

DOI: 10.22363/2313-2310-2022-30-4-498-510

УДК 574.6

Научная статья / Research article

Разработка и обоснование новых технологий очистки водных сред от загрязнений тяжелыми металлами

А.С. Глубокая , О.В. Атаманова ✉, Е.И. Тихомирова ,
А.А. Подоксенов , З.А. Симонова 

*Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
г. Саратов, Российская Федерация*
✉ O_V_Atamanova@mail.ru

Аннотация. Актуальным направлением в прикладной экологии являются разработка и внедрение инновационных технологий защиты окружающей среды и минимизации воздействия промышленных предприятий. Современные методы извлечения ионов тяжелых металлов из производственных сточных вод достаточно разнообразны, однако загрязнение тяжелыми металлами природных водных объектов достаточно интенсивное до настоящего времени. Цель исследования заключалась в разработке и обосновании новых технологий очистки водных сред, включая адсорбционную очистку от ионов тяжелых металлов (на примере ионов Ni^{2+} и Cd^{2+}). Лабораторными исследованиями установлена эффективность адсорбционного извлечения из модельных растворов ионов Ni^{2+} и Cd^{2+} сорбционным материалом на основе бентонита, модифицированного углеродными нанотрубками при температурной обработке 550 °С. Благодаря активации сорбционного материала 18 % раствором HCl и 38 % раствором $CaCl_2$ степень адсорбционного извлечения ионов Ni^{2+} возрастает на 13–14%, а ионов Cd^{2+} – на 16–17 %. Предложена технологическая схема станции водоочистки, в составе которой используются высокоэффективные адсорбционные фильтры с сорбционным материалом из бентонита указанной модификации и кислотно-солевой активации.

Ключевые слова: сточные воды, водная среда, очистка, тяжелые металлы, ионы кадмия, ионы никеля, адсорбция, сорбент, бентонит

Благодарности и финансирование. Авторы выражают благодарность руководству ООО НПП «ЛИССКОН» за помощь в изготовлении сорбционных материалов и консультировании отдельных практических вопросов. Финансовая поддержка оказана Фондом содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере «У.М.Н.И.К.–2020» в рамках проекта «Разработка технологического комплекса для очистки производственных сточных вод текстильного предприятия».

© Глубокая А.С., Атаманова О.В., Тихомирова Е.И., Подоксенов А.А., Симонова З.А., 2022



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

Вклад авторов: аспиранты *А.С. Глубокая* и *А.А. Подоксенев* выполняли лабораторные эксперименты по определению характеристик адсорбции ионов Ni^{2+} и Cd^{2+} сорбционными материалами на основе бентонита; *З.А. Симонова* проводила статистическую обработку результатов исследований; *О.В. Атаманова* руководила проведением лабораторных экспериментов и обработкой полученных результатов, а также выполняла написание основной части статьи; *Е.И. Тихомирова* обобщала результаты исследований, выполняла написание заключительной части статьи и ее общую научную редакцию.

История статьи: поступила в редакцию 15.07.2022; доработана после рецензирования 26.08.2022; принята к публикации 12.10.2022.

Для цитирования: *Глубокая А.С., Атаманова О.В., Тихомирова Е.И., Подоксенев А.А., Симонова З.А.* Разработка и обоснование новых технологий очистки водных сред от загрязнений тяжелыми металлами // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. 2022. Т. 30. № 4. С. 498–510. <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-4-498-510>

Development and justification of new technologies purification of water environments from pollution by heavy metals

Aleksandra S. Glubokaya , **Olga V. Atamanova** ✉,
Elena I. Tikhomirova , **Artem A. Podoksenov** , **Zoya A. Simonova** 

Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Saratov, Russian Federation

✉ O_V_Atamanova@mail.ru

Abstract. An actual trend in applied ecology is the development and implementation of innovative environmental protection technologies. Modern methods for extracting heavy metal ions from industrial wastewater are quite diverse. The purpose of the study was to develop and justify new technologies for purification of aqueous media, including adsorption purification, from heavy metal ions (by the example of Ni^{2+} and Cd^{2+} ions). Laboratory studies have established that the degree of adsorption extraction of Ni^{2+} ions by the sorption material from bentonite modified with carbon nanotubes and fired at a temperature of 550 °C increases by 13–14% due to its activation with 18% HCl solution and 38% CaCl_2 solution, and the degree of adsorption extraction of Cd^{2+} ions with this activation of the sorbent, it increases by 16–17%. A technological scheme of a water purification station is proposed, which includes highly efficient adsorption filters with sorption material from bentonite of the specified modification and acid-salt activation.

Keywords: wastewater, aquatic environment, purification, heavy metals, cadmium ions, nickel ions, adsorption, sorbent, bentonite

Acknowledgements and Funding. The authors express their gratitude to the management of the Research and Production Enterprise “LISSCON” for their help in the manufacture of sorption materials and advice on certain practical issues. Financial support was provided by the U.M.N.I.K.–2020 Foundation for Assistance to the Development of Small Forms of Enterprises in the Scientific and Technical Sphere within the framework of the project “Development of a technological complex for the treatment of industrial wastewater of a textile enterprise”.

Authors’ contributions: Graduate students *A.S. Glubokaya* and *A.A. Podoksenov* performed laboratory experiments to determine the characteristics of the adsorption of Ni^{2+} and

Cd^{2+} ions by sorption materials based on bentonite; *Z.A. Simonova* performed statistical processing of research results; *O.V. Atamanova* supervised the laboratory experiments and the processing of the results, and also wrote the main part of the article; *E.I. Tikhomirova* summarized the research results, wrote the final part of the article and its general scientific editorial.

Article history: received 15.07.2022; revised 26.08.2022; accepted 12.10.2022.

For citation: Glubokaya AS, Atamanova OV, Tikhomirova EI, Podoksenov AA, Simonova ZA. Development and justification of new technologies purification of water environments from pollution by heavy metals. *RUDN Journal of Ecology and Life Safety*. 2022;30(4):498–510. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/2313-2310-2022-30-4-498-510>

Введение

Интенсивное развитие современных видов производств во всем мире способствует образованию значительных количеств сточных вод, загрязненных разными поллютантами, включая соединения тяжелых металлов. Проблема очистки производственных сточных вод приобретает особую актуальность ввиду поступления в природные водоемы недостаточно очищенных стоков, приводящего порой к необратимому загрязнению природных водных объектов. Особо опасными являются сточные воды гальванического и электрохимического производства. Их кислотно-щелочные стоки представляют собой на 80–90 % смесь промывных вод, получаемую после химического и электрохимического травления, обезжиривания металлических покрытий. Даже при достаточно качественной очистке таких сточных вод в природные водоемы поступает до 500 тыс. разных загрязняющих веществ [1]. Ионы тяжелых металлов, загрязняющие при этом природную водную среду, являются особо опасными по отношению ко всем экологическим системам. Поступая в водоемы, они способны накапливаться в водной флоре и фауне, а также в донных отложениях, оказывая токсическое воздействие на гидробионты.

Целый ряд производств (химическое и электрохимическое, гальваническое, фармацевтическое и др.) часто являются «поставщиками» избыточных количеств ионов Ni^{2+} и Cd^{2+} в природные водоемы. Далеко не всегда люди осведомлены о наличии этих ионов в воде природных водных объектов. Никель, как и кадмий, входят в приоритетную группу металлов-токсикантов, наиболее опасных для здоровья человека и животных. Токсичность никеля связана с попаданием в организм с водой, главным образом, его свободных ионов, которые обеспечивают прочные связи с тканями организма, проявляя значительно большую токсичность и канцерогенность, чем молекулярные и комплексные соединения никеля. Кадмий оказывает канцерогенное (группа 2A) и выраженное мутагенное воздействие на живой организм. Известно, что ионы Cd^{2+} обладают также тератогенным действием, вызывая возникновение морфологических аномалий и пороков развития у рождающихся детей. В целом же ионы Ni^{2+} и Cd^{2+} в значительной степени тормозят процессы самоочищения природных водных объектов, в которых имеется их избыточное присутствие [1].

Современные методы извлечения ионов тяжелых металлов из производственных сточных вод достаточно разнообразны. Наиболее широко известны для очистки воды методы реализации ионообменных технологий. Одним из наиболее востребованных в системе очистки сточных вод является метод адсорбционного извлечения из водных сред ионов тяжелых металлов [2]. Существует достаточное количество разновидностей сорбционных материалов, наиболее распространенным из которых считается активированный уголь. В последнее время особой популярностью пользуются глинистые материалы на основе монтмориллонита, модифицированные разными способами и сформованные до вида сыпучих гранулированных консистенций. Ранее [3] нами были изучены адсорбционные свойства нескольких модификаций бентонитов по отношению к нитро-, amino- и гидроксипроизводным бензола. Полученные результаты позволили предположить, что сорбционная активность модифицированных бентонитов позволит обеспечить извлечение из воды не только ароматических соединений, но и других загрязняющих веществ на 80–92 %. Поэтому были намечены пути дальнейшего изучения свойств модифицированных бентонитов для еще большего повышения их адсорбционной активности, а также пути создания новых технологических комплексов, обеспечивающих качественную очистку сточных вод от ионов тяжелых металлов, в том числе ионов Ni^{2+} и Cd^{2+} .

Цель нашего исследования заключалась в разработке и обосновании новых технологий очистки водных сред, включая адсорбционную очистку, от ионов тяжелых металлов (на примере ионов Ni^{2+} и Cd^{2+}).

Материалы и методы

Основные объекты исследований представляли собой модельные растворы гептагидрата сульфата никеля $NiSO_4 \cdot 7H_2O$ и октогидрата сульфата кадмия $3CdSO_4 \cdot 8H_2O$, содержащие ионы Ni^{2+} и Cd^{2+} в концентрациях 0–50 мг/дм³. Адсорбция изучалась в статических условиях. Исследования проводились на сорбционном материале, представляющем собой бентонит (Саригюхское месторождение в Республике Армения), модифицированный углеродными нанотрубками (УНТ), высокотемпературной обработкой (550 °С) и активированный кислотой (HCl) и солью (CaCl₂) в определенных концентрациях. К исследованиям приняты модификации бентонита, прошедшие следующие варианты активации:

- № 1 – активация 9 % раствором HCl и 30 % раствором хлористого кальция CaCl₂;
- № 2 – активация 18 % раствором HCl и 38 % раствором хлористого кальция CaCl₂.

Исследования проводились методом фотометрии, реализованным на спектрофотометре ПЭ-6100УФ (производитель Shanghai Mapada Instruments Co., Ltd, Китай). Содержание ионов Ni^{2+} было определено в соответствии с

ПНД Ф 14.1:2.46-96¹. Метод определения основывался на взаимодействии ионов Ni^{2+} с диметилглиоксимом в слабоаммиачной среде и присутствии сильного окислителя. Это приводило к окрашиванию раствора в красный цвет. Длина волны, при которой измерялась оптическая плотность раствора, составляла 445 нм. Содержание ионов Cd^{2+} устанавливалось в соответствии с ПНД Ф 14.1:2.45-96². В основу метода определения содержания ионов Cd^{2+} положен метод взаимодействия кадмия с дитизином. При этом образуется комплекс, экстрагируемый четыреххлористым углеродом. При этом раствор окрашивается в малиново-розовый цвет. Длина волны, при которой измерялась оптическая плотность раствора, составляла 515 нм.

Величина адсорбции Γ_i , мг/г, определялась по зависимости [4]:

$$\Gamma_i = \frac{(C_{0i} - C_{pi})V}{m}, \quad (1)$$

где C_{0i} – исходная концентрация ионов изучаемого металла в растворе, мг/дм³; C_{pi} – равновесная концентрация ионов изучаемого металла в растворе, мг/дм³; V – объем раствора, дм³; m – масса навески сорбента, г.

Определение статической обменной емкости COE (мг-экв/г) сорбционных материалов проводилось в соответствии с [4], поскольку $COE = \Gamma_\infty$, где Γ_∞ – предельная величина адсорбции.

Для определения коэффициента межфазного распределения K_d , дм³/г, ионов металла между бентонитом и водной фазой использовали формулу [4; 5]:

$$K_d = \frac{\Gamma_\infty}{C_p}, \quad (2)$$

где Γ_∞ – предельное значение величины адсорбции, мг/г.

Степень адсорбционного извлечения S , %, на изучаемом бентоните определялась по формуле [4; 5]

$$S = \frac{C_0 - C_p}{C_0} \cdot 100 \%. \quad (3)$$

Работа выполнена на базе Научно-образовательного центра «Промышленная экология» кафедры «Экология и техносферная безопасность» СГТУ имени Гагарина Ю.А. в рамках госбюджетной НИР и гранта Фонда Бортника,

¹ ПНД Ф 14.1:2.46-96 Методика измерения массовой концентрации никеля в природных и сточных водах фотометрическим методом с диметилглиоксимом. М.: Федеральная служба по надзору в сфере природопользования, 2013. 10 с.

² ПНД Ф 14.1:2.45-96 Методика выполнения измерений массовой концентрации ионов кадмия в природных и сточных водах фотометрическим методом с дитизином. М.: Минприроды РФ, 2004. 11 с.

а также в Испытательном аккредитованном лабораторном центре «ЭкоОС» СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Результаты и обсуждение

Исследования адсорбционных характеристик проводились на адсорбенте, представляющем собой бентонит, модифицированный УНТ, прошедший обжиг при 550 °С и кислотно-солевою активацию. Результаты двух вариантов активации модифицированного бентонита анализировались в сравнении с результатами, полученными на адсорбенте, представляющем собой бентонит, модифицированный УНТ, прошедший обжиг при 550 °С, но без кислотно-солевой активации.

Для реализации исследований необходимо было построить изотермы адсорбции ионов Ni^{2+} и Cd^{2+} от их равновесной концентрации C_p в растворе.

Изотермы адсорбции ионов Ni^{2+} и Cd^{2+} от равновесных концентраций C_p для бентонита, модифицированного УНТ и обжигом при температуре 550 °С, показаны на рис. 1 и 2.

Статическая обменная емкость СОЕ (мг-экв/г) определялась по формуле (2). Коэффициент межфазного распределения K_d (дм³/г) ионов Ni^{2+} и Cd^{2+} между фазой сорбционного материала и водной фазой определялся по формуле (3). Степень адсорбционного извлечения S (%) ионов Ni^{2+} и Cd^{2+} исследуемым сорбционным материалом определялась по формуле (4). Таким образом, установленные характеристики эффективности адсорбции бентонита, модифицированного УНТ и обжигом при температуре 550 °С, а также активированные кислотой HCl и солью CaCl₂ по отношению к ионам Ni^{2+} и Cd^{2+} приведены в табл. 1.

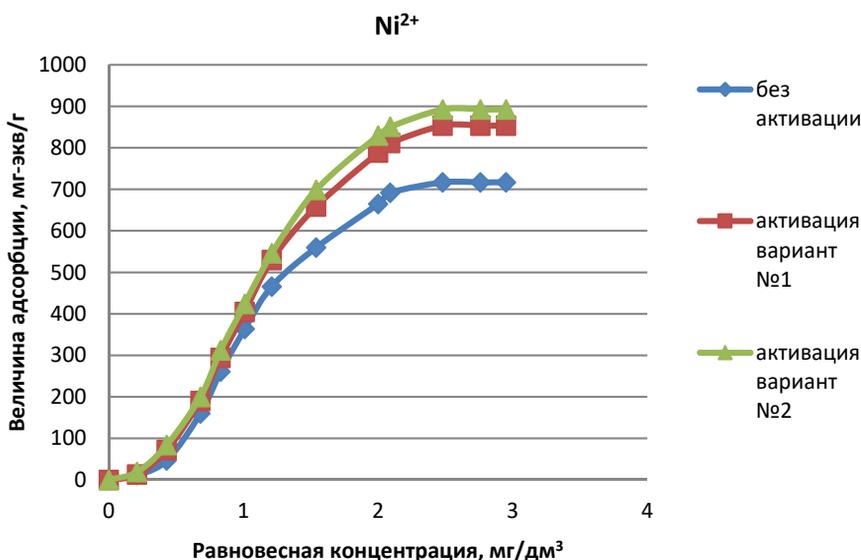


Рис. 1. Изотермы адсорбции ионов Ni^{2+} в зависимости от равновесных концентраций C_p на бентоните, модифицированном УНТ, обжигом при 550 °С, после кислотно-солевой активации в статических условиях

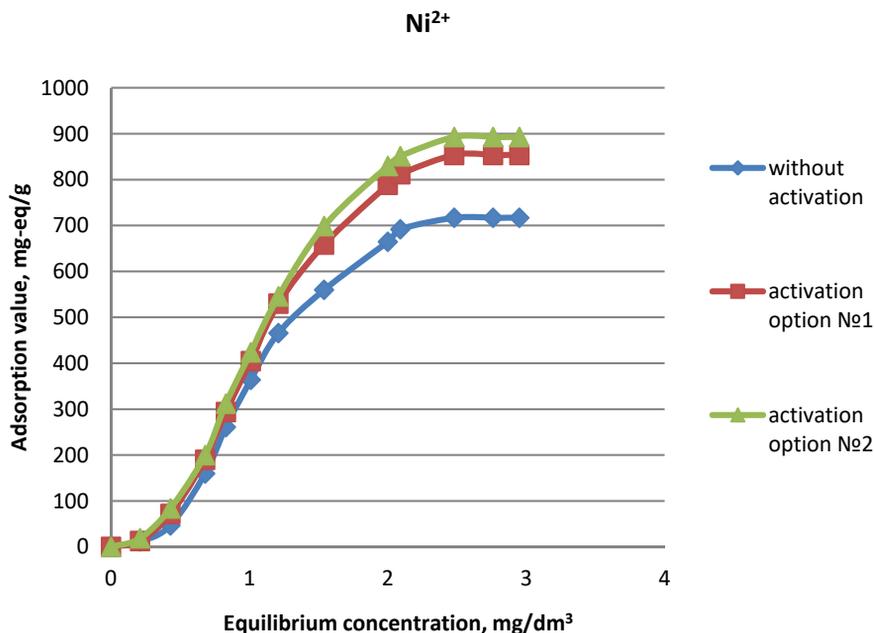


Figure 1. Adsorption isotherms of Ni²⁺ ions as a function of equilibrium concentrations of C_p on bentonite modified with carbon nanotubes fired at 550°C after activation with acid and salt under static conditions

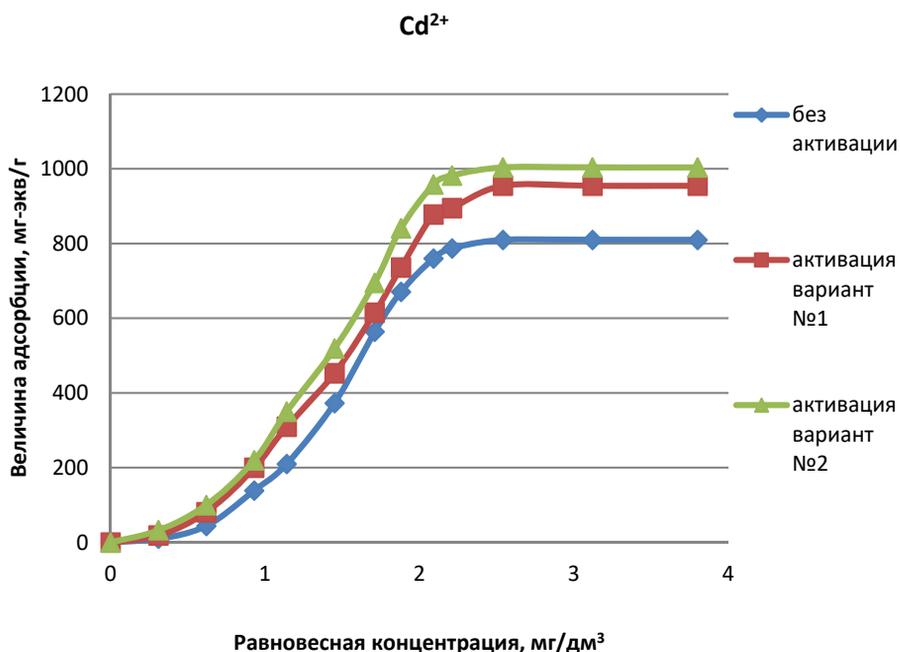


Рис. 2. Изотермы адсорбции ионов Cd²⁺ в зависимости от равновесных концентраций C_p на бентоните, модифицированном УНТ, обжигом при 550 °С, после кислотно-солевой активации в статических условиях

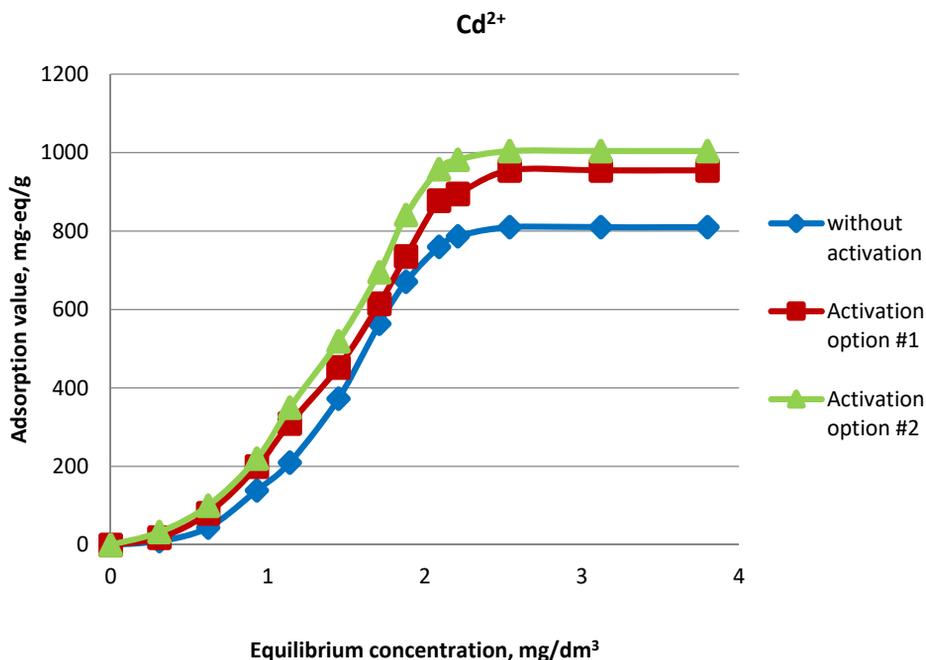


Figure 2. Adsorption isotherms of Cd^{2+} ions as a function of equilibrium concentrations of C_0 on bentonite modified with carbon nanotubes fired at $550^{\circ}C$ after activation with acid and salt under static conditions

Результаты лабораторных исследований позволили рекомендовать бентонит, модифицированный УНТ, обожженный при $550^{\circ}C$ и подвергшийся кислотно-солевой активации в качестве сорбционного материала для очистки водных сред от ионов Ni^{2+} и Cd^{2+} .

Таблица 1. Параметры, характеризующие эффективность адсорбции ионов Ni^{2+} и Cd^{2+} на бентоните, модифицированном УНТ и обжигом при $550^{\circ}C$

Адсорбируемый ион	Наличие у адсорбента кислотной активации	COE , мг-экв/г	K_d , dm^3/g	S , %
Ni^{2+}	Адсорбент без активации	$717,00 \pm 1,37$	$243,05 \pm 0,65$	$83,9 \pm 2,53$
	Вариант активации №1	$854 \pm 1,14$	$289,49 \pm 0,75$	$95,8 \pm 2,66$
	Вариант активации №2	$893 \pm 2,33$	$302,71 \pm 1,44$	$97,1 \pm 2,46$
Cd^{2+}	Адсорбент без активации	$810,00 \pm 1,57$	$213,16 \pm 1,14$	$80,0 \pm 2,39$
	Вариант активации №1	$955 \pm 2,51$	$251,31 \pm 0,70$	$93,1 \pm 1,44$
	Вариант активации №2	$1004 \pm 3,53$	$264,21 \pm 1,19$	$95,3 \pm 2,63$

Table 1. Parameters characterizing the efficiency of adsorption of Ni^{2+} and Cd^{2+} ions by bentonite modified with carbon nanotubes and roasting at a temperature of $550^{\circ}C$

Adsorbed ion	The presence of acid activation in the adsorbent	SEC, mg-eq/g	K_d , dm^3/g	S , %
Ni^{2+}	Adsorbent without activation	717.00 ± 1.37	243.05 ± 0.65	83.9 ± 2.53
	Activation option # 1	854 ± 1.14	289.49 ± 0.75	95.8 ± 2.66
	Activation option # 2	893 ± 2.33	302.71 ± 1.44	97.1 ± 2.46
Cd^{2+}	Adsorbent without activation	810.00 ± 1.57	213.16 ± 1.14	80.0 ± 2.39
	Activation option # 1	955 ± 2.51	251.31 ± 0.70	93.1 ± 1.44
	Activation option # 2	1004 ± 3.53	264.21 ± 1.19	95.3 ± 2.63

Однако на средних и крупных производствах недостаточно реализации только адсорбционной очистки воды. Традиционно используются механический, физико-химический и другие методы очистки стоков [6]. Поэтому изученные сорбционные материалы предлагаются в качестве фильтрующей загрузки в адсорбционные фильтры, размещаемые в составе станции очистки воды. Предлагаемая схема станции очистки сточных вод, загрязненных тяжелыми металлами, приведена на рис. 3.

За основу разработанной технологической схемы станции очистки сточных вод нами принята схема очистных сооружений, разработанная и внедренная нашими партнерами – ООО НПП «ЛИССКОН» на предприятии ООО НПП «Инжект» (г. Саратов) для очистки стоков электрохимического и гальванического производства. Внедрение в производство технологической схемы очистки сточных вод с применением фильтрующих загрузок из предлагаемых сорбционных материалов позволит обеспечить высокую эффективность (95–98 %) очистки сточных вод гальванического и электрохимического производства практически от всех тяжелых металлов, включая ионы Ni^{2+} и Cd^{2+} .

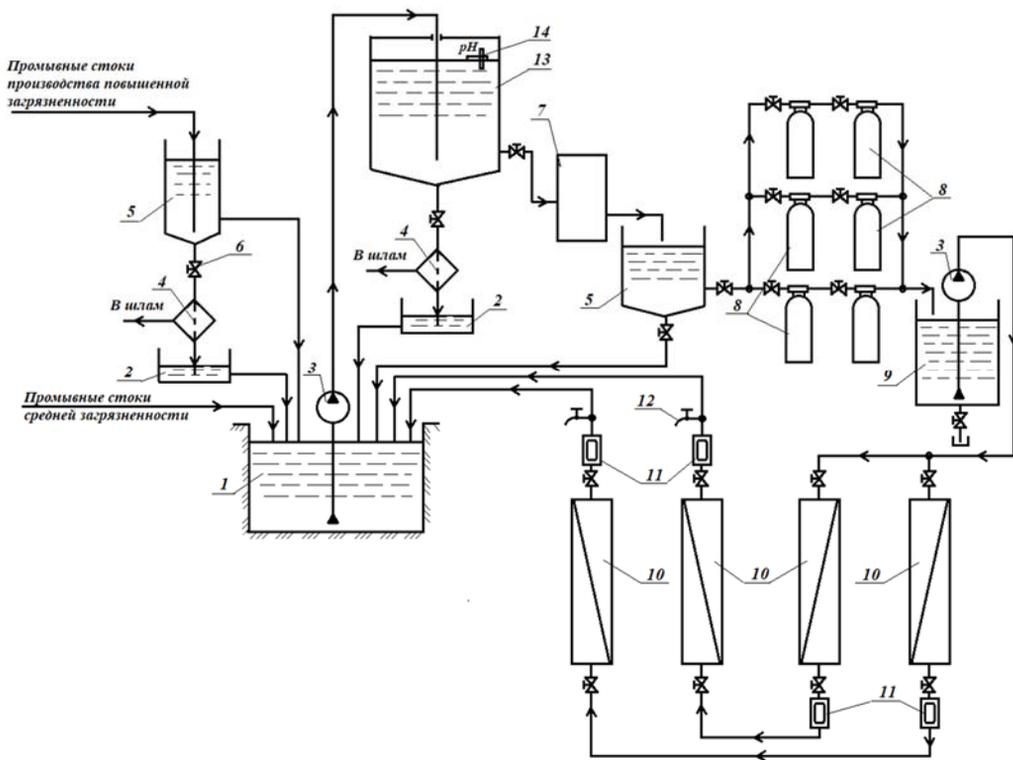


Рис. 3. Схема станции очистки сточных вод:

- 1 – Емкость накопительная; 2 – емкость шламовая; 3 – насос мембранный пневматический;
- 4 – фильтр мешочный; 5, 9 – емкость накопительная; 6 – кран шаровый; 7 – электрофлотатор;
- 8 – адсорбционный фильтр; 10 – модуль мембранный обратнoосмотический;
- 11 – расходомерз-4001 in-line; 12 – вентиль отбора воды; 13 – реактор;
- 14 – датчик pH Etatron D.S. GLASS (стекло)

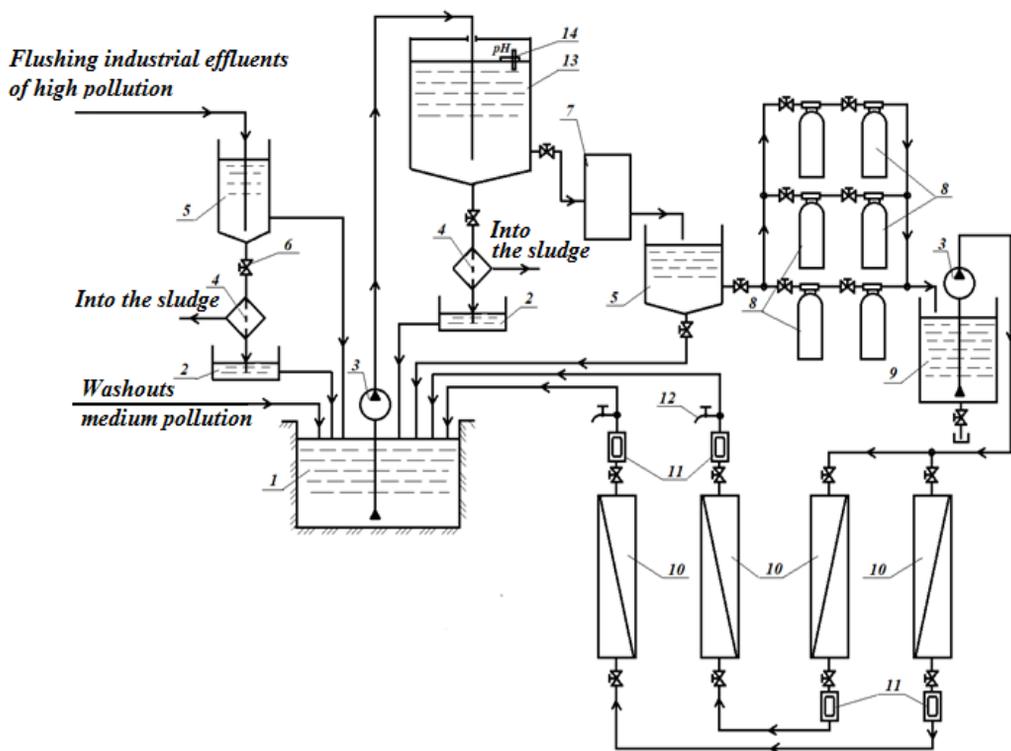


Figure 3. Scheme of a wastewater treatment plant:

- 1 – Storage tank; 2 – Slurry tank; 3 – Diaphragm pneumatic pump; 4 – Bag filter; 5, 9 – Storage tank;
 6 – Ball valve; 7 – Electroflotation machine; 8 – Adsorption filter; 10 – Reverse osmosis membrane module;
 11 – Flow meter z-4001 in-line; 12 – Water selection valve; 13 – Reactor;
 14 – Etatron D.S pH sensor. GLASS (glass)

Заклучение

Проведенные исследования позволили прийти к следующим выводам.

1. Активация 9 % раствором хлористого водорода HCl и 30 % раствором хлористого кальция CaCl₂ бентонита, модифицированного УНТ и обожженного при 550 °С, способствует улучшению его адсорбционных свойств по отношению к ионам Ni²⁺ и Cd²⁺. Степень адсорбционного извлечения ионов Ni²⁺ после активации указанного адсорбента 9 % раствором HCl и 30 % раствором хлористого кальция CaCl₂ возрастает на 12–13%, а степень адсорбционного извлечения ионов Cd²⁺ после аналогичной активации увеличивается на 14–15%.

2. Активация 18 % раствором хлористого водорода HCl и 38 % раствором хлористого кальция CaCl₂ бентонита, модифицированного УНТ и обожженного при 550 °С, способствует еще большему улучшению его адсорбционных свойств по отношению к ионам Ni²⁺ и Cd²⁺. Степень адсорбционного извлечения ионов Ni²⁺ после активации указанного адсорбента 18 % раствором HCl и 38 % раствором хлористого кальция CaCl₂ возрастает на 13–14%, а

степень адсорбционного извлечения ионов Cd^{2+} после аналогичной активации увеличивается на 16–17 %.

3. Наибольший адсорбционный эффект по отношению к ионам указанных металлов проявил бентонит, модифицированный УНТ, обожженный при 550 °С и активированный 18 % раствором хлористого водорода HCl и 38 % раствором хлористого кальция CaCl_2 . Его параметры: по отношению к ионам Ni^{2+} : $\text{COE} = 893,0$ мг-экв/г, $\text{Kd} = 302,71$ $\text{дм}^3/\text{г}$, $\text{S} = 97,1\%$; к ионам Cd^{2+} : $\text{COE} = 1004$ мг-экв/г, $\text{Kd} = 264,21$ $\text{дм}^3/\text{г}$, $\text{S} = 95,3\%$.

4. Результаты проведенных лабораторных исследований позволяют рекомендовать бентонит, модифицированный УНТ, обожженный при 550 °С и подвергшийся кислотно-солевой активации в качестве сорбционного материала для очистки водных сред от ионов Ni^{2+} и Cd^{2+} .

5. Для реализации в производственных условиях предлагается технологическая схема станции водоочистки, в составе которой используются высокоэффективные адсорбционные фильтры с сорбционным материалом из бентонита, модифицированного УНТ, обожженного при температуре 550 °С и активированного 18 % раствором хлористого водорода HCl и 38 % раствором хлористого кальция CaCl_2 .

Список литературы

- [1] Пимнева Л.А. Селективное извлечение и концентрирование цинка и кадмия из сточных вод // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 10 (часть 1). С. 103–104.
- [2] Помазкина О.И., Филатова Е.Г., Пожидяев Ю.Н., Лебедева О.В. Адсорбция ионов никеля (II) алюмосиликатами, модифицированными поли-1-винилимидазолом и поли-4-винилпиридином // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2018. № 4. С. 393–397. <https://doi.org/10.7868/S0044185618040101>
- [3] Kosarev A.V., Atamanova O.V., Tikhomirova E.I., Istrashkina M.V. Kinetics of adsorption of 2-methylalinine by modified bentonite at sewage treatment // Water and Ecology. 2018. № 3. P. 24–31. <https://doi.org/10.23968/2305-3488.2018.20.3.24-31>
- [4] Зеленцов В.И., Дацко Т.Я. Применение адсорбционных моделей для описания равновесия в системе оксигидроксидалюминия-фтор // Электронная обработка материалов. 2012. № 48 (6). С. 65–73.
- [5] Физическая химия: в 2 кн. Кн. 1: Строение вещества. Термодинамика / К.С. Краснов, Н.К. Воробьев, И.Н. Годнев и др.; под ред. К.С. Краснова. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1995. 512 с.
- [6] YaqubM., Lee W. Zero-liquid discharge (ZLD) technology for resource recovery from wastewater: A review. Science of The Total Environment. Vol. 681. 1 September 2019. P. 551–563. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.062>

References

- [1] Pimneva LA. Selective extraction and concentration of zinc and cadmium from wastewater. *International Journal of Applied and Basic Research*. 2013;10(1):103–104. (In Russ.).

- [2] Pomazkina OI, Filatova EG, Pozhidayev YuN, Lebedeva OV. Adsorption of nickel (II) ions by aluminosilicates modified by poly-1-vinylimidazole and poly-4-vinylpyridine. *Surface physicochemistry and protection of materials*. 2018;(4):393–397. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0044185618040101>
- [3] Kosarev AV, Atamanova OV, Tikhomirova EI, Istrashkina MV. Kinetics of adsorption of 2-methylalinine by modified bentonite at sewage treatment. *Water and Ecology*. 2018(3):24–31. <https://doi.org/10.23968/2305–3488.2018.20.3.24–31>
- [4] Zelentsov VI, Datsko TYa. Application of adsorption models to describe the equilibrium in the oxyhydroxydaluminium-fluorine system. *Electronic material processing*. 2012;48(6):65–73. (In Russ.).
- [5] *Physical Chemistry. In two books. Book 1. The Structure of Matter. Thermodynamics: textbook for universities* M.: Vysshayashkola Publ.; 1995. (In Russ.).
- [6] Yaqub M, Lee W. Zero-liquid discharge (ZLD) technology for resource recovery from wastewater: A review. *Science of The Total Environment*. Vol. 681. 1 September 2019. p. 551–563. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.062>

Сведения об авторах:

Глубокая Александра Сергеевна, аспирант кафедры «Экология и техносферная безопасность» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., Российская Федерация, 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77. ORCID: 0000-0001-9646-179X, eLIBRARY SPIN-код: 1514-7670. E-mail: aleksagl20@gmail.com

Атаманова Ольга Викторовна, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Экология и техносферная безопасность» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., Российская Федерация, 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77. ORCID: 0000-0002-3220-031X, eLIBRARY SPIN-код: 5784-9118. E-mail: O_V_Atamanova@mail.ru

Тихомирова Едена Ивановна, доктор биологических наук, профессор, заведующая кафедрой «Экология и техносферная безопасность» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., Российская Федерация, 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77. ORCID: 0000-0001-6030-7344, eLIBRARY SPIN-код: 7673-8480. E-mail: tichomirova_ei@mail.ru

Подоксенов Артем Андреевич, аспирант кафедры «Экология и техносферная безопасность» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., Российская Федерация, 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77. ORCID: 0000-0002-2792-7936, eLIBRARY SPIN-код: 6143-2829. E-mail: hosting-speech@yandex.ru

Симонова Зоя Александровна, кандидат биологических наук, доцент, доцент кафедры «Экология и техносферная безопасность» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., Российская Федерация, 410054, Саратов, ул. Политехническая, д. 77. ORCID: 0000-0002-2353-1547, eLIBRARY SPIN-код: 9210-2864. E-mail: simonovaza@yandex.ru

Bio notes:

Aleksandra S. Glubokaya, post-graduate student of the Department “Ecology and technosphere safety”, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnikheskaya St, Saratov, 410054, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-9646-179X, eLIBRARY SPIN: 1514-7670. E-mail: aleksagl20@gmail.com

Olga V. Atamanova, Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department “Ecology and technosphere safety”, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnikeskaya St, Saratov, 410054, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-3220-031X, eLIBRARY SPIN-код: 5784-9118. E-mail: O_V_Atamanova@mail.ru

Elena I. Tikhomirova, Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of Department “Ecology and technosphere safety”, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnikeskaya St, Saratov, 410054, Russian Federation. ORCID: 0000-0001-6030-7344, eLIBRARY SPIN-код: 7673-8480. E-mail: tichomirova_ei@mail.ru

Artem A. Podoksenov, post-graduate student of the Department “Ecology and technosphere safety”, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnikeskaya St, Saratov, 410054, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-2792-7936, eLIBRARY SPIN-код: 6143-2829. E-mail: hosting-speech@yandex.ru

Zoya A. Simonova, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department “Ecology and technosphere safety”, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnikeskaya St, Saratov, 410054, Russian Federation. ORCID: 0000-0002-2353-1547, eLIBRARY SPIN-код: 9210-2864. E-mail: simonovaza@yandex.ru