

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 628.31

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-1-175-187

Е.С. КОРШИКОВА¹, А.М. ФУГАЕВА¹, Е.И. ВЯЛКОВА¹, Е.Ю. ОСИПОВА²,

¹Тюменский индустриальный университет,

²Томский государственный архитектурно-строительный университет

МИКРОВОЛНОВАЯ ОБРАБОТКА ПРИРОДНЫХ СОРБЕНТОВ В ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД

Модификация природных сорбентов с целью улучшения их сорбционных свойств актуальна во всем мире. Для сибирских регионов России особенный интерес представляют местные природные материалы (торф, мох и ягель) и отходы деревообрабатывающих производств (сосновые опилки), которые имеют потенциал как сорбенты для очистки сточных вод, содержащих нефть и нефтепродукты.

Одним из современных способов модификации и активации сорбентов является микроволновое (МВ) облучение. В статье представлены результаты научного исследования влияния МВ-обработки на свойства сорбентов природного происхождения.

Кратковременная микроволновая модификация практически не влияет на влагопоглощение и нефтепоглощение на образцах торфа и мха. Данные свойства ягеля и опилок, наоборот, улучшаются; особенно это проявляется у сосновых опилок – нефтеемкость возрастает на 41 %. В процессе исследуемой модификации образцов ягеля и сосновых опилок значения сорбционной емкости по отношению к растворенным в воде нефтепродуктам выросли на 11,4 и 17 % соответственно. Наилучший эффект достигнут при облучении сосновых опилок микроволнами мощностью 600 Вт в течение одной минуты.

Ключевые слова: природные сорбенты; нефтепродукты; микроволновая обработка; влагоемкость; нефтеемкость; интенсификация сорбции.

Для цитирования: Коршикова Е.С., Фугаева А.М., Вялкова Е.И., Осипова Е.Ю. Микроволновая обработка природных сорбентов в технологии очистки сточных вод // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 1. С. 175–187.

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-1-175-187

E.S. KORSHIKOVA¹, A.M. FUGAEVA¹, E.I. VYALKOVA¹, E.Yu. OSIPOVA²,

¹Tyumen Industrial University,

²Tomsk State University of Architecture and Building

MICROWAVE TREATMENT OF NATURAL SORBENTS IN WASTEWATER PURIFICATION

Purpose: Modification of natural sorbents to improve their sorption properties. **Design:** Microwave treatment effect on the properties of peat, reindeer moss, moss and pine sawdust.

Research findings: Short-term microwave treatment has no effect on the moisture and oil absorption by peat and moss. On the contrary, the properties of reindeer moss and sawdust are

improved, especially of wood waste, i. e., oil capacity increases by 41 %. The microwave treatment of reindeer moss and pine sawdust provides 11.4 and 17 % increase in the sorption capacity in relation to oil products dissolved in water, respectively. The best effect is observed for pine sawdust irradiation with 600 W microwaves for one minute. **Practical implication:** Activated sorbents can be used in purification of wastewater containing petroleum products. **Originality/value:** The sorption properties of Arctic natural materials modified with microwaves are studied for the first time.

Keywords: natural sorbents; petroleum products; microwave treatment; moisture capacity; oil capacity; sorption intensification.

For citation: Korshikova E.S., Fugaeva A.M., Vyalkova E.I., Osipova E.Yu. Mikrovolnovaya obrabotka prirodnykh sorbentov v tekhnologii ochistki stochnykh vod [Microwave treatment of natural sorbents in wastewater purification]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 1. Pp. 175–187. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-1-175-187

Введение

Природоподобные технологии очистки сточных вод являются наиболее экологичными, безопасными и экономически выгодными методами в технологиях очистки сточных вод. Многие исследователи изучают полезные свойства природных сорбентов, таких как глины и глинистые минералы, торфы, опилки или крошка деревьев, водоросли, остатки от растений (шелуха, скорлупа, солома) и др. [1–13].

Перспективные сорбционные материалы для очистки сточных вод должны обладать не только высокими сорбционными свойствами, но и быть нетоксичными, обладать способностью к регенерации и легко утилизироваться, а также иметь низкую стоимость и доступную сырьевую базу. Основным недостатком природных материалов как сорбентов является их слабо выраженная сорбционная способность, на которую также негативно влияет их повышенная гидрофильность. Снижения водопоглощения и повышения сорбционной активности возможно добиться путем различных модификаций [1–3, 13].

Авторы работ [4–7, 14] доказывают, что микроволновое воздействие на сорбционные материалы позволяет добиться увеличения их сорбционной активности и удельной поверхности, снизить водопоглощение за счет равномерного и быстрого воздействия на материал, что сокращает время и упрощает способ обработки и, соответственно, уменьшает материальные затраты. Обнаружено, что микроволновое излучение в десятки раз ускоряет многие химические реакции, способствует быстрому объемному, а не только поверхностному нагреву жидких и твердых образцов, быстро и полностью удаляет влагу [8], что немаловажно при производстве сорбентов.

В табл. 1 представлены лучшие результаты по МВ-обработке сорбентов на основе природных материалов, используемых для очистки сточных вод.

Однако существуют следующие основные ограничения использования микроволнового излучения в технологиях подготовки сорбентов: увеличение затрат на электроэнергию, отсутствие магнетронов промышленных масштабов, из-за ограниченной глубины проникновения микроволн в материал твердых сорбентов обработке подлежат небольшие объемы [10, 11, 14].

Таблица 1

**Результаты по микроволновой обработке сорбентов
на основе природных материалов**

Сорбент	Процесс подготовки сорбентов	Мощность МВ-обработки	Продолжительность	Температура	Эффект	Номер ссылки
Торф	МВ-нагрев	60–600 Вт	60 мин	Нет данных	Нефтеемкость 2,5–2,73 г/г С увеличением мощности адсорбция йода возрастает в 1,2–1,4 раза (с 115 до 150 мг/г), а по метиленовому голубому снижается в 2 раза (с 55 до 28 мг/г)	[9]
Торф	МВ-нагрев	900 Вт	12 мин	450 °С	Адсорбционная активность по йоду увеличилась с 11,4 до 19,1 %	[10]
Бурый уголь	МВ-нагрев	900 Вт	22,5 мин	315 °С	Адсорбционная активность по йоду увеличилась с 18,0 до 34,9 %	[10]
Монтмориллонит	МВ-нагрев	800 Вт	4 мин	154 °С	Адсорбция паров воды возросла с 0,67 до 3,66 ммоль/г	[11]
Сосновые опилки	Измельчение, сушка и МВ-нагрев	600 Вт	2 мин	40 °С	Увеличение сорбционной емкости по нефтепродуктам в 3,7–4 раза для исходных концентраций менее 5 мг/дм ³ и в 1,2 раза для исходных концентраций 16–35 мг/дм ³	[3]
Рисовая шелуха	Сжигание в МВ-печи	Нет данных	288 ч 384 ч	500 °С 800 °С	Удаление нефтепродуктов: на 78 % на 98 %	[12]

Тем не менее внедрение микроволновой обработки обеспечит экологически чистые методы подготовки сорбирующих материалов для очистки сточных вод, эффективную и экономичную интенсификацию процессов сорбции загрязнений и минимальное негативное воздействие на окружающую среду вследствие сокращения используемых реагентов на стадиях модификации, регенерации и активации сорбентов.

Методы и материалы

В качестве объекта исследований выбраны природные материалы Тюменского региона: торф, мох, ягель и сосновые опилки. Первые три образца брались из природной среды методом «квадрата». Сосновые опилки являются отходами деревообрабатывающего производства. На рис. 1 представлены фотографии исследуемых образцов.

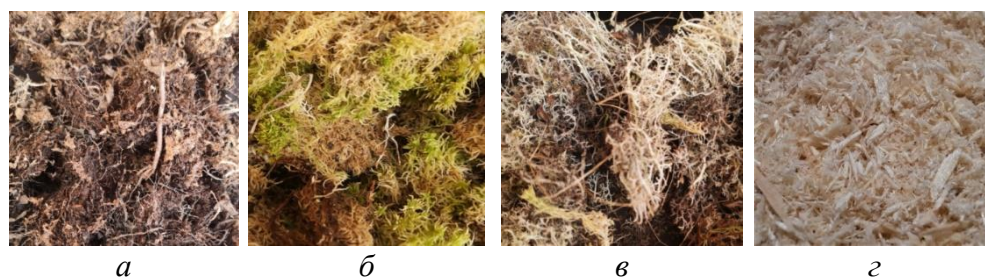


Рис. 1. Образцы природных материалов:
а – торф; б – мох; в – ягель; г – сосновые опилки

Образцы промывались, высушивались, и некоторая часть из них обрабатывалась микроволнами в бытовой СВЧ-печи при мощности 600 Вт, частоте 2,45 Гц в течение 1 мин.

Далее проверялись влагоемкость и нефтеемкость образцов гравиметрическим способом до и после микроволновой обработки. Влагопоглощение определялось по стандартной методике [15]. Испытуемая навеска сорбента составляла 5 г, слой образца изменялся от 1 до 30 мм в зависимости от диаметра чашки. Насыщение водой проводилось в течение 3 ч, и далее, после взвешивания, влагоемкость (w , г/г) вычислялась по формуле

$$w = \frac{m_c - m}{m}, \quad (1)$$

где m_c , m – масса сырого и сухого сорбента соответственно, г.

Погрешность измерения не превышала 1 %.

Нефтеемкость характеризуется массой нефти (m_n), удерживаемой единицей массы сорбента ($m_{\text{сорб}}$). Данный показатель определялся согласно стандартной методике [15]. Предварительно взвешенную сетку из медной проволоки с навеской сорбента (5 г) погружали в нефть, выдерживали 15 мин и извлекали, после того как избыток нефти стекал (в течение 30 с), образец взвешивали на прокладке из кальки. Массу нефти, которая осталась в образце,

вычисляли как массу взвешенного образца на сетке минус масса сетки, образца и кальки. Далее нефтеемкость (k , г/г) определяли по формуле

$$k = \frac{m_n}{m_{\text{сорб}}}, \quad (2)$$

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

Все измерения проводились как минимум три раза с целью определения среднего значения и погрешности.

Сорбционные свойства проверялись в динамических условиях: через слой сорбента (5 г) пропускался модельный раствор нефтепродуктов (100 см³) со скоростью 0,1 см³/с. В фильтрате измерялась остаточная концентрация растворенных нефтепродуктов при помощи прибора «Флюорат 02-3М» по стандартной методике ПНД Ф 14.1:2:4.128–98 (изд. 2012 г.). Проводился сравнительный анализ для всех исследуемых образцов без достижения полной сорбционной емкости на низких концентрациях раствора.

Модельные растворы нефтепродуктов готовились с использованием смазочного материала (масло) для воздушных компрессоров Mobil Rarus SHC 1025 производства Франции. Концентрация составляла 13 мг/дм³, что входит в допустимые пределы для значений поверхностных сточных вод (от 1 до 25 мг/дм³) согласно СП 32.13330.2018 «Канализация. Наружные сети и сооружения») и для бытовых сточных вод населенных пунктов (не более 15 мг/дм³).

Результаты исследований и обсуждение

Результаты определения влаго- и нефтеемкости сведены в табл. 2 и 3. В таблицах представлены средние значения по результатам трех параллельных измерений. Погрешность не превышает 10 %. Самой лучшей способностью удерживать воду и сырую нефть обладает мох, исходная влагоемкость которого в 4,2 раза выше, чем у ягеля, в 1,6 раза, чем у торфа и в 2,6 раза, чем у сосновых опилок. Микроволновое облучение незначительно снижает влагоемкость у торфа (на 2,6 %) и мха (6,4 %), немного увеличивает у сосновых опилок (3,7 %) и заметно повышает у ягеля (15,9 %). Исходная нефтеемкость мха выше значения для торфа в 1,8 раза, опилок – в 2,6 раза, ягеля – в 3,5 раза.

Таблица 2

Влагоемкость природных сорбентов

Природный сорбент	Влагоемкость исходная, г/г	Влагоемкость после МВ-обработки, г/г	Изменение, %	Примечание
Торф	9,510 ± 0,031	9,256 ± 0,012	–2,6	Незначительное снижение
Мох	15,343 ± 0,012	14,360 ± 0,030	–6,4	Незначительное снижение
Ягель	3,642 ± 0,022	4,224 ± 0,017	+15,9	Значительное повышение
Сосновые опилки	5,841 ± 0,010	6,056 ± 0,021	+3,7	Незначительное повышение

Таблица 3

Нефтеемкость природных сорбентов

Природный сорбент	Нефтеемкость исходная, г/г	Нефтеемкость после МВ-обработки, г/г	Изменение, %	Примечание
Торф	6,677 ± 0,015	6,409 ± 0,020	-4,0	Незначительное снижение
Мох	11,938 ± 0,022	11,094 ± 0,021	-7,1	Незначительное снижение
Ягель	4,380 ± 0,016	4,428 ± 0,017	+3,4	Незначительное повышение
Сосновые опилки	4,549 ± 0,011	6,436 ± 0,009	+41,5	Значительное повышение

Опираясь на полученные результаты, можно сделать вывод о том, что влагоемкость и нефтеемкость для исследуемых образцов природных материалов – параметры созависимые: чем выше влагоемкость, тем выше поглощение сырой нефти. Микроволновое облучение положительно повлияло на влагоемкость и нефтепоглощение образцов только ягеля и сосновых опилок.

Микроволновое облучение образцов сорбентов растительного происхождения (торфа и мха) снижает их влагоемкость в пределах от 2,6 до 6,4 %. Также отмечается снижение поглощения сырой нефти этими материалами (от 3,4 до 7,1 %). Можно предположить, что это происходит из-за изменения структуры торфа и мха.

Для ягеля, который относится к классу лишайников (состоит из симбиоза грибов и водорослей), обработка МВ повышает влагоемкость на 15 % и незначительно нефтеемкость – на 3,4 %.

Далее определялась сорбционная емкость всех образцов сорбентов по растворенным нефтепродуктам, которая представлена в табл. 4. Все опыты проводились в трех параллелях. В таблицу занесены средние значения. Погрешность измерений не превышала 10 %.

Таблица 4

Эффективность извлечения из воды растворенных нефтепродуктов

Вид сорбента	Исходная концентрация, мг/дм ³	Конечная концентрация, мг/дм ³		Сорбционная емкость, мг/г		Увеличение (+) или снижение (-) эффективности извлечения растворенных нефтепродуктов из воды
		Без обработки	МВ-обработка	Без обработки	МВ-обработка	
Торф	13,0	3,68	3,396	0,186	0,192	+3 %
Ягель	13,0	6,12	6,776	0,105	0,117	+11,4 %
Мох	13,0	5,72	5,71	0,146	0,146	≈ 0 %
Сосновые опилки	13,0	9,27	8,625	0,075	0,088	+17,3 %

В процессе исследований сорбционных свойств выяснилось, что торф обладает самой высокой сорбционной емкостью по отношению к растворенным в воде нефтепродуктам (0,186 мг/г), это значение выше в 2,5 раза сорбционной емкости сосновых опилок, в 1,28–1,35 раза – ягеля и мха. При этом МВ-облучение незначительно улучшает результат. Дополнительно отмечено изменение окраски фильтрата до слабо-желтой, это объясняется выходом в воду гуминовых веществ, содержащихся в торфе. После СВЧ-обработки сорбента окраска фильтрата практически не изменялась.

Ягель и мох также обладают хорошей сорбционной емкостью по отношению к растворенным в воде нефтепродуктам: в 1,84–1,95 раза выше, чем у сосновых опилок. Микроволновая обработка, снижая влагоемкость ягеля, уменьшает и сорбционную емкость по нефтепродуктам. Это заключение подтверждают ранее полученные результаты [16, 17]. Окраска фильтрата не изменяется. Ягель проявляет исследуемые свойства по-иному, чем торф и мох. Это можно объяснить тем, что данный природный материал относится к классу лишайников и имеет отличное от растений строение.

Для изучения влияния параметров микроволновой модификации на сорбционные свойства ягеля были исследованы влагоемкость, нефтепоглощение и сорбционная емкость по отношению к растворенным в воде нефтепродуктам. Результаты приведены на рис. 2, 3.

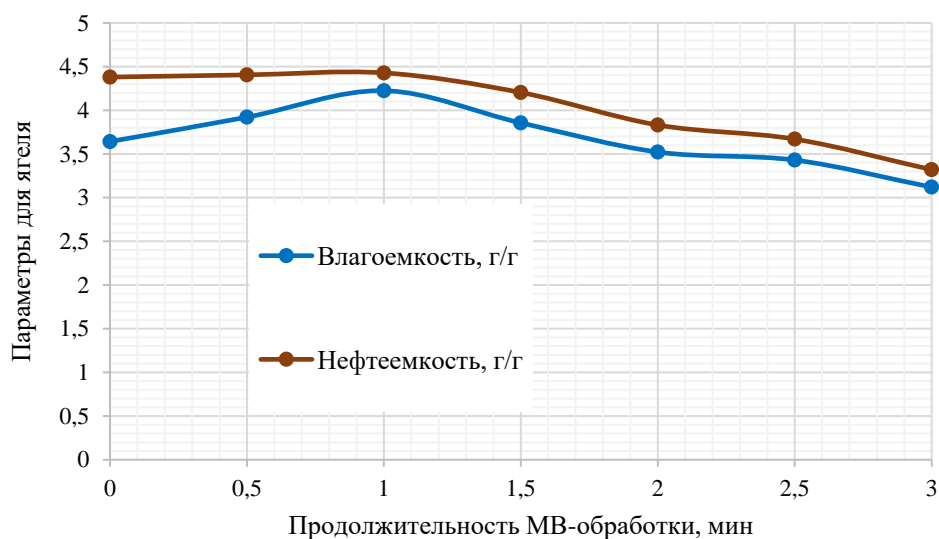


Рис. 2. Зависимость параметров сорбции для ягеля от времени МВ-обработки при постоянной мощности 600 Вт

Отмечено, что при постоянной МВ-мощности в 600 Вт с увеличением времени обработки образцов ягеля наблюдается снижение влагоемкости и нефтеемкости после 1,5 мин облучения. При этом сорбционная емкость растворенных нефтепродуктов также снижается. При максимальном времени,

равном 3 мин, сорбционная емкость падает в 1,2 раза. Чем больше продолжительность МВ-модификации ягеля при постоянной мощности обработки, тем хуже его сорбционные свойства. Увеличение мощности МВ-облучения образцов ягеля от 600 до 800 Вт при постоянном времени, равном 1 мин, также снижает влагоемкость и нефтеемкость в среднем на 25 %, а сорбционную емкость растворенных нефтепродуктов – в 1,3 раза. Результаты по средним значениям при погрешности не более 10 % представлены на рис. 4.

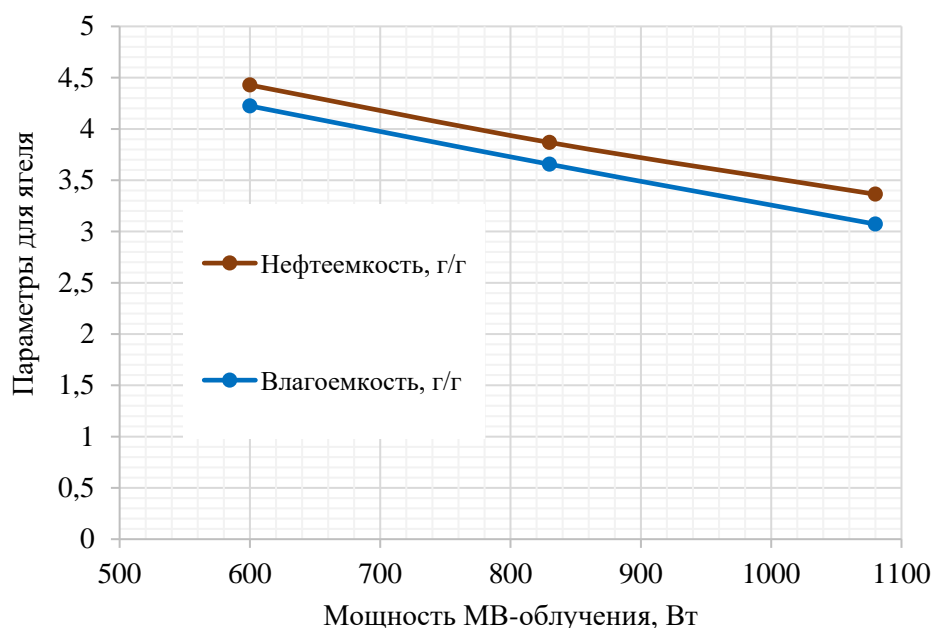


Рис. 3. Зависимость параметров сорбции для ягеля от мощности МВ-обработки при постоянной продолжительности в течение одной минуты

Сосновые опилки показали неплохие сорбционные свойства, которые улучшаются после МВ-облучения образцов: сорбционное поглощение растворенных нефтепродуктов увеличилось на 17,3 %. Это также подтверждается снижением влагоемкости после микроволнового облучения опилок и улучшением сорбционных свойств материала. При этом окраска воды после фильтрования изменилась со светло-желтой на желтую.

На рис. 5 представлены закономерности изменения сорбционной емкости опилок сосновых в зависимости от продолжительности МВ-обработки при постоянной мощности 600 Вт (а) и от мощности МВ-обработки при обработке в течение 1 мин (б). Оптимальные параметры микроволновой обработки, следующие: при значениях мощности 450 и 600 Вт продолжительность облучения сорбента должна быть 1,5 и 1,0 мин соответственно. Это доказывают эксперименты по определению полной динамической сорбционной емкости для опилок, которая повышается на 26 % в условиях малых концентраций нефтепродуктов в воде.

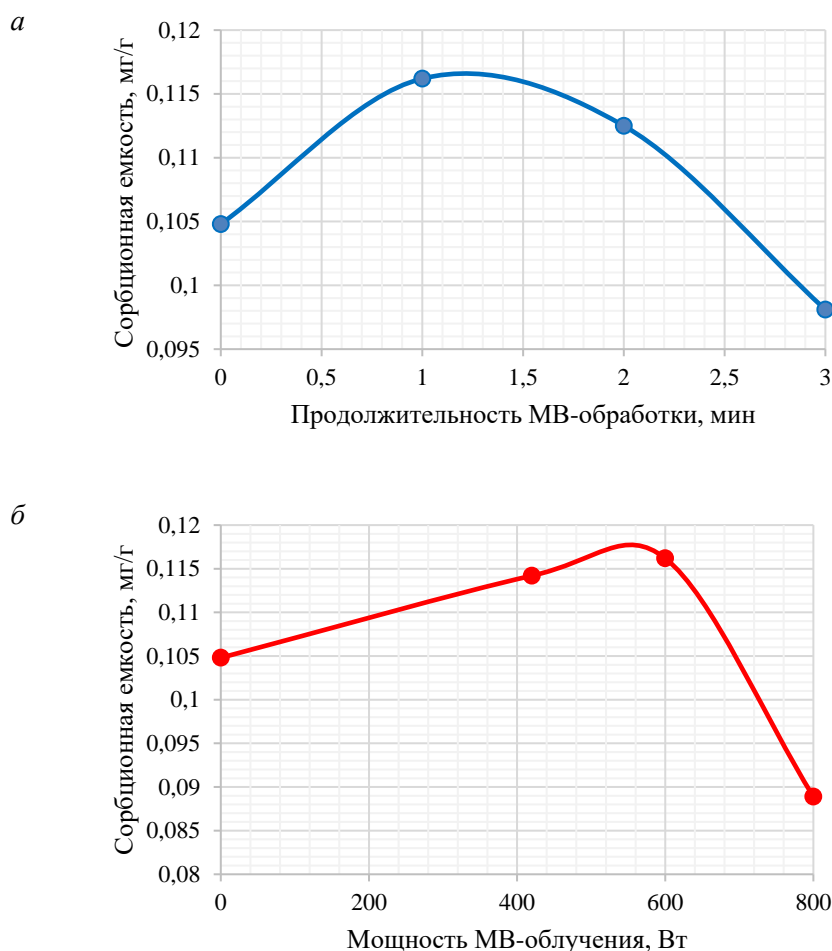


Рис. 4. Изменение сорбционной емкости ягеля в зависимости от продолжительности МВ-обработки при постоянной мощности 600 Вт (*а*); изменение сорбционной емкости ягеля в зависимости от мощности МВ-обработки в течение 1 мин (*б*)

Микроволновое излучение испаряет содержащуюся влагу в структуре древесины: вода нагревается, затем кипит, образуя пар; создаваемое высокое давление приводит к разрыву клеток сердцевидного луча, которые образуют в радиальном направлении проходы, а также размягчение и выход смолы [18, 19]. Это способствует увеличению площади поверхности пор материала, способной участвовать в сорбции растворенных нефтепродуктов. Но высокая мощность микроволнового излучения может привести к разрушению общей структуры древесины и более интенсивному выдавливанию смолы из сердцевидных лучей [18–20]. Это доказывают результаты проведенных экспериментов: в процессе увеличения МВ-мощности до 800 Вт и выше либо повышения времени обработки больше 2 мин происходит снижение сорбционных свойств сосновых опилок по отношению к растворенным нефтепродуктам.

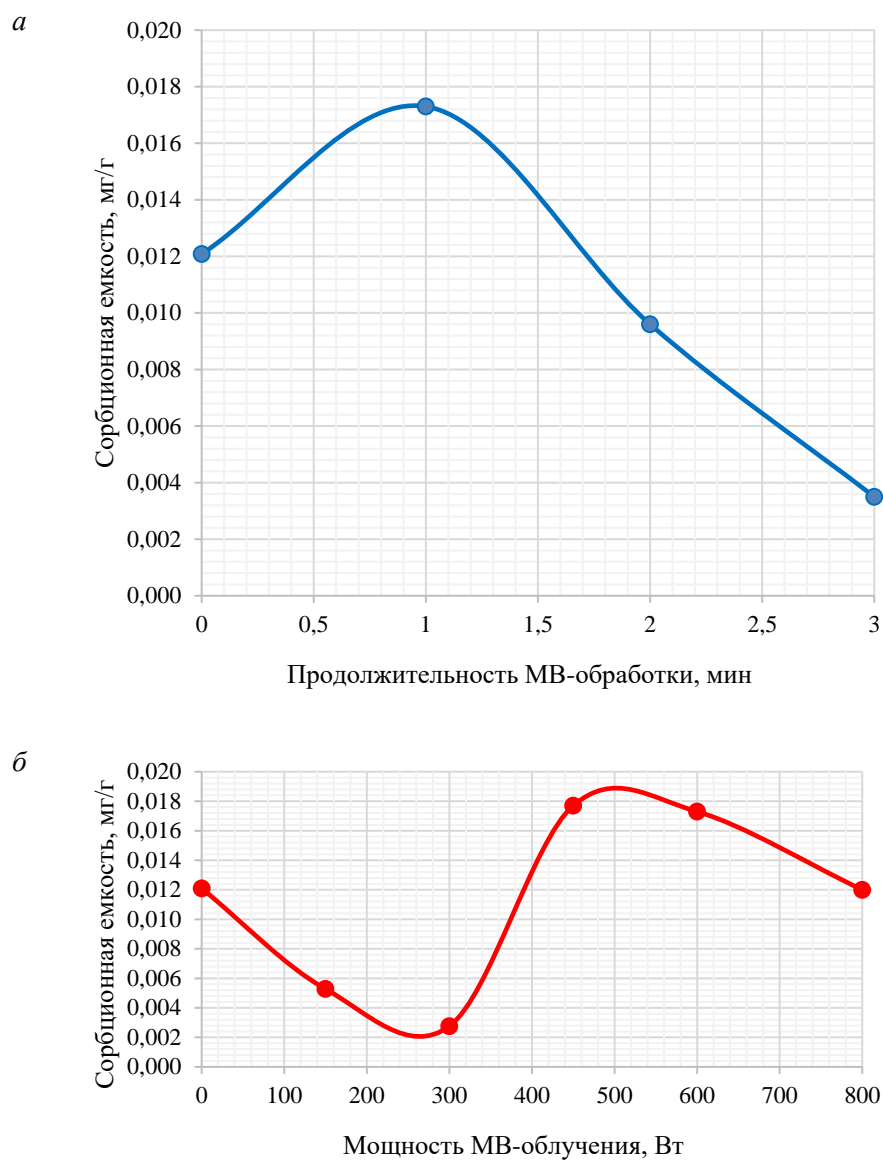


Рис. 5. Изменение сорбционной емкости опилок сосновых в зависимости от продолжительности МВ-обработки при постоянной мощности 600 Вт (*a*); изменение сорбционной емкости опилок сосновых в зависимости от мощности МВ-обработки в течение 1 мин (*б*)

Выводы

Таким образом, исследование способа модификации природных сорбентов (торфа, мха, ягеля и опилок) при помощи микроволнового облучения показало изменение сорбционных свойств в лучшую сторону у ягеля и сосновых опилок. Отмечена прямая зависимость между влагопоглощением и нефтепоглощением

всех образцов. У сосновых опилок нефтеемкость возрастает существенно (на 41 %) после МВ-обработки при мощности 600 Вт в течение 1 мин. Определено оптимальное время (1–1,5 мин) и мощность обработки (450–600 Вт) для достижения наилучших результатов по сорбции растворенных нефтепродуктов из водных растворов в динамических условиях. Увеличение мощности обработки или времени облучения приводит к существенным изменениям в структуре материалов и снижению сорбционного потенциала. Полученные результаты будут использованы при разработке технологической схемы очистки сточных вод, содержащих растворенные и нерастворенные нефтепродукты, с применением природных сорбентов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Taufik S.H., Ahmad S.A., Zakaria N.N., Shaharuddin N.A., Azmi A.A., Khalid F.E., Merican F., Convey P., Zulkharnain A., Abdul Khalil K.* Rice straw as a natural sorbent in a filter system as an approach to bioremediate diesel pollution // *Water*. 2021. 13. 3317. URL: <https://doi.org/10.3390/w13233317>
2. *Voronov A., Malyshkina E., Maksimova S.* Study of meltwater treatment using the industrial waste and natural sorbents // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1079. C. 6, 1079 072021. DOI:10.1088/1757-899X/1079/7/072021
3. *Мальшикина Е.С., Вяжкова Е.И., Осипова Е.Ю.* Использование природных сорбентов в процессе очистки воды от нефтепродуктов // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2019. № 1. С. 188–200. URL: <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2019-21-1-188-200>
4. *Verma P., Samanta S.K.* Microwave-enhanced advanced oxidation processes for the degradation of dyes in water // *Environmental Chemistry Letters*. 2018. 16. P. 969–1007. DOI: 10.1007/s10311-018-0739-2
5. *Бахия Тамуна, Хамизов Р.Х., Бавижев М.Д., Конов М.А.* Влияние СВЧ-обработки клиноптилолита на его ионообменные кинетические свойства // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2016. Т. 16. № 6. С. 803–812.
6. *Yuen F.K., Hameed B.H.* Recent developments in the preparation and regeneration of activated carbons by microwaves // *Advances in Colloid and Interface Science*. 2009. 149. P. 19–27. DOI: 10.1016/j.cis.2008.12.005
7. *Foo K.Y., Hameed B.H.* Microwave-assisted regeneration of activated carbon // *Bioresource Technology*. 2012. 119. P. 234–240. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.05.061
8. *Бердоносков С.С.* Микроволновая химия // *Соросовский образовательный журнал*. 2001. Т. 7. № 1. С. 32–38.
9. *Баннова Е.А., Китаева Н.К., Мерков С.М., Мучкина М.В., Залозная Е.П., Мартынов П.Н.* Изучение способа получения гидрофобного сорбента на основе модифицированного торфа // *Сорбционные и хроматографические процессы*. 2013. Т. 13. Вып. 1. С. 60–68.
10. *Данилов О.С., Михеев В.А., Москаленко Т.В.* Исследование влияния электромагнитного микроволнового излучения на твердые горючие ископаемые // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2011. Т. 13. № 1 (5). С. 1264–1267.
11. *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.
12. *Faizal A.M., Kutty S.R.M., Ezechi E.H.* Removal of oil from water by column adsorption method using microwave incinerated rice husk ash (MIRHA) // *InCIEC*. 2014. P. 963–971. DOI: 10.1007/978-981-287-290-6_84
13. *Ismail A.S.* Preparation and evaluation of fatty-sawdust as a natural biopolymer for oil spill sorption // *Chemistry Journal*. 2015. V. 05. I. 5. P. 80–85.
14. *Vialkova E., Obukhova V., Belova L.* Microwave irradiation in technologies of wastewater and wastewater sludge treatment: a review // *Water*. 2021. 13 (13). 1784. DOI: 10.3390/w13131784

15. Каменщиков Ф.А., Богомольный Е.И. Нефтяные адсорбенты. Москва ; Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2005. 268 с.
16. Cortez J.S.A., Kharisov B.I., Quezada T.E.S., Hernandez T. Micro- and nanoporous materials capable of absorbing solvents and oils reversibly: the state of the art // *Petroleum Science*. 2017. 14 (1). P. 84–104. DOI: 10.1007/s12182-016-0143-0
17. Anuzyte E., Vaisis V. Natural oil sorbents modification methods for hydrophobicity improvement // *Energy Procedia*. 2018. 147. P. 295–300. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.07.095
18. Галкин В.П. Сушка древесины в электромагнитном поле сверхвысоких частот : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук : 05.21.05. Москва : МГУЛ, 2010. 40 с.
19. Torgovnikov G., Vinden P. High-intensity microwave wood modification for increasing permeability // *Forest Products Journal*. 2009. V. 60. № 2. P. 1–12.
20. Торговников Г., Винден П. Способ микроволновой обработки древесины. Патент RU2285875C2, 2006.

REFERENCES

1. Taufik S.H., Ahmad S.A., Zakaria N.N., Shaharuddin N.A., Azmi A.A., Khalid F.E., Merican F., Convey P., Zulkharnain A., Abdul Khalil K. Rice straw as a natural sorbent in a filter system as an approach to bioremediate diesel pollution. *Water*. 2021. V. 13. 3317. DOI: 10.3390/w13233317
2. Voronov A., Malyshkina E., Maksimova S. Study of meltwater treatment using the industrial waste and natural sorbents. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. V. 1079. P. 6, 1079 072021. DOI: 10.1088/1757-899X/1079/7/072021
3. Malyshkina E.S., Vyalkova E.I., Osipova E.Yu. Ispol'zovanie prirodnykh sorbentov v protsesse ochistki vody ot nefteproduktov [Water purification with natural sorbents]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture*. 2019. V. 21. No. 1. Pp. 188–200. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-1-188-200 (rus)
4. Verma P., Samanta S.K. Microwave-enhanced advanced oxidation processes for the degradation of dyes in water. *Environmental Chemistry Letters*. 2018. V. 16. Pp. 969–1007. DOI: 10.1007/s10311-018-0739-2
5. Bakhiya Tamuna, Khamizov R.Kh., Bavizhev M.D., Konov M.A. Vliyanie SVCh-obrabotki klinoptilolita na ego ionoobmennye kineticheskie svoistva [Clinoptilolite microwave treatment effect on ion-exchange kinetic properties]. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2016. V. 16. No. 6. Pp. 803–812. (rus)
6. Yuen F.K., Hameed B.H. Recent developments in the preparation and regeneration of activated carbons by microwaves. *Advances in Colloid and Interface Science*. 2009. V. 149. Pp. 19–27. DOI: 10.1016/j.cis.2008.12.005
7. Foo K.Y., Hameed B.H. Microwave-assisted regeneration of activated carbon. *Bioresour Technol*. 2012. V. 119. Pp. 234–240. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.05.061
8. Berdonosov S.S. Mikrovolnovaya khimiya [Microwave chemistry]. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal*. 2001. V. 7. No. 1. Pp. 32–38. (rus)
9. Bannova E.A., Kitaeva N.K., Merkov S.M., Muchkina M.V., Zaloznaya E.P., Martynov P.N. Izuchenie sposoba polucheniya gidrofobnogo sorbenta na osnove modifitsirovannogo torfa [Production technique of hydrophobic sorbent based on modified peat]. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2013. V. 13. No. 1. Pp. 60–68. (rus)
10. Danilov O.S., Mikheev V.A., Moskalenko T.V. Issledovanie vliyaniya elektromagnitnogo mikrovolnovogo izlucheniya na tverdye goryuchie iskopaemye [Electromagnetic microwave effect on solid fuels]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2011. V. 13. No. 1 (5). Pp. 1264–1267. (rus)
11. Bel'chinskaya L.I., Khodosova N.A., Novikova L.A. Vliyanie razlichnykh mekhanizmov nagreva sloistogo alyumosilikata na sorbtsionnye protsessy. Soobshchenie 1. Sorbtsiya vody pri teplovom i elektromagnitnom (SVCh) nagreve montmorillonita [Effect of different heating mechanisms of layered aluminosilicate on sorption processes. Message 1. Water sorption under thermal and electromagnetic (microwave) heating of montmorillonite]. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy*. 2017. V. 17. No. 5. Pp. 781–791. (rus)

12. *Faizal A.M., Kutty S.R.M., Ezechi E.H.* Removal of oil from water by column adsorption method using microwave incinerated rice husk ash (MIRHA). *InCIEC*. 2014. Pp. 963–971. DOI: 10.1007/978-981-287-290-6_84
13. *Ismail A.S.* Preparation and evaluation of fatty-sawdust as a natural biopolymer for oil spill sorption. *Chemistry Journal*. 2015. V. 05. No. 5. Pp. 80–85.
14. *Vialkova E., Obukhova V., Belova L.* Microwave irradiation in technologies of wastewater and wastewater sludge treatment: a review. *Water*. 2021. V. 13 (13). 1784. DOI: 10.3390/w13131784
15. *Kamenshchikov F.A., Bogomol'nyi E.I.* Neftyanye adsorbenty [Oil adsorbents]. Moscow, Izhevsk: Regul'yarnaya i khaoticheskaya dinamika, 2005. 268 p. (rus)
16. *Cortez J.S.A., Kharisov B.I., Quezada T.E.S., Hernandez T.* Micro- and nanoporous materials capable of absorbing solvents and oils reversibly: The state of the art. *Petroleum Science*. 2017. V. 14 (1). Pp. 84–104. DOI: 10.1007/s12182-016-0143-0
17. *Anuzyte E., Vaisis V.* Natural oil sorbents modification methods for hydrophobicity improvement. *Energy Procedia*. 2018. V. 147. Pp. 295–300. DOI: 10.1016/j.egypro.2018.07.095
18. *Galkin V.P.* Sushka drevesiny v elektromagnitnom pole sverkhvysokikh chastot: avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchenoi stepeni doktora tekhnicheskikh nauk [Drying wood in ultra-high frequency electromagnetic field. DSc Abstract]. Moscow, 2010. 40 p. (rus)
19. *Torgovnikov G., Vinden P.* High-intensity microwave wood modification for increasing permeability. *Forest Products Journal*. 2009. V. 60. No. 2. Pp. 1–12.
20. *Torgovnikov G., Vinden P.* Sposob mikrovolnovoi obrabotki drevesiny [Method for wood microwave treatment]. Patent Russ. Fed. N 2285875C2, 2006.

Сведения об авторах

Коршикова Елена Сергеевна, аспирант, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, lena-malysh-90@yandex.ru

Фугаева Анастасия Михайловна, аспирант, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, nastyafugaeva@mail.ru

Вялкова Елена Игоревна, канд. техн. наук, доцент, Тюменский индустриальный университет, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38, vyalkova-e@yandex.ru

Осипова Елена Юрьевна, канд. техн. наук, доцент, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, kyky60@bk.ru

Authors Details

Elena S. Korshikova, Research Assistant, Tyumen Industrial University, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, lena-malysh-90@yandex.ru

Anastasiya M. Fugaeva, Research Assistant, Tyumen Industrial University, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, nastyafugaeva@mail.ru

Elena I. Vyalkova, PhD, A/Professor, Tyumen Industrial University, 38, Volodarskii Str., 625000, Tyumen, Russia, vyalkova-e@yandex.ru

Elena Yu. Osipova, PhD, A/Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, kyky60@bk.ru