

Е. С. КОРШИКОВА

ВОЗДЕЙСТВИЕ МИКРОВОЛНОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА РАСТИТЕЛЬНЫХ СОРБЕНТОВ В ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

THE EFFECT OF MICROWAVE RADIATION
ON THE PROPERTIES OF PLANT SORBENTS
IN WASTEWATER TREATMENT TECHNOLOGY

Внедрение фитосорбентов является перспективным решением в рамках рационального природопользования. Однако для улучшения их сорбционных свойств необходимо проводить различные модификации, например микроволновым излучением. В статье представлены результаты по изменению свойств сорбционных материалов под воздействием микроволновой обработки мощностью 600 Вт в течение 1 мин. Установлено, что данный способ модификации имеет максимальный эффект при обработке опилок сосны и измельченных веток клена: отмечено увеличение удельной площади поверхности сорбента до 23,2 %, сорбционные свойства по метиловому голубому возрастают на 0,8–2,4 %, по растворенным нефтепродуктам – на 7,7–94,2 %, нефтеемкость увеличивается на 19,5–41,5 %. При обработке измельченных веток березы и тополя данный вид модификации неэффективен.

Ключевые слова: фитосорбенты, влагоемкость, удельная площадь поверхности, сорбционная емкость, нефтеемкость, микроволновая обработка, модификация

The introduction of phytosorbents is a promising solution within the framework of environmental management. However, to improve their sorption properties, it is necessary to carry out various modifications, for example, by microwave radiation. The article presents the results of changing the properties of sorption materials under the influence of microwave treatment with a power of 600 watts for 1 minute. It was found that this modification method has the maximum effect when processing sawdust of pine and crushed maple branches: an increase in the specific surface area of the sorbent to 23.2 % was noted, sorption properties for methyl blue increased by 0.8–2.4 %, for dissolved petroleum products – by 7.7–94.2 %, oil capacity increased by 19.5–41.5 %. When processing crushed birch and poplar branches, this type of modification is ineffective.

Keywords: phytosorbents, moisture capacity, specific surface area, sorption capacity, oil capacity, microwave treatment, modification

Изучение и внедрение эффективных способов переработки многотоннажных промышленных отходов является одной из актуальных задач рационального природопользования. Одним из направлений изучения вторичного использования отходов промышленности является их переработка и производство новых материалов, применяемых в технологиях очистки сточных вод различного происхождения.

Самыми высококачественными активными углями на сегодняшний день остаются активные угли, полученные из скорлупы кокосовых орехов, которые по своей сути также являются отходами. В России аналогом такого высокоплотного сырья может стать косточка плодов абрикоса и персика, что находит применение в Технологии МеКС [1], включающей карбонизацию, термическую обработку при температуре 780–850 °С в течение 15–24 часов, подачу угля без охлаждения на акти-

вацию, которую проводят при 920–1050 °С водяным паром при его расходе, равном 8,5–12,0 кг/кг активного угля. Полученный активный уголь характеризуется повышенными показателями адсорбционной емкости при очистке водных сред от аммиака – 16–17,8 мг/г [2].

Многими исследователями активно изучаются отходы деревоперерабатывающих предприятий в качестве основы для изготовления сорбентов [3–7]. Так, например, ООО «Компания «Ренари» предлагает экологически чистый сорбент на основе продуктов термической переработки отходов сельского хозяйства для сбора и удаления нефти и нефтепродуктов с поверхности воды с сорбционной емкостью по нефти 3–10 г/г [8]. Другой российский сорбент «Виван» изготовлен на основе полых зольных микросфер и имеет сорбционную емкость 8–10 г/г при извлечении нефти с поверхности воды и 4–5 г/г –

с твердой поверхности. Оработанный сорбент после отделения из него нефти может быть использован в качестве котельного топлива [9]. Американский концерн «Brady SPC» производит сорбенты на основе полипропилена, переработанной бумаги, текстиля, мха, используя разные виды технологических процессов [10–12]. Абсорбирующие материалы «Brady SPC» имеют на 25–50 % больше нефтепоглощение, чем полипропиленовые материалы, что означает снижение количества необходимого сорбента для поглощения разлива того же размера [13].

Однако при использовании отходов на растительной основе возможно столкнуться с проблемой их низкой сорбционной способности в связи с характерным для них высоким водопоглощением [14]. Для снижения водопоглощения и увеличения сорбционной активности предлагаются различные способы модификации.

В настоящее время проявляется большой интерес к использованию микроволнового излучения для изменения свойств различных материалов. Есть данные, что такая обработка улучшает проницаемость и доступность функциональных групп некоторых неорганических сорбционных материалов: глин, природных цеолитов, активных углей, однако есть и противоположные результаты, когда микроволновое воздействие приводит к ухудшению свойств углей из-за снижения проницаемости [15].

В работе [16] авторами установлено, что при увеличении мощности сверхвысокочастотного (далее – СВЧ) излучения при обработке торфа увеличивается скорость модифицирования и нефтеемкость, а в его структуре происходит термическая деструкция органических соединений, что сопровождается выделением летучих продуктов с последующим формированием пористой структуры, дисперсность частиц торфа уменьшается, степень водопоглощения снижается в два раза.

В процессе исследований, описанных в работе [17], для повышения адсорбционной способности монтмориллонита использован различный механизм нагрева: быстрый объемный нагрев СВЧ-излучением при мощности 800 Вт в течение 4 мин и традиционный поверхностный нагрев при температуре 453 К в течение одного часа. Установлено, что термическая активация повысила сорбционную активность образца к парам воды в 3,3 раза, в то время как СВЧ-обработка – в 5,5 раза, а время обработки сокращается в 15 раз. В результате микроволнового излучения происходит быстрый разогрев материала во всем объеме и десорбция молекул воды как с поверхности, так и из объема образца; ранее занятые водой активные центры освобождаются и образец активизируется.

В работе [18] также утверждается, что СВЧ-излучение увеличивает площадь удельной поверхности активированного угля с 82 до 800 м²/г.

Поиск относительно недорогих и экологически чистых сорбентов является перспективным [19], а сорбенты на растительной основе наиболее привлекательны тем, что они биосферно совместимы: безопасны, нет необходимости в регенерации ввиду дешевой и многоотоннажной сырьевой базы, возможны более экологически чистые способы утилизации, способность к биоразложению. К тому же при их использовании решается сразу две задачи: очистка сточных вод и утилизация промышленных и сельскохозяйственных отходов.

На кафедре инженерных систем и сооружений Тюменского индустриального университета ведутся исследования различных растительных отходов в качестве сорбционного материала.

Цель настоящей работы заключается в изучении воздействия микроволнового излучения на сорбционный материал, полученный из древесины различных пород деревьев, произрастающих в Тюменской области, и являющийся отходами местных производств.

Экспериментальная часть. В качестве исходного сырья для приготовления фитосорбента были использованы растительные отходы, такие как опилки сосны и измельченные ветки тополя фракцией 1–4 мм, измельченные ветки березы фракцией 3–5 мм, измельченные ветки березы фракцией 5–7 мм (см. рисунок).

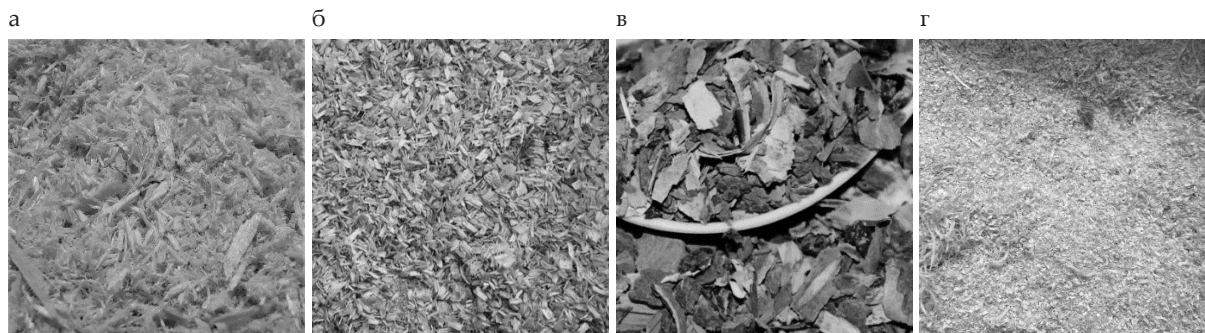
Сырье изначально высушивалось, после подвергалось модифицированию путем обработки СВЧ-излучением при мощности 600 Вт, частоте 2,45 Гц, в течение 1 мин с помощью бытовой микроволновой печи.

Удельная площадь поверхности сорбентов определялась по методике ASTM D6556-21 путем оценки количества поглощенного образцом азота, адсорбированного при заданном давлении и температуре с помощью теории Брунауэра, Эммета и Теллера. Для исследования применен адсорбционный анализатор удельной поверхности и пористости «3P SYNC 210A».

Далее проверялась влагоемкость образцов сорбционного материала по методике [20]. Навеска сорбента массой 5 г помещалась в чашки, заполненные водой, при этом в зависимости от диаметра чашки слой сорбента изменялся от 1 до 30 мм. Через три часа контакта с водой сорбент извлекался и взвешивался. Влагоемкость определялась по формуле

$$W = \frac{M_c - M}{M}, \text{ г/г}, \quad (1)$$

где M_c , M – масса сырого и сухого сорбента, г.



Образцы исследуемых растительных отходов: а – сосновые опилки; б – измельченные ветки тополя; в – измельченные ветки березы; г – измельченные ветки клена

Samples of studied plant waste:

a – pine sawdust; b – crushed poplar branches; c – crushed birch branches; d – crushed maple branches

Нефтеемкость исследуемого сорбционного материала определялась в соответствии с методикой [20]. Навеску сорбента (5 г) засыпали в предварительно взвешенную металлическую сетку и погружали в масло для воздушных компрессоров «Mobil Rarus SHC 1025», выдерживали в течение 15 мин и извлекали. После того как избыток масла стекал, образец взвешивали. Нефтеемкость высчитывалась по формуле

$$K_{1M} = \frac{m_H}{m_{\text{сорб}}}, \text{ г/г}, \quad (2)$$

где m_H – масса нефти, поглощенная сорбентом, г; $m_{\text{сорб}}$ – навеска сорбента, г.

Затем исследовались сорбционные свойства образцов. На первом этапе определялась сорбционная емкость образцов по метиленовому голубому по методике согласно ГОСТ 4453-74 «Уголь активный осветляющий древесный порошкообразный. Технические условия». Для проведения анализа готовился раствор индикатора массовой концентрации 10 мг/дм³. Навеска сорбента (5 г) помещалась в коническую колбу, прибавлялся раствор метилового голубого (100 дм³), колба закрывалась пробкой и оставлялась на 20 ч, перемешивание осуществлялось с помощью мешалки. Затем проба центрифугировалась в течение 15 мин. Раствор отбирался, разбавлялся дистиллированной водой, далее определялась оптическая плотность при помощи прибора «Спектрофотометр ПЭ-5400ви» при длине волны 645 нм. Адсорбционная активность сорбента по индикатору вычислялась по формуле

$$X = \frac{(C_1 - C_2) \cdot V}{m}, \text{ мг/г}, \quad (3)$$

где C_1 – массовая концентрация исходного раствора индикатора, мг/дм³; C_2 – массовая концентрация раствора индикатора после сорб-

ции, мг/дм³; V – объем раствора индикатора, дм³; m – масса навески сорбента, г.

На втором этапе определялась динамическая сорбционная емкость (далее – ДСЕ). Пробы модельных растворов (150 см³) непрерывно фильтровались сверху вниз через колонку, заполненную сорбентом (5 г), с постоянной скоростью 0,1 см³/с. Остаточная концентрация растворенных нефтепродуктов в фильтрате измерялась при помощи прибора «Флюорат 02-3М» по стандартной методике ПНД Ф 14.1:2.4.128-98 (изд. 2012 г.). Анализ проводился без достижения полной сорбционной емкости. ДСЕ определялась по формуле

$$\text{ДСЕ} = \frac{V_r \cdot C}{m}, \text{ мг/г}, \quad (4)$$

где V_r – объем раствора, вышедшего из колонки от начала опыта до появления растворенного вещества, дм³; C – равновесная концентрация раствора, мг/дм³; m – навеска сорбента, г.

Модельные растворы нефтепродуктов готовились на основе масла для воздушных компрессоров «Mobil Rarus SHC 1025». Концентрация составляла 11,3 мг/дм³, что соответствует допустимым пределам для значений хозяйственно-бытовых сточных вод населенных пунктов (не более 15 мг/дм³) и поверхностных сточных вод (от 1 до 25 мг/дм³) согласно СП 32.13330.2018 «Канализация. Наружные сети и сооружения»).

Результаты. Для исследования влияния СВЧ-излучения на структуру сорбционных материалов была измерена удельная площадь поверхности до и после обработки. Полученные данные приведены в табл. 1.

В нативном состоянии наибольшей удельной площадью поверхности обладают измельченные ветки клена (1,555 м²/г), наименьшей – опилки сосны (0,955 м²/г). После проведения модификации измельченных веток клена, березы

и тополя увеличения удельной площади поверхности добиться не получилось, и она осталась практически на одном и том же уровне. При этом для образцов из сосновых опилок достигнуто максимальное увеличение параметра – удельная площадь поверхности возросла в 1,23 раза.

Результаты определения влагоемкости сорбционных материалов сведены в табл. 2.

После обработки СВЧ-излучением увеличилась влагоемкость измельченных веток березы – в 1,23 раза. Увеличение влагоемкости сосновых опилок (в 1,04 раза) и веток клена (в 1,09 раза) незначительное, а для веток березы отмечено снижение (в 1,09 раза).

При оценке нефтеемкости сорбентов отмечено, что микроволновая обработка имела вы-

сокий эффект при обработке опилок сосны – их нефтеемкость возросла в 1,42 раза, а также увеличилась нефтеемкость измельченных веток клена – в 1,2 раза. Обработка данным методом веток тополя и березы не имеет эффекта (табл. 3).

Опираясь на полученные результаты, можно сделать вывод, что влагоемкость и нефтеемкость являются зависимыми параметрами: при увеличении влагоемкости увеличивается и нефтеемкость. Однако микроволновое облучение имеет значительный положительный эффект только при обработке сосновых опилок и измельченных веток клена.

Под воздействием микроволновой энергии вода в клетках древесины нагревается и закипает, создавая такое давление пара в клетках, которое приводит к разрушению стенок клетки.

Таблица 1. Удельная площадь поверхности растительных сорбентов
Table 1. Specific surface area of vegetable sorbents

Вид сорбента	Удельная площадь поверхности, м ² /г		Изменение, %
	Нативное состояние	Модифицированное состояние	
Опилки сосны	0,955	1,177	+23,2
Измельченные ветки тополя	1,376	1,388	+0,9
Измельченные ветки березы	1,482	1,505	+1,6
Измельченные ветки клена	1,555	1,573	+1,2

Таблица 2. Влагоемкость растительных сорбентов
Table 2. Moisture capacity of vegetable sorbents

Вид сорбента	Влагоемкость, г/г		Изменение, %
	Нативное состояние	Модифицированное состояние	
Опилки сосны	5,844	6,056	+3,6
Измельченные ветки тополя	7,306	6,610	-9,5
Измельченные ветки березы	8,126	10,015	+23,2
Измельченные ветки клена	8,557	9,358	+9,4

Таблица 3. Нефтеемкость растительных сорбентов
Table 3. Oil capacity of vegetable sorbents

Вид сорбента	Нефтеемкость, г/г		Изменение, %
	Нативное состояние	Модифицированное состояние	
Опилки сосны	4,55	6,44	+41,5
Измельченные ветки тополя	5,31	5,36	+0,9
Измельченные ветки березы	2,72	2,67	-1,8
Измельченные ветки клена	5,32	6,36	+19,5

Предполагается, что поры сорбента освобождаются от свободной воды, удельная поверхность увеличивается и сорбционная активность возрастает [21].

Сорбционная емкость образцов по метиленовому голубому и растворенным нефтепродуктам приведена в табл. 4 и табл. 5 соответственно.

По полученным значениям установлено, что сорбционная емкость всех образцов находится в пределах погрешности – не более 2,5 %. После обработки микроволнами отмечено наибольшее увеличение сорбционной емкости для сосновых опилок – в 1,02 раза, измельченных веток тополя – в 1,01 раза, березы – в 1,02 раза, клена – в 1,01 раза.

Наибольшую сорбционную активность в динамических условиях в нативном состоянии проявили измельченные ветки клена – их ДСЕ выше значений образцов тополя в 1,05 раза, березы – в 1,23 раза, а сосновых опилок – в 1,98 раза. Однако после выполнения модификации удалось добиться существенного повышения ДСЕ для сосновых опилок – в 1,94 раза, для из-

мельченных веток березы – в 1,37 раза. При обработке веток клена достигнуто незначительное увеличение ДСЕ (в 1,08 раза), а при обработке веток тополя – уменьшение (в 1,13 раза), что может быть связано с особенностями структуры и необходим иной метод модифицирования.

Наибольшие изменения в структуре и свойствах под воздействием СВЧ-излучения отмечены для сосновых опилок, что вызвано особенностями данной древесной породы. В первую очередь под воздействием микроволновой энергии разрушаются клетки сердцевидного луча, так как имеют более тонкие стенки, чем клетки основной древесной ткани (трахеиды, либриформы), происходит размягчение и выдавливание смолы, затем свободная вода в клетках древесины закипает. Все это приводит к образованию открытых пор, разрушению стенок клетки и созданию тонких радиальных трещин, вследствие чего увеличивается удельная площадь поверхности и, соответственно, возрастает сорбционная активность образца [21].

Таблица 4. Сорбционная емкость растительных сорбентов по метиленовому голубому
Table 4. Sorption capacity of plant sorbents by methylene blue

Вид сорбента	Сорбционная емкость по метиленовому синему, мг/дм ³		Изменение, %
	Нативное состояние	Модифицированное состояние	
Опилки сосны	0,123	0,126	+2,4
Измельченные ветки тополя	0,125	0,126	+0,8
Измельченные ветки березы	0,125	0,127	+1,6
Измельченные ветки клена	0,126	0,127	+0,8

Таблица 5. Динамическая сорбционная емкость растительных сорбентов по растворенным нефтепродуктам
Table 5. Dynamic sorption capacity of plant sorbents for dissolved petroleum products

Вид сорбента	ДСЕ по растворенным нефтепродуктам, мг/дм ³		Изменение, %
	Нативное состояние	Модифицированное состояние	
Опилки сосны	0,052	0,101	+94,2
Измельченные ветки тополя	0,098	0,087	-11,2
Измельченные ветки березы	0,084	0,115	+36,9
Измельченные ветки клена	0,103	0,111	+7,7

Выводы. Исследование способа модификации фитосорбентов микроволнами показало, что после обработки происходит увеличение удельной площади поверхности сосновых опилок на 41,5 %, измельченных веток клена – на 19,5 %. Соответственно у сосновых опилок

и измельченных веток клена также отмечено улучшение сорбционных свойств: при незначительном увеличении влагоемкости сорбционная емкость по метиленовому голубому и растворенным нефтепродуктам сосновых опилок возросла на 2,4 и 94,2 % соответственно, веток

клена – на 0,8 и 7,7 % соответственно. Нефтеемкость сосновых опилок увеличилась на 41,5 %, веток клена – на 19,5 %.

Микроволновая обработка измельченных веток березы позволила добиться увеличения сорбционной емкости по метиленовому голубому на 1,6 %, по растворенным нефтепродуктам – на 36,9 %, также произошло увеличение влагоемкости (на 23,2 %) и незначительное увеличение удельной площади (на 1,6 %), однако по нефтеемкости отмечен отрицательный эффект.

При обработке измельченных веток тополя данный вид модификации неэффективен.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Место активных углей в экологии и экономике, новые технологии их производства / В.М. Мухин, А.А. Курилкин, Н.Л. Воропаева, К.В. Лексюкова, П.В. Учанов // Сорбционные и хроматографические процессы. 2016. Т. 16, № 3. С. 346–353.
2. Патент № 2228293. Способ получения дробленого активного угля из скорлупы орехов: № 2002134878/15: заявл. 23.12.2002: опубл. 10.05.2004 / А.Н. Тамамьян, В.М. Мухин, И.Н. Зубова, А.Н. Макеева, В.А. Поляков, Е.Н. Яковлева, М.Н. Таратун; патентообладатель ОАО «Заря». 5 с.
3. Якубовский С.Ф., Булавка Ю.А., Попкова Л.А., Писарева С.С. Сорбционные свойства природных целлюлозо- и лигнинсодержащих отходов для сбора проливов нефтепродуктов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В. 2013. С. 110–114.
4. Пашаян А.А., Нестеров А.В. Создание нефтепоглощающих сорбентов совместной утилизацией древесных опилок и нефтяных шламов // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20, № 9. С. 144–147.
5. Очистка нефтесодержащих сточных вод с помощью природных и искусственных сорбентов / Н.М. Привалова, М.В. Двадненко, А.А. Некрасова, О.С. Попова, Д.М. Привалов // Научный журнал КубГАУ. 2015. № 113(09). С. 1–10.
6. Reza Behnood, Bagher Anvaripour, Nematollah Jaafarzade Haghighi Fard, Masoumeh Farasati. Application of Natural Sorbents in Crude Oil Adsorption. Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology. 2013. V. 2. N. 4. P. 1–11.
7. Ikenyiri PN, Ukpaka CP. Overview on the Effect of Particle Size on the Performance of Wood Based Adsorbent. J Chem Eng Process Technol. 2016. V. 7. I. 5. 4 p. DOI: 10.4172/2157-7048.1000315.
8. Адсорбенты для сбора нефти [Электронный ресурс]. URL: <http://www.grantor.by/adsorbenty-dlya-sbora-nefti> (дата обращения: 05.02.2025).
9. Сорбент ВИБАН. Сорбент нефтепродуктов [Электронный ресурс]. URL: <https://xn--90ahanknkqgiv0e.xn--p1ai/%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B4%D0%83%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F/%D1%81%D0%BE%D1%80%D0%B1%D0%B5%D0%BD%D1%82/8-%D1%81%D0%BE%D1%80%D0%B1%D0%B5%D0%BD%D1%82-%D0%BD.html> (дата обращения: 05.02.2025).
10. Грун Н.А., Ким А.Н. Вопросы питьевого водоснабжения и пути их решения методом доочистки водопроводной воды на фильтрах с березовым активированным углем, модифицированным фуллеренами // Градостроительство и архитектура. 2013. Т. 3, № 4. С. 28–32. DOI: 10.17673/Vestnik.2013.04.5.
11. Самодолова О.А., Ульрих Д.В., Лонзингер Т.М. Использование лузги гречихи (гранулированной) в очистке городских поверхностных сточных вод // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13, № 1. С. 37–44. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.01.5.
12. Самодолова О.А., Ульрих Д.В., Лонзингер Т.М., Головина С.Г. Скорлупа грецкого ореха как перспективный сорбент в очистке поверхностных сточных вод с городских территорий // Градостроительство и архитектура. 2024. Т. 14, № 1. С. 19–26. DOI: 10.17673/Vestnik.2024.01.03.
13. Absorbents and spill control [Электронный ресурс]. URL: <https://www.bradvid.com.sg/absorbents> (дата обращения: 05.02.2025).
14. Брюхов М.Н., Ульрих Д.В., Лонзингер Т.М., Денисов С.Е. Роль природных сорбентов и отходов трубного производства в очистке кислых железосодержащих сточных вод // Градостроительство и архитектура. 2023. Т. 13, № 4. С. 11–19. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.04.02.
15. Влияние СВЧ-обработки клиноптилолита на его ионообменные кинетические свойства / Т. Бахия, Р.Х. Хамизов, М.Д. Бавижев, М.А. Конов // Сорбционные и хроматографические процессы. 2016. Т. 16, № 6. С. 803–812.
16. Изучение способа получения гидрофобного сорбента на основе модифицированного торфа / Е.А. Баннова, Н.К. Китаева, С.М. Мерков, М.В. Мучкина, Е.П. Залозная, П.Н. Мартынов // Сорбционные и хроматографические процессы. 2013. Т. 13, Вып. 1. С. 60–68.
17. Бельчинская Л.И., Ходосова Н.А., Новикова Л.А. Влияние различных механизмов нагрева слоистого алюмосиликата на сорбционные процессы. Сообщение 1. Сорбция воды при тепловом и электромагнитном (СВЧ) нагреве монтмориллонита // Сорбционные и хроматографические процессы. 2017. Т. 17, № 5. С. 781–791.
18. Foo K.Y., Hameed K.Y. Microwave-assisted regeneration of activated carbon. Bioresource Technology. 2012. N. 119. P. 234–240.
19. Вялкова Е.И. Извлечение нефтепродуктов из сточных вод природными сорбентами Арктики // Градостроительство и архитектура. 2022. Т. 12, № 4. С. 25–33. DOI: 10.17673/Vestnik.2022.04.4.
20. Каменщиков Ф.А., Богомольный Е.И. Нефтяные адсорбенты. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. 268 с.
21. Torgovnikov G., Vinden P. Microwave wood modification technology and its application. Forest products journal. 2010. V. 60. N. 2. P. 173–182. DOI: 10.13073/0015-7473-60.2.173.

REFERENCES

1. Mukhin V.M., Kurilkin A.A., Voropaeva N.L., Leksyukova K.V., Uchanov P.V. Place of active coals in ecology and economy, new technologies of their production. *Sorbcionnye i hromatograficheskie process* [Sorption and Chromatographic Processes], 2016, vol. 16, no. 3, pp. 346–353. (in Russian)
2. Tamamyán A.N., Mukhin V.M., Zubova I.N., Makeeva A.N., Polyakov V.A., Yakovleva E.N., Taratun M.N. *Sposob poluchenija droblenogo aktivnogo uglja iz skorlupy orehov* [Method of obtaining crushed active carbon from nut shells]. Patent RF, no. 2228293, 2004.
3. Yakubovsky S.F., Bulavka Yu.A., Popkova L.A., Pisareva S.S. Sorption properties of natural cellulose and lignin-containing waste for collecting petroleum product spills. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Polotsk State University], 2013, pp. 110–114. (in Russian)
4. Pashayan A.A., Nesterov A.V. Creation of oil absorbing sorbents by combined utilization of sawdust and oil sludge. *Vestnik tehnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the University of Technology], 2017, vol. 20, no. 9, pp. 144–147. (in Russian)
5. Privalova N.M., Dvadenko M.V., Nekrasova A.A., Popova O.S., Privalov D.M. Treatment of oily wastewater using natural and artificial sorbents. *Nauchnyj zhurnal KubGAU* [Scientific journal KubSAU], 2015, no. 113(09), pp. 1–10. (in Russian)
6. Reza Behnood, Bagher Anvaripour, Nematollah Jaafarzade Haghighi Fard, Masoumeh Farasati. Application of Natural Sorbents in Crude Oil Adsorption. *Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology*. 2013. V. 2. N. 4. P. 1–11.
7. Ikenyiri PN, Ukpaka CP. Overview on the Effect of Particle Size on the Performance of Wood Based Adsorbent. *J Chem Eng Process Technol*. 2016. V. 7. I. 5. 4 p. DOI: 10.4172/2157-7048.1000315
8. *Adsorbents for oil recovery*. Available at: <http://www.grantorf.by/adsorbenty-dlya-sbora-nefti> (accessed 05 February 2025).
9. *VIVAN sorbent. Petroleum product sorbent*. Available at: <https://xn--90ahanknkgiv0e.xn--p1ai/%D0%BA%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F/%D1%81%D0%BE%D1%80%D0%B1%D0%B5%D0%BD%D1%82/8-%D1%81%D0%BE%D1%80%D0%B1%D0%B5%D0%BD%D1%82-%D0%B2%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D0%BD.html> (accessed 05 February 2025).
10. Grun N.A., Kim A.N. Issues of drinking water supply and ways to solve them by the method of additional treatment of tap water on filters with birch activated carbon modified with fullerenes. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2013, vol. 3, no. 4, pp. 28–32. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2013.04.5
11. Samodolova O.A., Ulrikh D.V., Lonzingier T.M. Using Granuated Buckwheat Husks in Urban Surface Runoff Treatment. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2023, vol. 13, no. 1, pp. 37–44. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2023.01.5
12. Samodolova OA, Ulrich DV, Lonzingier TM, Golovina S.G. Walnut shells as a promising sorbent in the treatment of surface wastewater from urban areas. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2024, vol. 14, no. 1, pp. 19–26. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2024.01.03
13. *Absorbents and spill control*. Available at: <https://www.bradayid.com.sg/absorbents> (accessed 05 February 2025).
14. Bryukhov M.N., Ulrich D.V., Lonzingier TM, Denisov S.E. The role of natural sorbents and pipe waste in the treatment of acidic iron-containing wastewater. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2023, vol. 13, no. 4, pp. 11–19. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2023.04.02
15. Bakhia T., Khamizov R.H., Bavizhev M.D., Konov M.A. Effect of microwave treatment of clinoptilolite on its ion-exchange kinetic properties. *Sorbcionnye i hromatograficheskie process* [Sorption and Chromatographic Processes], 2016, vol. 16, no. 6, pp. 803–812. (in Russian)
16. Bannova E.A., Kitaeva N.K., Merkov S.M., Muchkina M.V., Zaloznaya E.P., Martynov P.N. Study of the method for producing a hydrophobic sorbent based on modified peat. *Sorbcionnye i hromatograficheskie process* [Sorption and Chromatographic Processes], 2013, vol. 13, iss. 1, pp. 60–68. (in Russian)
17. Belchinskaya L.I., Khodosova N.A., Novikova L.A. Influence of different heating mechanisms of layered aluminosilicate on sorption processes. Message 1. Water sorption during thermal and electromagnetic heating of montmorillonite. *Sorbcionnye i hromatograficheskie process* [Sorption and Chromatographic Processes], 2017, vol. 17, no. 5, pp. 781–791. (in Russian)
18. Foo K.Y., Hameed K.Y. Microwave-assisted regeneration of activated carbon. *Bioresource Technology*. 2012. N. 119. P. 234–240.
19. Vialkova E.I. Extraction of Petroleum Products from Wastewater by Natural Sorbents of the Arctic. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2022, vol. 12, no. 4, pp. 25–33. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2022.04.4
20. Kamenshchikov F.A., Bogomolny E.I. *Neftjanye adsorbenty* [Petroleum adsorbents]. Moscow, Izhevsk, Research Center “Regular and Chaotic Dynamics”, 2005. 268 p.
21. Torgovnikov G., Vinden P. Microwave wood modification technology and its application. *Forest products journal*. 2010. V. 60. N. 2. P. 173–182. DOI: 10.13073/0015-7473-60.2.173

Об авторе:

КОРШИКОВА Елена Сергеевна

доцент кафедры инженерных систем и сооружений
Тюменский индустриальный университет
625000, Россия, г. Тюмень, ул. Володарского, 38
E-mail: korshikovaes@yandex.ru

KORSHIKOVA Elena S.

Associate Professor of the Engineering Systems
and Structures Chair
Tyumen Industrial University
625000, Russia, Tyumen, Volodarskogo st., 38
E-mail: korshikovaes@yandex.ru

Для цитирования: Коршикова Е.С. Воздействие микроволнового излучения на свойства растительных сорбентов в технологии очистки сточных вод // Градостроительство и архитектура. 2025. Т. 15, № 4. С. 52–59. DOI: 10.17673/Vestnik.2025.04.08.

For citation: Korshikova E.S. The effect of microwave radiation on the properties of plant sorbents in wastewater treatment technology. *Gradostroitel'stvo i arhitektura* [Urban Construction and Architecture], 2025, vol. 15, no. 4, pp. 52–59. (in Russian) DOI: 10.17673/Vestnik.2025.04.08.

Принята: 15.05.2025 г.