



УДК 628.316.12

М. Н. БРЮХОВ, ассистент кафедры водопользования и экологии

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО СОРБЕНТА ПРИ ОЧИСТКЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД

ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Россия, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Эл. почта: mbryukhov@lan.spbgasu.ru

Ключевые слова: сточные воды, сорбция, многокомпонентный сорбент, тяжелые металлы, фитосорбционная композиция.

В статье представлены результаты исследований по эффективности очистки производственных сточных вод разработанным автором многокомпонентным сорбентом. Как в статических, так и в динамических условиях наблюдаются высокие показатели очистки стоков от тяжелых металлов и нефтепродуктов. Предполагается использование многокомпонентного сорбента, в том числе и в фитосорбционной композиции, совместно с макрофитами.

Введение

Современное развитие промышленности сопровождается увеличением объема сточных вод, загрязненных сложными смесями поллютантов, среди которых особую опасность представляют ионы тяжелых металлов и нефтепродукты. Тяжелые металлы (свинец, кадмий, медь, хром и др.) обладают высокой токсичностью, не подвергаются биodeградации и способны накапливаться в организмах живых существ, создавая долгосрочную угрозу для экосистем и здоровья человека [1, 2]. Нефтепродукты, в свою очередь, образуют на поверхности воды устойчивые пленки и эмульсии, препятствуя газообмену и угнетая водные биоценозы [3]. Комплексное присутствие этих загрязнителей, различающихся по своей химической природе и физико-химическим свойствам, значительно усложняет их одновременное эффективное удаление традиционными методами очистки.

Среди существующих технологий очистки сточных вод сорбционный метод выделяется высокой степенью очистки, экономической эффективностью и возможностью многократного использования сорбционных материалов [4]. В последние годы все большее внимание исследователей привлекает разработка многокомпонентных и композиционных сорбентов, способных к одновременной адсорбции как ионов металлов, так и органических соединений. Перспективным направлением является использование в качестве сырья для таких сорбентов природных материалов и отходов различных производств. Это позволяет не только снизить стоимость готового продукта, но и решить важную экологическую задачу утилизации промышленных отходов [5].

В мировой практике накоплен значительный опыт применения природных сорбентов для извлечения загрязнителей из водных сред. Исследования показывают, что комбинирование различных компонентов, например, углеродсодержащей и минеральной составляющей, позволяет получить сорбент с



развитой пористой структурой, содержащей как микропоры для улавливания ионов металлов, так и мезо- и макропоры для сорбции объемных молекул нефтепродуктов.

Особый интерес представляют композиционные материалы на основе промышленных отходов. Так, показана эффективность сорбентов, полученных из отходов алюминиевой промышленности и анодно-графитовых материалов, для очистки сточных вод от тяжелых металлов [5]. Разработаны магнитные композиционные сорбенты на основе отходов деревообработки, обеспечивающие степень очистки от ионов тяжелых металлов и нефтепродуктов на уровне 79–99,6% [6].

Таким образом, разработка эффективных многокомпонентных сорбентов на основе доступных природных материалов и отходов производств, способных к комплексной очистке сточных вод от тяжелых металлов и нефтепродуктов, является актуальной научно-технической задачей, имеющей важное экологическое и экономическое значение.

Материалы и методы

В настоящей статье представлены исследования эффективности очистки сточных вод предприятия трубной промышленности многокомпонентным сорбентом, состоящим из отходов прокатного производства, торфа верхового, вспученного перлита, глауконита и флюса электросварочного цеха.

Температуру системы при исследовании в статических условиях изменяли от -5 до 20 °С. Время экспозиции составляло до 8 суток. В динамическом режиме исследовали фильтрацию сточных вод на лабораторной установке. Расход фильтрата варьировали от 0,3 до 6,36 л/час.

Сорбатом были кислые сточные воды предприятия трубной промышленности следующего состава, мг/л: Al – 9,49; Co – 0,3; Cr – 3,19; Cu – 3,63; Fe – 114,09; Mn – 2,43; Ni – 0,91; P – 1,26; Pb – 0,34; Zn – 1,39, нефтепродукты – 12,62, *pH* стока равен 2,8.

При проведении анализа состава сточной воды и фильтрата использовали атомно-эмиссионный спектрометр с индуктивно-связанной плазмой *OPTIMA 2100DV “Perkin Elmer”*, США. В качестве фоновой жидкости использовали воду особой степени очистки, полученную на приборе “*Simplicity UV*” (Франция). Измерение водородного показателя проводили на *pH*-метре 150МИ.

Результаты исследований

Исследования позволили оценить степень сорбции тяжелых металлов и нефтепродуктов из сильноокислых сточных вод разработанным многокомпонентным сорбентом в статических и динамических условиях.

Результаты исследований, представленные на рис. 1, указывают на достаточно высокую эффективность очистки стока вне зависимости от температурного режима среды.

При температуре среды -5 °С эффективность сорбции после трех часов экспозиции: от 52,6 (P) до 100 % (Co, Cr, Pb), после 6 часов: от 75,7 (P) %. Эффективность очистки при температуре 10 °С в интервале 3–6 часов в среднем варьировалась от 88,4 до 94,0 %, а при температуре 20 °С: от 87,2 до 91,0 %. Следует отметить, что для таких элементов, как Mn, P, увеличение температуры среды до 20 °С не влечет за собой положительной динамики в эффективности

очистки. В процессе очистки стока происходит изменение величины pH раствора. Так, например, при температуре $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ pH стока увеличивался от 2,8 до 5,6; при температуре $10\text{ }^{\circ}\text{C}$: до 6,1, при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$: до 5,8.

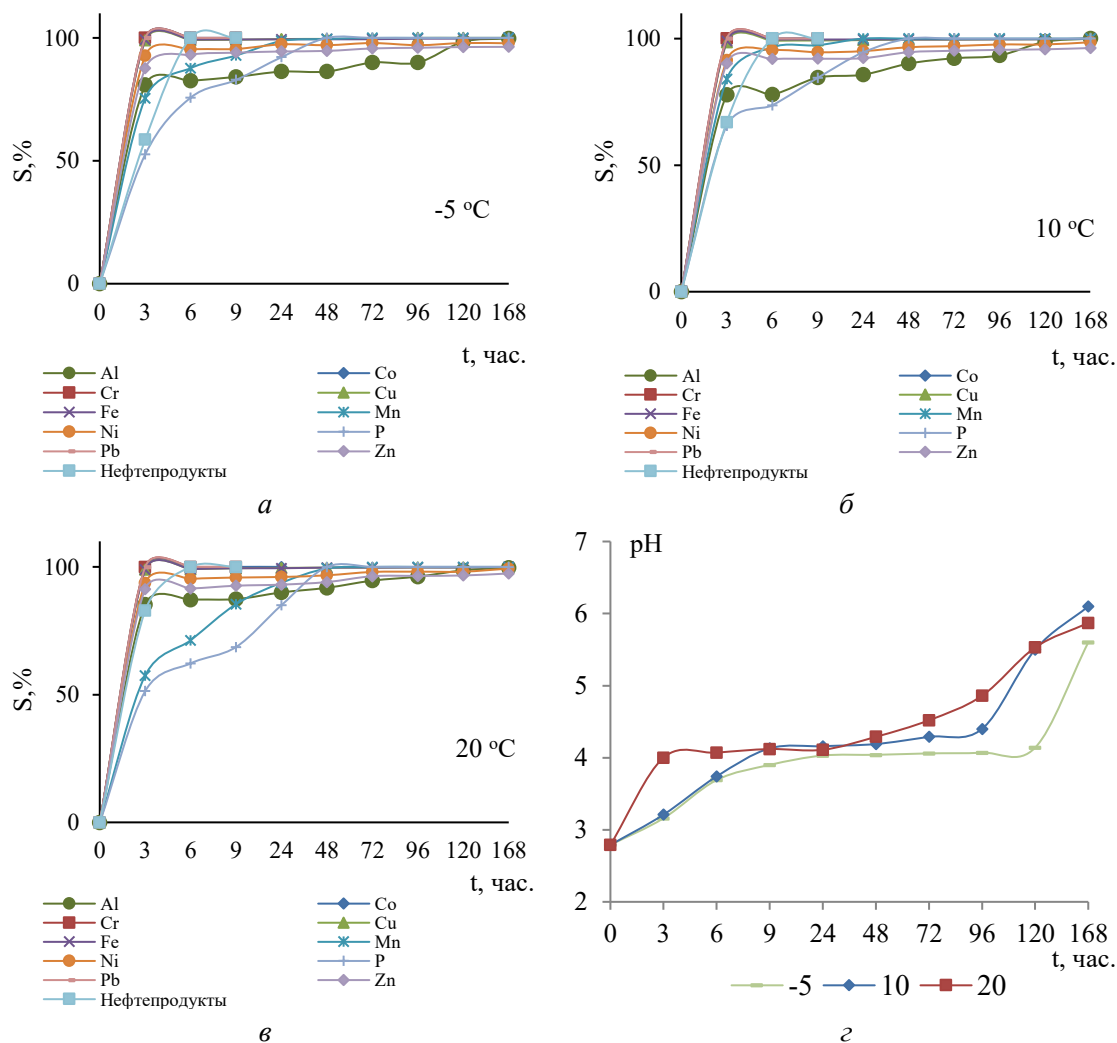


Рис. 1. Эффективность сорбции поллютантов многокомпонентным сорбентом:
 a – $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$; b – $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, v – $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, g – pH

Величина статической обменной емкости указывает на отсутствие избирательной адсорбции отдельных катионов. С увеличением температуры СОЕ возрастает. Энергия активации при увеличении температуры возрастает от 28,17 (268,15 К) до 30,8 (293,15 К) кДж/моль, характеризую внутридиффузионную лимитирующую область протекания реакции.

Исследования многокомпонентного сорбента в динамических условиях (рис. 2) показали его высокую эффективность по сравнению с однородными природными сорбентами и отходами производства, указанными в [7].

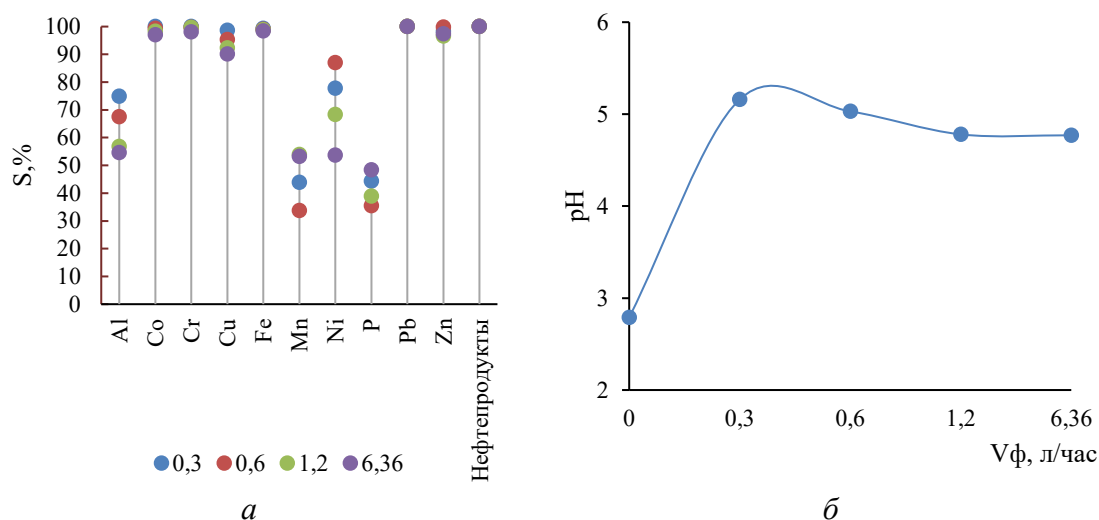


Рис. 2. Эффективность извлечения поллютантов из сточной воды (а) и изменение pH (б)

Эффективность очистки зависит от скорости фильтрации. Чем ниже скорость фильтрации, тем выше степень очистки стока. Так, например, при скорости фильтрации 0,3 л/час средняя эффективность очистки всех поллютантов составила 85,2 %; 0,6 л/час – 83,3 %; 1,2 л/час – 82,2 % и при 6,4 – 81,0 %, pH раствора увеличился с 2,8 до 5,2 (0,3 л/час).

Результаты проведенных исследований показали высокую эффективность очистки кислого стока многокомпонентным сорбентом при одновременной нейтрализации стока, что создает условия для использования при доочистке стока биотехнологий.

Для качественной и энергоэффективной очистки производственных сточных вод предлагается использовать разработанный многокомпонентный сорбент в биоинженерных сооружениях совместно с макрофитами, эффективность которых рассмотрена в [8].

Предложенная автором конструкция биоинженерного сооружения предполагает 2 ступени (рис. 3): первая ступень для более глубокой круглогодичной очистки сточных вод, вторая – для доочистки. Первая ступень предполагает фитосорбционную композицию из многокомпонентного сорбента и макрофитов.

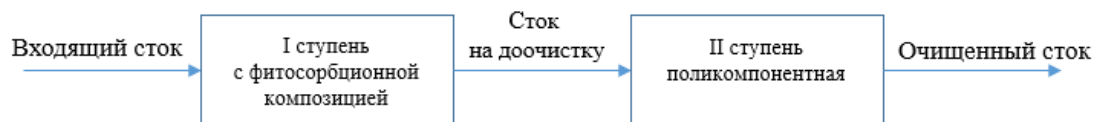


Рис. 3. Укрупненная схема фитофильтра

Круглогодичная очистка стоков в первой ступени возможна благодаря конструкции сооружения, в которой предполагается навес из карбоната с воздухопропускными окнами и диффузорами для поддержания оптимальной температуры окружающей среды круглый год. После основной очистки сток



перемещается на вторую ступень очистки с макрофитами для последующего сброса в водный объект или использования в оборотном цикле предприятия.

Термин «Фитосорбционная композиция» предложен автором как элемент системы очистки сточных вод с одновременным применением методов фитофильтрации и сорбции.

Выводы

1. Установлено, что разработанный многокомпонентный сорбент благодаря своим свойствам эмерджентности может эффективно использоваться в технологиях очистки сильноокислых производственных сточных вод, содержащих тяжелые металлы и нефтепродукты.

2. Степень сорбции тяжелых металлов может достигать достаточно высоких значений 81–85,2 %. При этом происходит нейтрализация стока без применения дополнительных реагентов, *pH* увеличивается с 2,8 до 6,1.

3. Степень извлечения нефтепродуктов из производственных стоков достигает 100 %.

4. Полученные данные показывают возможность использования многокомпонентного сорбента в технологиях очистки производственных сточных вод как в виде отдельной загрузки, так и в фитосорбционной композиции совместно с макрофитами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теплая, Г. А. Тяжелые металлы как фактор загрязнения окружающей среды (обзор литературы) / Г. А. Теплая // Астраханский вестник экологического образования. 2013. – № 1 (23). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tyazhelye-metally-kak-faktor-zagryazneniya-okruzhayuschey-sredy-obzor-literatury>.

2. Тяжелые металлы в водных экосистемах как индикатор антропогенного воздействия / С. Р. Гаджиева, У. Н. Рустамова, Т. И. Алиева, Эльнур Абдурахман оглу Йолчулу. // Молодой ученый. – 2019. – № 9 (247). – С. 115–118. – URL: <https://moluch.ru/archive/247/56316>.

3. Мерзликин, В. Г. Оценка влияния нефтяных загрязнений на водно-тепловой режим атлантического течения Гольфстрим / В. Г. Мерзликин // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Естественные науки. – 2011. – № 1. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vliyaniya-neftyanyh-zagryazneniy-na-vodno-teplovoy-rezhim-atlanticheskogo-techeniya-golfstrim>.

4. Complex sorbent for treatment of industrial wastewater and oil-contaminated soils / N. N. Gibadullina, A. S. Guba, G. G. Gilayev, A. G. Badamshin, A. I. Voloshin, R. V. Kunakova, V. A. Dokichev // Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. – 2025. – No. 3. – P. 169–182. – DOI: 10.17122/ntj-oil-2025-3-169-182.

5. Разработка технологии получения сорбентов из отходов производства / Д. О. Игнаткина, Ю. Ю. Юрьев, М. Ю. Белгородская, С. С. Захаров, К. А. Полицимако, В. В. Изотов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2024. – Вып. 4 (97). – С. 199–205. DOI: 10.35211/18154360_2024_4_199.

6. Композиционный сорбент с магнитными свойствами на основе отходов роторного шлака и древесных волокон / А. А. Исмаилов, А. М. Маматов, И. Рузметов, Ш. П. Нуруллаев, З. С. Алихонова, Д. Б. Саидмирзаева // Universum: технические науки. –



2024. – № 3 (120). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompozitsionnyy-sorbent-s-magnitnymi-svoystvami-na-osnove-otodov-rotornogo-shlaka-i-drevesnyh-volokon>.

7. Брюхов, М. Н. Роль природных сорбентов и отходов трубного производства в очистке кислых металлосодержащих сточных вод / М. Н. Брюхов, Д. В. Ульрих, Т. М. Лонзингер, С. Е. Денисов // Градостроительство и архитектура. – 2023. – Т. 13, № 4. – С. 11–19. – DOI: 10.17673/Vestnik.2023.04.02.

8. Брюхов, М. Н. Эффективность биоаккумуляции при очистке сточных вод / М. Н. Брюхов // Приволжский научный журнал / Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет. – 2025. – № 1. – С. 146–152.

BRYUKHOV Mikhail Nikolaevich, assistant of the chair of water management and environment

EFFECTIVENESS OF USING A MULTICOMPONENT SORBENT IN INDUSTRIAL WASTEWATER TREATMENT

St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering.

4, 2nd Krasnoarmeyskaya St., St. Petersburg, 190005, Russia.

E-mail: mbryukhov@lan.spbgasu.ru

Key words: wastewater, sorption, multicomponent sorbent, heavy metals, phytosorption composition.

The article presents the results of studies on the effectiveness of treating industrial wastewater using a multicomponent sorbent developed by the author. High purification rates of wastewater from heavy metals and petroleum products are observed under both static and dynamic conditions. The application of the multicomponent sorbent is proposed, including its integration into phytosorption composites in combination with macrophytes.

REFERENCES

1. Teplaya G. A. Tyazhelye metally kak faktor zagryazneniya okruzhayushchey sredy (obzor literatury) [Heavy metals as a factor of environmental pollution (literature review)]. Astrakhanskiy vestnik ekologicheskogo obrazovaniya [Astrakhan Bulletin of Environmental Education]. 2013, № 1 (23). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tyazhelye-metally-kak-faktor-zagryazneniya-okruzhayushchey-sredy-obzor-literatury>.

2. Gadzhieva S. R., Rustamova U. N., Alieva T. I., Elnur Abdurakhman oglu Yolchulu. Tyazhelye metally v vodnykh ekosistemakh kak indikator antropogennogo vozdeystviya [Heavy metals in aquatic ecosystems as an indicator of anthropogenic impact]. Molodoy ucheny [Young Scientist]. 2019, № 9 (247), P. 115–118. URL: <https://moluch.ru/archive/247/56316>.

3. Merzlikin V. G. Otsenka vliyaniya neftyanykh zagryazneniy na vodno-teplovoy rezhim atlanticheskogo techeniya Golfstrim [Assessment of the impact of oil pollution on the water-thermal regime of the Atlantic Gulf Stream current]. Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. Estestvennye nauki [Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Natural Sciences]. 2011, № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-vliyaniya-neftyanykh-zagryazneniy-na-vodno-teplovoy-rezhim-atlanticheskogo-techeniya-golfstrim>.

4. Gibadullina N. N., Guba A. S., Gilaev G. G., Badamshin A. G., Voloshin A. I., Kunakova R. V., Dokichev V. A. Complex sorbent for treatment of industrial wastewater and oil-contaminated soils. Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2025, No. 3, P. 169–182. DOI: 10.17122/ntj-oil-2025-3-169-182.



5. Ignatkina D. O., Yurev Yu. Yu., Belogorodskaya M. Yu., Zakharov S. S., Politsimako K. A., Izotov V. V. Razrabotka tekhnologii polucheniya sorbentov iz otkhodov proizvodstva [Development of technology for producing sorbents from production waste]. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture]. 2024, Issue 4 (97), P. 199–205. DOI: 10.35211/18154360_2024_4_199.

6. Ismailov A. A., Mamatov A. M., Ruzmetov I., Nurullaev Sh. P., Alikhonova Z. S., Saidmirzaeva D. B. Kompozitsionny sorbent s magnitnymi svoystvami na osnove otkhodov rotnogo shlaka i drevesnykh volokon [Composite sorbent with magnetic properties based on rotary slag and wood fiber waste]. Universum: tekhnicheskie nauki [Universum: Technical Sciences]. 2024, № 3 (120). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kompozitsionnyy-sorbent-s-magnitnymi-svoystvami-na-osnove-otkhodov-rotnogo-shlaka-i-drevesnykh-volokon>.

7. Bryukhov M. N., Ulrikh D. V., Lonzinger T. M., Denisov S. E. Rol prirodnykh sorbentov i otkhodov trubnogo proizvodstva v ochistke kislykh metalloderzhashchikh stochnykh vod [The role of natural sorbents and piping production waste in the treatment of acid metal-containing wastewater]. Gradostroitel'stvo i arkhitektura [Urban Construction and Architecture]. 2023, Vol. 13, № 4, P. 11–19. DOI: 10.17673/Vestnik.2023.04.02.

8. Bryukhov M. N. Effektivnost bioakkumulyatsii pri ochistke stochnykh vod [Efficiency of bioaccumulation in wastewater treatment]. Privolzhskiy nauchny zhurnal [The Privolzhsky Scientific Journal]. Nizhegorodskiy gosudarstvenny arkhitekturno-stroitel'ny universitet. 2025, № 1, P. 146–152.

© М. Н. Брюхов, 2026

Получено: 23.08.2026 г.