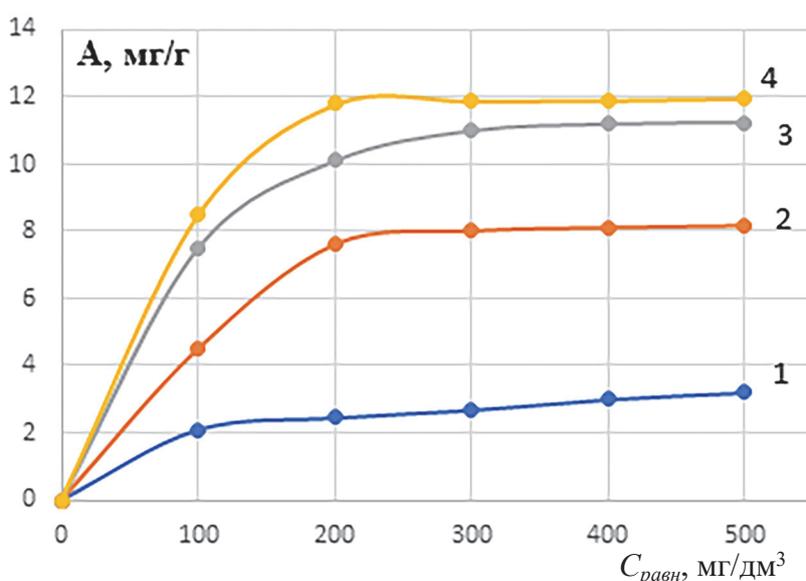


Рис. 2. Изотермы адсорбции ионов Cu(II) углеродными сорбентами на основе СКО:

1 – нативный образец 2; 2 – термомодифицированный образец 2.1;

3 – сорбент 2.2, химически модифицированный 5н HNO₃;

4 – сорбент 2.3, термохимически модифицированный 5н HNO₃

Fig. 2. Adsorption isotherm plots for the removal of Cu(II) ions by SPNS-based carbon adsorbents:

1 – initial sample 2; 2 – thermally modified sample 2.1; 3 – sorbent 2.2, chemically modified 5N HNO₃;

4 – sorbent 2.3, thermochemically modified 5N HNO₃

Полученные изотермы адсорбции ионов Cu(II) были обработаны в рамках моделей сорбции Ленгмюра, Фрейндлиха, Дубинина – Радужкевича, Темкина (Галимова и др., 2017). Полученные уравнения и их коэффициенты аппроксимации (R^2) указаны в табл. 2.

Выявлено, что адсорбция ионов меди(II) на нативных древесных опилках (образец 1) наиболее точно описывается моделью Дубинина – Радужкевича с коэффициентом аппроксимации 0,98, что означает адсорбцию как на поверхности, так и в порах материала. На модифицированных опилках (образцы 1.1, 1.2, 1.3) адсорбция протекает по модели Ленгмюра, согласно которой сорбция происходит на элементарных участках поверхности твердого тела, каждый из которых может адсорбировать только одну молекулу сорбата.

Для сорбентов на основе СКО стоит отметить, что адсорбция ионов меди(II) немодифицированным образцом 1 описывается моделью Фрейндлиха с коэффициентом аппроксимации 0,98, характеризуя полимолекулярную адсорбцию, в то время как термо- и химическая модификация способствуют росту адсорбционных центров (функ-

циональных групп), на которых протекает мономолекулярная адсорбция (образцы 2.1, 2.2, 2.3) по модели Ленгмюра.

После однократной адсорбции ионов меди(II) и отмывки от раствора соли металла повторно провели определение кислородсодержащих функциональных групп исследуемых углеродных сорбентов (табл. 3), которое показало значительные изменения как в их количестве, так и в составе.

С целью установить влияние состава функциональных групп на возможность применения полученных сорбентов в качестве загрузки в фильтры для доочистки сточных вод от ионов металлов нами проведены исследования эффективности извлечения некоторыми углеродными сорбентами в динамических условиях с расчетом полной динамической обменной емкости (ПДОЕ) и массы сорбированной и десорбированной меди. Испытание сорбционных свойств образцов (масса образцов 2 г) проводили при пропускании через слой адсорбента (высота слоя 8–9 см, скорость 3 мл/мин) 100 мл раствора сульфата меди(II) ($C_{Cu^{2+}} = 112$ мг/л), для десорбции использовали 5н H₂SO₄. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 2
Table 2

Уравнения регрессии и коэффициенты аппроксимации моделей адсорбции ионов Cu(II)
углеродными сорбентами на основе древесно-растительных отходов
Regression equations and approximation coefficients for models of adsorption of Cu(II)
ions by carbon adsorbents based on sawdust and Siberian pine nut shells

Образец Sample	Модель сорбции Adsorption model			
	Ленгмюра Langmuir	Фрейндлиха Freundlich	Дубинина – Радужкевича Dubinin – Radushkevich	Темкина Temkin
ДО фракция 0,75–2,00 мм Pine sawdust (SP) fraction 0,75–2,00 mm				
1	$y = 20,723x + 0,2341 R^2 = 0,9383$	$y = 0,1728x + 0,0775 R^2 = 0,9562$	$y = -22,436x + 1,2078 R^2 = 0,9868$	$y = 0,7293x - 0,9903 R^2 = 0,857$
1.1	$y = 8,8575x + 0,0995 R^2 = 0,9833$	$y = 0,3781x - 0,0595 R^2 = 0,8796$	$y = -6,96x + 2,1469 R^2 = 0,9672$	$y = 2,0017x - 3,8736 R^2 = 0,9136$
1.2	$y = 3,9888x + 0,078 R^2 = 0,9764$	$y = 0,2903x + 0,3121 R^2 = 0,8941$	$y = -2,485x + 2,458 R^2 = 0,9338$	$y = 2,2657x - 2,1979 R^2 = 0,935$
1.3	$y = 3,2816x + 0,0688 R^2 = 0,9761$	$y = 0,2542x + 0,4492 R^2 = 0,8601$	$y = -2,7709x + 2,6203 R^2 = 0,8921$	$y = 2,3745x - 1,4487 R^2 = 0,8951$
СКО фракция 0,55–0,75 мм Siberian pine nut shells (SPNS) fraction 0,55–0,75 mm				
2	$y = 18,702x + 19,026 R^2 = 0,9478$	$y = 0,2479x - 1,5357 R^2 = 0,9898$	$y = -2,7596x - 2,8879 R^2 = 0,9364$	$y = 0,0099x + 0,0277 R^2 = 0,979$
2.1	$y = 12,117x + 5,8711 R^2 = 0,9087$	$y = 0,3095x - 1,152 R^2 = 0,7519$	$y = -1,6904x - 1,7555 R^2 = 0,6107$	$y = 0,0301x + 0,0696 R^2 = 0,7773$
2.2	$y = 5,7629x + 4,734 R^2 = 0,9757$	$y = 0,2548x - 0,9573 R^2 = 0,8876$	$y = -0,9633x - 1,4797 R^2 = 0,8993$	$y = 0,0371x + 0,1074 R^2 = 0,908$
2.3	$y = 4,3877x + 4,5262 R^2 = 0,8957$	$y = 0,204x - 0,8842 R^2 = 0,7411$	$y = -0,6505x - 1,4766 R^2 = 0,7171$	$y = 0,0324x + 0,1299 R^2 = 0,7465$

Таблица 3
Table 3

Функциональный состав углеродных сорбентов после процесса адсорбции
Functional parameters of carbon adsorbents after adsorption

ДО фракция 0,75–2,00 мм Pine sawdust (SP) fraction 0,75–2,00 mm			
Образец Sample	$E_{общ}, \text{ мг·экв/г}$ $E_{total}, \text{ mg·eq/g}$	$E_c, \text{ мг·экв/г}$ $E_c, \text{ mg·eq/g}$	$E_h, \text{ мг·экв/г}$ $E_h, \text{ mg·eq/g}$
1	4,80	3,50	1,30
1.1	4,75	0,50	4,25
1.2	5,40	1,00	4,40
1.3	15,75	0,75	15
СКО фракция 0,55–0,75 мм Siberian pine nut shells (SPNS) fraction 0,55–0,75 mm			
2	11,0	3,8	7,2
2.1	18,7	8,8	9,9
2.2	19,5	7,4	12,1

Среди выбранных сорбентов на основе ДО по результатам первого цикла сорбции-десорбции наибольшую сорбционную емкость показал сорбент 1.3, но наилучшие показатели по десорбции меди установлены для химически модифицированный азотной кислотой образца 1.2 – эффективность десорбции составила 86,7 %, причем

и за второй цикл этот образец сохранил до 80 % эффективности десорбции. В случае сорбционных материалов на основе СКО независимо от способа модификации все образцы показали достаточно высокую эффективность десорбции ионов меди (от 88 до 98 %).

Таблица 4
Table 4

Результаты исследования извлечения меди углеродными сорбентами
в динамических условиях
Copper extraction by carbon sorbents in dynamic experiments

Образец Sample	1-й цикл 1 cycle		2-й цикл 2 cycle	
	Масса сорбированной меди, г (ПДОЕ, мг/г) Mass of sorbed copper, g (Full dynamic exchange capacity, mg/g)	Масса десорбированной меди, г (эффективность десорбции, %) Mass of desorbed copper, g (desorption efficiency, %)	Масса сорбированной меди, г (ПДОЕ, мг/г) Mass of sorbed copper, g (Full dynamic exchange capacity, mg/g)	Масса десорбированной меди, г (эффективность десорбции, %) Mass of desorbed copper, g (desorption efficiency, %)
ДО фракция 0,75–2,00 мм Pine sawdust (SP) fraction 0,75–2,00 mm				
1	7,12 (3,56)	4 (56)	6,4 (3,2)	3,48 (54)
1.1	6,88 (3,44)	3,92 (57)	6,1 (3,05)	3,6 (59)
1.2	10,08 (5,04)	8,74 (86,7)	9,6 (4,8)	7,86 (80)
1.3	54,64 (27,32)	38 (70)	53,6 (26,8)	36,2 (68)
СКО фракция 0,55–0,75 мм Siberian pine nut shells (SPNS) fraction 0,55–0,75 mm				
2.1	5,12 (2,56)	5,04 (98,4)	4,96 (2,48)	4,28 (86,3)
2.2	4,70(2,35)	4,54 (96,6)	4,56 (2,28)	4,04 (88,6)

Выводы

В статических и динамических условиях исследованы сорбционные свойства измельченных сосновых опилок и скорлупы кедрового ореха, модифицированных термическим, химическим и термохимическим методами. Путем обработки изотерм, полученных в статических условиях, установлено, что адсорбция ионов Cu(II) исходными сосновыми опилками описывается моделью Дубинина – Радускевича, а скорлупой кедрового ореха – моделью Фрейндлиха. Сорбция на всех модифицированных образцах опилок и скорлупы кедрового ореха описывается моделью Ленгмюра с коэффициентами аппроксимации, близкими к 1.

Максимальную сорбционную емкость по отношению к ионам меди(II) в статических условиях проявляют термохимически модифицированные образцы измельченных сосновых опилок и скорлупы кедрового ореха, SE составляет 12,60 и 11,98 мг/г соответственно. Проведенные испытания образцов в динамических условиях позволяют рекомендовать методы химической и термохимической модификации для получения сорбентов с высокой сорбционной емкостью и способностью к регенерации, что допускает их применять в адсорбционных установках для доочистки промышленных сточных вод.

Список источников

- Астафьев А. В.* Обоснование условий реализации автотермического пиролиза органической биомассы применительно к теплотехнологическому оборудованию : дис. ... канд. техн. наук : 05.14.04 / Астафьев Александр Владимирович. Томск, 2021. 179 с.
- Галимова Р. З., Шайхиев И. Г., Свергузова С. В.* Обработка результатов исследования процессов адсорбции с использованием программного обеспечения Microsoft Excel : учеб. пособие. Казань ; Белгород : Изд-во БГТУ, 2017. 60 с.
- Грег С., Синг К.* Адсорбция. Удельная поверхность. Пористость / пер. с англ. М. : Мир, 1984. 306 с.
- Колесникова А. В.* Анализ образования и использования древесных отходов на предприятиях лесопромышленного комплекса России // Актуальные вопросы экономических наук. 2013. № 33. С. 116–120.
- Лурье Ю. Ю.* Справочник по аналитической химии. М. : Химия, 1971. 456 с.
- Никитин В. М., Оболенская А. В., Щеголев В. П.* Химия древесины и целлюлозы. М. : Лесн. пром-сть, 1978. 368 с.
- Никифорова Т. Е., Козлов В. А., Модина Е. А.* Сольватационно-координационный механизм сорбции ионов тяжелых металлов целлюлозосодержащим сорбентом из водных сред // Химия растительного сырья. 2010. № 4. С. 23–30.
- Новый подход к решению проблемы стандартизации гуминовых кислот / *А. И. Савченко, И. Н. Корнеева, Г. В. Плаксин* [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 3. С. 1–8.
- Сорбенты на основе модифицированных опилок / *С. Е. Орехова, Л. И. Хмылко, В. А. Ашуйко, Л. Н. Новикова* // Труды Белорусского государственного технологического университета. Сер. 3. Химия и технология неорганических веществ. Минск, 2000. Вып. 8. С. 20–33.
- Оффан К. Б., Петров В. С., Ефремов А. А.* Закономерности пиролиза скорлупы кедровых орехов с образованием древесного угля в интервале температур 200–500 °С // Химия растительного сырья. 1999. № 2. С. 61–64.
- Парфит Г., Рочестер К.* Адсорбция из растворов на поверхности твердых тел / пер. с англ. М. : Мир, 1986. 488 с.
- Рыженков А. В.* Химическая технология лигнина и перспективные материалы на его основе // Научное ведение. 2015. Т. 7. № 6. С. 1–20. DOI: 10.15862/137TVN615
- Современные представления о строении целлюлоз (обзор) / *Л. А. Алешина, С. В. Глазкова, Л. А. Луговская* [и др.] // Химия растительного сырья. 2001. № 1. С. 5–36.
- Сорбционные свойства и природа взаимодействия целлюлозосодержащих полимеров с ионами металлов / *Т. Е. Никифорова, Н. А. Багровская, В. А. Козлов, С. А. Лилин* // Химия растительного сырья. 2009. № 1. С. 5–14.
- Boehm H. P.* Surface oxides on carbon and their analysis: a critical assessment // Carbon. 2002. Vol. 40. P. 145–149. URL: 10.1016/S0008-6223(01)00165-8

References

- A new approach to standardization of humic acids / *A. And. Savchenko, I. N. Korneyeva, G. V. Plaxine* [et al.] // Modern problems of science and education. 2013. № 3. P. 1–8. DOI: 10.15862/137TVN615. (In Russ.)
- Astafiev A. V.* Justification of the conditions for the implementation of autothermal pyrolysis of organic biomass in relation to heat technology equipment. Dissertation for the degree of candidate in engineering sciences on speciality 05.14.04 / *Astafiev Alexander Vladimirovich*. Tomsk, 2021. 179 p.
- Boehm H. P.* Surface oxides on carbon and their analysis: a critical assessment // Carbon. 2002. Vol. 40. P. 145–149. URL: 10.1016/S0008-6223(01)00165-8

- Galimova R. Z., Shaikhiev I. G., Sverguzova S. V.* Processing the results of the study of adsorption processes using Microsoft Excel software : textbook. Kazan ; Belgorod : Publishing house of BSTU, 2017. 60 p.
- Greg S., Sing K.* Adsorption, surface area, and porosity. Moscow : Mir, 1984. 306 p.
- Kolesnikova A. V.* Analysis of the formation and use of wood waste at enterprises of forest-based industries in Russia // Current issues in economic sciences. 2013. № 33. С. 116–120. (In Russ.)
- Lurie Yu.* Handbook of Analytical Chemistry. Moscow : Khimia, 1971. 456 p.
- Modern theories about the structure of cellulose (review) / *A. A. Alyoshina, S. V. Glazkova, L. A. Lugovskaya* [et al.] // Chemistry of plant raw material. 2001. № 1. P. 5–36. (In Russ.)
- Nikiforova T. E., Kozlov V. A., Modina E. A.* Solvation-Coordination Mechanism of Sorption of Heavy Metal Ions by Cellulose-Containing Sorbent from Aqueous Media // Chemistry of plant raw material. 2010. № 4. P. 23–30. (In Russ.)
- Nikitin V. M., Obolenskaya A. V., Shchegolev V. P.* Chemistry of wood and cellulose. Moscow : Lesnaya promyshlennost', 1978. 368 p.
- Offan K. B., Petrov V. S., Efremov A. A.* Patterns of pyrolysis of Siberian pine nut shells with the formation of charcoal in the temperature range 200–500 °C // Chemistry of plant raw material. 1999. № 2. P. 61–64. (In Russ.)
- Parfit G., Rochester K.* Adsorption from solutions on the surface of solids. Moscow : Mir, 1986. 488 p.
- Ryzhenkov A. V.* Chemical technology of lignin and promising materials based on it // Naukovedenie. 2015. Vol. 7. № 6. P. 1–20. (In Russ.)
- Sorbents based on modified sawdust / *S. E. Orekhova, L. I. Khmylko, V. A. Ashuiko, L. N. Novikova* // Publications of the Belarusian State Technological University. Series 3. Chemistry and technology of inorganic substances. Minsk, 2000. Vol. 8. P. 20–33. (In Russ.)
- Sorption properties and the nature of the interaction of cellulose-containing polymers with metal ions / *T. E. Nikiforova, N. A. Bagrovskaya, V. A. Kozlov, S. A. Lilin* // Chemistry of plant raw material. 2009. № 1. P. 5–14. (In Russ.)

Информация об авторах

- Д. Ю. Дворянкин – бакалавр;*
М. Е. Сафонова – магистр;
И. А. Клепалова – старший преподаватель;
И. Г. Первова – доктор химических наук, директор ХТИ.

Information about the authors

- D. Y. Dvoryankin – Bachelor's degree;*
M. E. Safonova – Master's degree;
I. A. Klepalova – senior lecturer;
I. G. Pervova – Doctor of Chemical Sciences, Director of KHTI.

Статья поступила в редакцию 09.08.2023; принята к публикации 12.10.2023.

The article was submitted 09.08.2023; accepted for publication 12.10.2023.
