

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ТЕКСТИЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

**О. В. Атаманова, Е. И. Тихомирова,  
А. С. Глубокая, А. А. Подоксенов**

*ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический  
университет имени Гагарина Ю. А.», Саратов, Россия*

**Ключевые слова:** адсорбционный фильтр; адсорбция; бентонит; ионы  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$ ; локальная станция очистки сточных вод; очистка сточных вод; текстильные предприятия; углеродные нанотрубки.

**Аннотация:** Исследована адсорбционная способность бентонита, модифицированного углеродными нанотрубками (УНТ) и обожженного при температуре 550 °С. Построены изотермы адсорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  на бентоните, модифицированном УНТ, в зависимости от концентраций  $C_p$  в статических условиях. Показано, что наибольшей эффективностью адсорбции обладает фракция бентонита с размером гранул 0,10...0,99 мм. Исследования процесса адсорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$  на бентоните, модифицированном УНТ, показали, что он описывается изотермой Фрейндлиха, в то время как процесс адсорбции ионов  $\text{Fe}^{2+}$  на том же бентоните может быть представлен в рамках изотермы Ленгмюра. Предложена усовершенствованная локальная станция очистки сточных вод текстильного предприятия, которая в качестве одного из основных элементов включает адсорбционный фильтр с загрузкой из бентонита, модифицированного УНТ. Эффективность очистки сточных вод текстильного предприятия подтверждена производственными испытаниями.

---

Атаманова Ольга Викторовна – доктор технических наук, профессор кафедры «Экология и техносферная безопасность», e-mail: O\_V\_Atamanova@mail.ru; Тихомирова Елена Ивановна – доктор биологических наук, профессор, заведующий кафедрой «Экология и техносферная безопасность»; Глубокая Александра Сергеевна – аспирант кафедры «Экология и техносферная безопасность»; Подоксенов Артем Андреевич – аспирант кафедры «Экология и техносферная безопасность», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.», Саратов, Россия.

## Введение

В настоящее время текстильная промышленность в России и за рубежом развивается с повышенной активностью. На современном этапе развития текстильной индустрии применяется большое количество современных технологий изготовления тканей для пошива одежды, обивки мебели, применения в медицине, автомобильной промышленности и других хозяйственных отраслях. При производстве текстильных изделий используется много воды, а также образуется значительное количество сточных вод при реализации каждого из технологических процессов (крашения, отделки и др.) и в результате текстильного производства в целом. Сточные воды красильных цехов и предприятий обычно содержат химически активные тяжелые металлы, ароматические соединения и химические остатки [1]. Они также отличаются высокими значениями химического (ХПК) и биохимического (БПК) потребления кислорода, наличием в сточных водах аэрозолей, повышенным содержанием ионов железа, меди, хрома и других тяжелых металлов [2]. Недостаточно качественная очистка воды от воздействия красителей, органики, кислотных и щелочных соединений в процессе текстильного производства особенно опасна для водных экосистем при сбросе сточных вод в природные водоемы [3]. Поэтому очистку сточных вод от различных загрязняющих веществ справедливо считают «вечной» экологической проблемой [4].

Для удовлетворения нужд потребителей текстильная индустрия постоянно совершенствуется, внедряются все более современные химические технологии производства текстиля. Это часто является причиной увеличения в сточных водах таких предприятий химически агрессивных токсикантов, и, как следствие, требует совершенствования методов их очистки. Основными способами очистки стоков производственных предприятий являются физико-химические способы очистки воды, которые разнообразны и зависят от видов производств и состава загрязнителей. Обычно очистка воды от загрязняющих токсичных соединений требует гармоничного сочетания физических способов воздействия и обоснованных химических реактивов [5]. Именно данное сочетание дает возможность обеспечить качественную очистку стоков не только от токсинов, но и от растворенных газов, тонкодисперсных частиц как жидкой, так и твердой фазы. Физико-химические способы могут применяться на любых этапах водоочистки, как на этапе предварительной нормализации состава жидкости, так и при глубокой очистке воды. Самые распространенные и основные способы очистки воды физико-химическим путем – сорбция, флотация, экстракция, ионообмен, электродиализ, обратный осмос, термические методы.

Наиболее приоритетными по сравнению с другими методами очистки стоков признаются адсорбционные. Они являются достаточно несложными в техническом оснащении, позволяют извлекать из водных растворов большинство загрязняющих веществ, в том числе тяжелые металлы, орга-

нические соединения, нефтепродукты. Большим преимуществом современных адсорбционных технологий и материалов является минимизация вторичных загрязнений воды [6, 7]. Многие адсорбционные технологии универсальны. Они позволяют удалить из промышленных сточных вод сложного состава ионы большинства металлов [7]. В настоящее время наиболее распространенным адсорбентом является активированный уголь. Эффективность его использования в ряде случаев достигает 70 – 95 %. Однако изученные в последнее время другие сорбционные материалы позволяют обосновать их явное преимущество перед активными углями. Известно [8], что на эффективность адсорбции влияют химическая природа сорбционного материала, размеры адсорбционной поверхности, особенности строения загрязняющих веществ и их состояния в растворе. Кроме активированного угля достаточно часто в качестве сорбционных материалов используют силикагели, торфы, кокс, золу, опилки и др. [9].

В последние десятилетия особую популярность для очистки особо загрязненных сточных вод завоевали глинистые породы. Они обладают достаточно высокой эффективностью адсорбции, невысокой стоимостью и повсеместной доступностью, так как в большинстве своем являются местными строительными материалами [10]. Для дальнейшего улучшения адсорбционной способности глинистых материалов предприняты различные способы их модифицирования, чаще всего включающие температурную обработку или активацию химическими соединениями. Особый интерес в настоящее время вызывает модифицирование бентонитов органическими веществами, которое способствует повышению сорбционной активности адсорбентов за счет сочетания положительных свойств неорганических и органических соединений. Учеными установлено, что органическая модификация минеральных сорбентов значительно улучшает адсорбционные свойства и делает их высокоэффективными при извлечении из растворов ароматических соединений [11]. Значительный интерес вызывает также использование многослойных фильтрующих загрузок в адсорбционных фильтрах, где выбор каждого из слоев сорбционной загрузки осуществляется исходя из состава загрязняющих веществ в сточных водах конкретного предприятия [12, 13].

Для обоснованного выбора сорбционного материала, обеспечивающего эффективное извлечение из сточных вод текстильного предприятия ионов тяжелых металлов и других загрязняющих веществ, необходимо выполнить ряд исследований: изучить состав сточных вод данного производства и сорбционную способность материалов по отношению к приоритетным загрязняющим веществам; экспериментально апробировать полученные результаты в производственных условиях.

### **Экспериментальная часть**

Объекты исследования – сточные воды текстильного предприятия ООО «Балтекс» (г. Балашов, Саратовская обл.), а также модельные растворы медного купороса ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) и железного ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), содержащие ионы  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{Cu}^{2+}$  в концентрациях 10...800 мг/дм<sup>3</sup>. Также в качестве объекта

исследования рассматривался сорбционный материал, который получен модифицированием природного бентонита углеродными нанотрубками (УНТ) в процессе высокотемпературной (550 °С) термообработки с последующим его гранулированием. Изучаемый бентонит добывался на Саригюхском месторождении в Республике Армения. Лабораторные исследования модифицированного бентонита выполнены для трех фракций с размером гранул, мм: мельче 0,099 (мелкая); 0,10...0,99 (средняя); 1,0...3,5 (крупная). Процесс адсорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  на бентоните, модифицированном УНТ, для установления величины энергии адсорбции исследовался при разных температурах в диапазоне 15...55 °С.

Мониторинг сточных вод предприятия ООО «Балтекс» в 2017 – 2019 гг. показал превышение в несколько раз, по сравнению с нормативом (ГН 2.1.5.1315-03) содержания ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$ . Данное предприятие является одним из ведущих текстильных предприятий Саратовской области, и проблема качественной очистки сточных вод для него актуальна. В настоящее время ООО «Балтекс» производит синтетические и смесовые ткани. В составе предприятия имеется несколько крупных цехов, использующих лакокрасочные и красильные установки, сточные воды которых поступают на сброс.

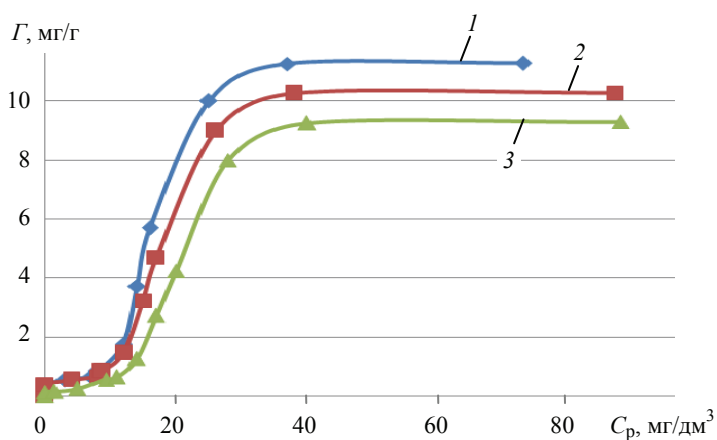
При проведении экспериментальных исследований необходимо было, прежде всего, установить характеристики и эффективность адсорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  на бентоните, модифицированном УНТ. В качестве основных методов исследования использовались следующие: фотометрия, электронная микроскопия, методы статистической обработки результатов. Лабораторные исследования выполнены на базе Научно-образовательного центра «Промышленная экология» в ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А.».

## Результаты и обсуждение

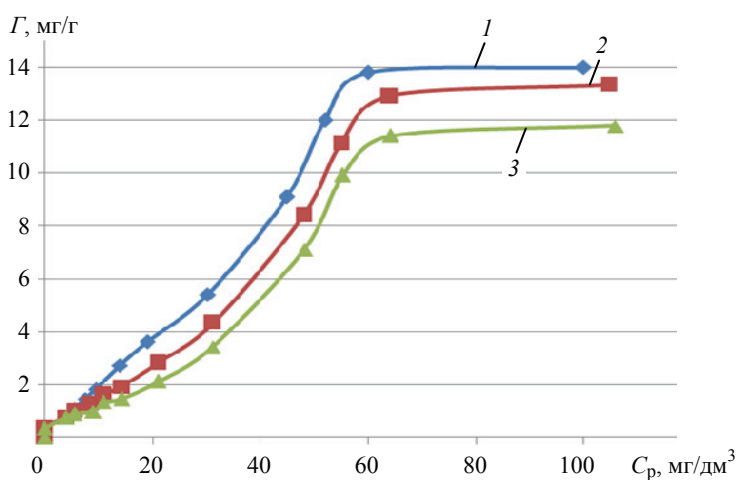
Проведенные лабораторные исследования позволили выполнить расчеты и построить графические изотермы адсорбции ионов меди (II) и железа (II) на бентоните, модифицированном УНТ (рис. 1).

Механизмы адсорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  на изучаемом сорбционном материале рассматривались на соответствие моделям Ленгмюра, Фрейндлиха и Брунауэра–Эммета–Теллера (БЭТ), что дало возможность установить механизмы адсорбции рассматриваемых процессов. Установление механизмов адсорбции выполнено для бентонита, модифицированного УНТ, гранул средней фракции, показавшей лучшую адсорбционную способность данного сорбента по сравнению с мелкой и крупной.

Рассчитанные параметры адсорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  на бентоните, модифицированном УНТ, в соответствии с моделями Ленгмюра и Фрейндлиха, приведены в табл. 1. Полученные зависимости механизмов адсорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  на изучаемом сорбционном материале показали чрезвычайно слабое соответствие модели БЭТ (величина аппроксимации экспериментальных данных  $R^2 = 0,058$ ).



а)



б)

**Рис. 1. Изотермы адсорбции ионов меди (II) (а) и железа (II) (б) на бентоните, модифицированном УНТ, в зависимости от равновесных концентраций  $C_p$  в условиях статики:**  
 фракция: 1 – средняя; 2 – мелкая; 3 – крупная

Анализ изотерм адсорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$  на бентоните, модифицированном УНТ, показал явное преимущество варианта описания процесса адсорбции в рамках изотермы Фрейндлиха. Расчетные характеристики изотерм адсорбции ионов  $\text{Fe}^{2+}$  на бентоните, модифицированном УНТ, позволили обнаружить некоторое преимущество варианта описания рассматриваемого процесса изотермой Ленгмюра.

Вид адсорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  на бентоните, модифицированном УНТ, установлен по методу Дубинина–Радушкевича. Для этого экспериментально найдены зависимости величин адсорбции от температуры по формуле [14]

$$\Gamma(T) = \Gamma_{\infty}(T) \exp(-k\varepsilon^2), \quad (1)$$

Таблица 1

Данные по адсорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$ 

Показатель	Адсорбированный ион	
	$\text{Cu}^{2+}$	$\text{Fe}^{2+}$
<i>Изотермы Ленгмюра (по уравнению)</i>		
	$1/\Gamma = 6,3547/C_p + 0,0188$	$1/\Gamma = 5,1534/C_p + 0,0008$
$K_L, \text{дм}^3/\text{мг}$	0,0030	0,0002
$\Gamma_\infty, \text{мг}/\text{г}$	53,1915	1250,00
$R^2$	0,808	0,999
<i>Изотермы Фрейндлиха (по уравнению)</i>		
	$\lg \Gamma = 1,5322 \cdot \lg C_p - 1,278$	$\lg \Gamma = 1,0024 \cdot \lg C_p - 0,7221$
$K_F, \text{мг}/\text{г} \cdot (\text{дм}^3/\text{мг})^{1/n}$	0,0527	0,1896
$n$	0,6527	0,9976
$R^2$	0,905	0,983

Примечание.  $K_L, K_F$  – константы адсорбционного равновесия Ленгмюра и Фрейндлиха соответственно;  $\Gamma_\infty$  – сорбционная емкость;  $n$  – параметр адсорбционной интенсивности по Фрейндлиху.

где  $T$  – заданная температура, °C;  $k$  – угловой коэффициент;  $\varepsilon$  – адсорбционный потенциал Поляни, являющийся характеристикой изотермической работы, проводимой при равновесном переносе одного моля адсорбтива к поверхности сорбента:

$$\varepsilon = RT \ln(1 + C_p^{-1}), \quad (2)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ .

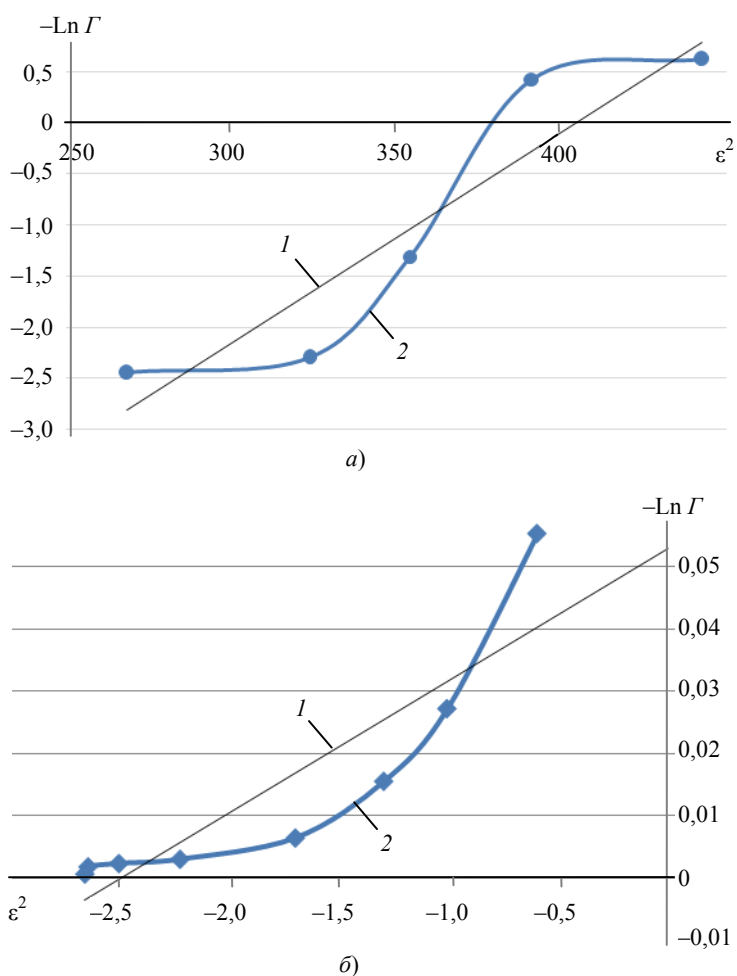
Логарифмическая форма зависимости

$$\ln \Gamma = \ln \Gamma_\infty - k\varepsilon^2. \quad (3)$$

Зависимости величин  $-\ln \Gamma$  от  $\varepsilon^2$  для ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  приведены на рис. 2. Используя данные зависимости, установлены значения коэффициента  $k$  из уравнения (3) для каждого из двух изучаемых процессов адсорбции, которые позволили рассчитать среднюю свободную энергию адсорбции  $E$  по формуле [15]

$$E = (-2k)^{-0,5}. \quad (4)$$

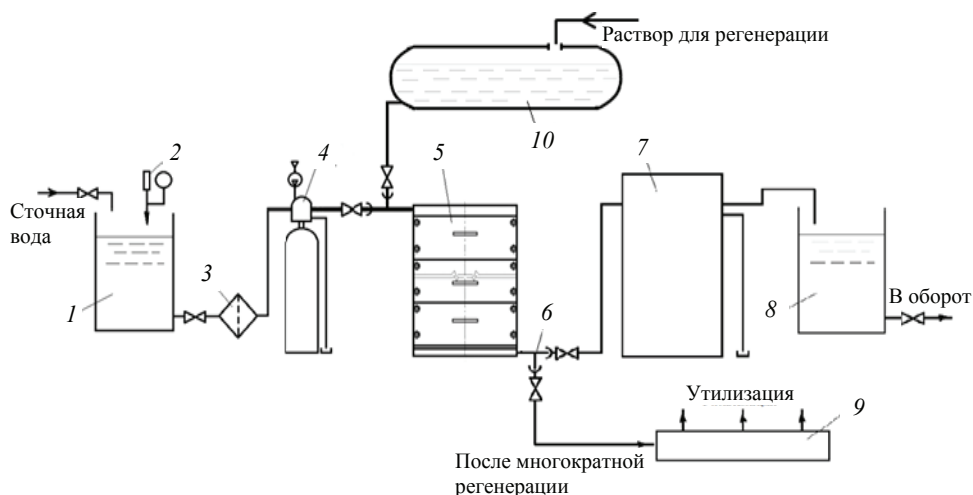
Рассчитанные значения средней свободной энергии адсорбции  $E$ , кДж/моль, ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  составили соответственно  $11,18 \pm 0,91$  и  $4,69 \pm 0,18$ , что указывает на явное преобладание физической адсорбции [16]. Таким образом, наличие физической адсорбции делает возможным



**Рис. 2. Зависимости параметра адсорбции от значения  $\varepsilon^2$  для адсорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$  (а) и  $\text{Fe}^{2+}$  (б) на полученном сорбенте в статических условиях:**  
 1 – линия тренда; 2 – экспериментальная  
 $-\text{Ln}\Gamma = 0,0207\varepsilon^2 - 8,3931, R^2 = 0,8688$  (а);  
 $-\text{Ln}\Gamma = 0,0215\varepsilon^2 + 0,0531, R^2 = 0,7987$  (б)

применение десорбции в процессе регенерации сорбента и повторное использование его для очистки воды. Для регенерации отдельного слоя адсорбента в многокомпонентном адсорбционном фильтре принято решение включить в состав локальной станции очистки воды адсорбционный фильтр со сменными кассетами, что позволит обеспечить периодическую промывку адсорбента в отдельно взятой кассете.

Для совершенствования системы очистки воды текстильного предприятия предложена локальная станция очистки, являющаяся усовершенствованным вариантом станции ЛИССКОН-301, разработанной и внедряемой предприятием ООО НПП «ЛИССКОН» (г. Саратов). Схематическое изображение новой локальной станции для очистки производственных сточных вод сложного состава текстильных предприятий приведено на рис. 3.



**Рис. 3. Технологическая схема функционирования локальной станции очистки промышленных сточных вод сложного состава:**

1 – приемная емкость; 2 – устройство водоучета; 3 – фильтр грубой очистки; 4 – аэратор; 5 – многокомпонентный адсорбционный фильтр; 6 – переходник; 7 – блок глубокой доочистки (наночистки); 8 – емкость чистой воды; 9 – шламонакопитель; 10 – емкость с жидкостью для регенерации сорбента

Лабораторный анализ образцов сточной воды ООО «Балтекс» до и после очистки фильтрующей системой с бентонитом, модифицированным УНТ, представлен в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты анализа образцов сточной воды**

Показатель	Значение показателя		Норматив*
	до очистки	после очистки	
Запах, балл:			
при 20 °С	0	0	2
при 60 °С	2	0	2
Окраска (по кратности разбавления, при которой исчезает окраска в столбике 10 см)	10	0	–
Сухой остаток, мг/дм <sup>3</sup>	942,5 ± 4,2	290,10 ± 7,90	1 000
Жесткость, мг/дм <sup>3</sup>	4,50 ± 0,07	3,20 ± 0,05	7,0
Вещество, мг/дм <sup>3</sup> :			
медь	<b>0,06 ± 0,005</b>	<b>0,00010 ± 0,00001</b>	<b>0,001</b>
железо общее	<b>0,18 ± 0,01</b>	<b>0,0100 ± 0,0012</b>	<b>0,1</b>
хлориды	327,8 ± 2,2	54,90 ± 9,20	350
сульфаты	178,3 ± 0,4	53,50 ± 4,45	500
цинк	0,0020 ± 0,0003	0,0010 ± 0,0001	0,01
свинец	0,0040 ± 0,0005	0,0010 ± 0,0002	0,006
кадмий	0,0030 ± 0,0002	0,0010 ± 0,0003	0,005
марганец	0,010 ± 0,002	0,0060 ± 0,0009	0,1
никель	0,020 ± 0,005	0,0100 ± 0,0012	0,02
фосфаты	0,42 ± 0,08	0,27 ± 0,06	3,5

\*ГН 2.1.5.1315-03; СанПиН 2.1.5.980-00



По результатам проведенного анализа образцов воды до очистки выявлено превышение ПДК по содержанию в воде ионов железа и меди. После очистки проб сточной воды фильтрованием содержание меди уменьшилось в 60, а железа – в 18 раз.

Проведенные исследования показали, что предложенный технологический комплекс для очистки сточных вод, а также в его составе адсорбционный фильтр на основе модифицированных бентонитовых сорбционных материалов позволяют очищать сточные воды с эффективностью до 98 % от ионов тяжелых металлов.

### Заключение

На основе анализа литературных данных выявлены приоритетные загрязняющие вещества в сточных водах текстильных предприятий. Также лабораторными исследованиями образцов сточных вод текстильного предприятия ООО «Балтекс» установлены превышения в сточных водах ионов меди  $\text{Cu}^{2+}$  и железа  $\text{Fe}^{2+}$ .

Проведенные исследования адсорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  на бентоните, модифицированном УНТ, позволили построить изотермы адсорбции (см. рис. 1) и показали, что наибольшей эффективностью адсорбции обладает фракция с размером гранул 0,10...0,99 мм. Лабораторные исследования процесса адсорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$  на бентоните, модифицированном УНТ, показали явное преимущество варианта описания процесса адсорбции в рамках изотермы Фрейндлиха. Исследования процесса адсорбции ионов  $\text{Fe}^{2+}$  на том же бентоните показали некоторое преимущество варианта описания процесса адсорбции в рамках изотермы Ленгмюра.

Рассчитанная средняя свободная энергия адсорбции  $E$ , кДж/моль, ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  составила соответственно  $11,18 \pm 0,91$  и  $4,69 \pm 0,18$ . Полученные значения указывают на то, что адсорбция ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{2+}$  на исследуемом бентоните носит физический характер.

Разработанная усовершенствованная локальная станция очистки сточных вод текстильного предприятия в качестве одного из основных элементов включает адсорбционный фильтр с загрузкой из бентонита, модифицированного УНТ. Результаты очистки производственных сточных вод текстильного предприятия ООО «Балтекс» с помощью предложенной технологии показали ее высокую эффективность для условий производства.

### Список литературы

1. Атаманова, О. В. Выявление экотоксикантов в сточных водах текстильного предприятия / О. В. Атаманова, М. В. Истрашкина // Экологический мониторинг опасных промышленных объектов: современные достижения, перспективы и обеспечение экологической безопасности населения : сб. науч. тр. по материалам Всерос. науч.-практ. конф., 11 – 13 декабря 2019 г., Саратов. – Саратов, 2019. – Ч. 2. – С. 11 – 15.

2. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2020 году». – М. : НИИ-Природа, 2021. – 270 с.

3. Green Chemistry and Sustainable Development: Approaches to Chemical Footprint Analysis / N. P. Tarasova, A. S. Makarova, S. F. Vinokurov [et al.] // Pure and Applied Chemistry. – 2018. – Vol. 90, No. 1. – P. 143 – 155. doi: 10.1515/pac-2017-0608

4. Разработка методики структурного моделирования для целей проектирования технологической очистки загрязненных вод и выделения осадков / Н. С. Попов, А. В. Козачек, А. В. Святенко, Чан Минь Тьинь // Вопр. соврем. науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского. – 2012. – № S2 (39). – С. 144 – 158.

5. Кузнецов, В. А. Определение приоритетности примесей в воде рек на урбанизированных территориях при учете их массы и токсичности / В. А. Кузнецов, Н. П. Тарасова, А. Е. Бирюков // Экология урбанизированных территорий. – 2008. – № 2. – С. 100 – 105.

6. Краснова, Т. А. Использование активных углей в процессах водоподготовки и водоотведения / Т. А. Краснова, О. В. Беляева, М. П. Кирсанов // Техника и технология пищевых производств. – 2012. – № 3 (26). – С. 46 – 56.

7. Карлина, А. И. Анализ современных и перспективных способов воздействия на природные и сточные воды / А. И. Карлина // Вестн. Иркутского гос. техн. ун-та. – 2015. – № 5 (100). – С. 146 – 150.

8. Демин, А. П. Сточные воды и качество воды в бассейне реки Волга (2000 – 2015 гг.) / А. П. Демин // Ученые записки Российского гос. гидрометеорологического ун-та. – 2017. – № 48. – С. 55 – 71.

9. Канатникова, Н. В. Тяжелые металлы в питьевой воде и их характеристика / Н. В. Канатникова, В. Р. Кочкарев // Ученые записки Орловского гос. ун-та. Серия: Естественные, технические и медицинские науки. – 2008. – № 2. – С. 10 – 14.

10. Сорбционное удаление из воды ионов тяжелых металлов / Н. М. Алыков, А. В. Павлова, Кхань Зуй Нгуэн [и др.] // Безопасность жизнедеятельности. – 2010. – № 4 (112). – С. 17 – 20.

11. Истрашкина, М. В. Особенности адсорбции ароматических аминоксоединений на различных вариантах модифицированного бентонита / М. В. Истрашкина, О. В. Атаманова, Е. И. Тихомирова // Изв. Самарского науч. центра Российской академии наук. – 2016. – Т. 18, № 2-2. – С. 381 – 384.

12. The use of Multicomponent Adsorption Filters in Water Purification Systems and Luminescent Control of Ecotoxicant Content / E. I. Tikhomirova, O. A. Plotnikova, O. V. Atamanova [et al.] // Theoretical and Applied Ecology. – 2019. – No. 1. – P. 73 – 81. doi: 10.25750/1995-4301-2019-1-073-081

13. Исследование сорбционных свойств фильтрующих материалов. – Текст : электронный / А. А. Некрасова, Д. М. Привалов, М. В. Двандненко, Н. М. Привалова // Политематический сетевой электрон. науч. журнал Кубанского гос. аграрного ун-та. – 2017. – № 126 (02). – С. 266 – 275. – URL : <http://ej.kubagro.ru/2017/02/pdf/20.pdf> (дата обращения: 25.01.2022).

14. Лабораторные работы и задачи по коллоидной химии / Под ред. Ю. Г. Фролова, А. С. Гродского. – М. : Химия, 1986. – 216 с.

15. Зеленцов, В. И. Применение адсорбционных моделей для описания равновесия в системе оксигидроксид алюминия фтор / В. И. Зеленцов, Т. Я. Дацко // Электронная обработка материалов. – 2012. – Т. 48, № 6. – С. 65 – 73.

16. Использование производственных отходов для очистки сточных вод / Н. С. Лупандина, Н. Ю. Кирюшина, Ж. А. Свергузова, Д. А. Ельников // Экология и промышленность России. – 2010. – № 5. – С. 38 – 41.

### References

1. Atamanova O.V., Itrashkina M.V. *Ekologicheskij monitoring opasnykh promyshlennykh ob"yektov: sovremennyye dostizheniya, perspektivy i obespecheniye ekologicheskoy bezopasnosti naseleniya* [Environmental monitoring of hazardous

industrial facilities: modern achievements, prospects and ensuring the environmental safety of the population], Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference, 11 - 13 December, 2019, Saratov, 2019, part 2, pp. 11-15. (In Russ.)

2. Gosudarstvennyy doklad «O sostoyanii i ispol'zovanii vodnykh resursov Rossiyskoy Federatsii v 2020 godu» [State report "On the state and use of water resources of the Russian Federation in 2020"], Moscow: NIA-Priroda, 2021, 270 p. (In Russ.)

3. Tarasova N.P., Makarova A.S., Vinokurov S.F., Kuznetsov V.A., Shlyakhov P.I. Green Chemistry and Sustainable Development: Approaches to Chemical Footprint Analysis, *Pure and Applied Chemistry*, 2018, vol. 90, no. 1, pp. 143-155, doi: 10.1515/pac-2017-0608

4. Popov N.S., Kozachek A.V., Svyatenko A.V., Chan Min' T'in' [Development of a structural modeling technique for the purposes of designing technological purification of polluted waters and sedimentation], *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo* [Problems of Contemporary Science and Practice. Vernadsky University], 2012, no. S2 (39), pp. 144-158. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Kuznetsov V.A., Tarasova N.P., Biryukov A.Ye. [Prioritization of impurities in river water in urban areas, taking into account their mass and toxicity], *Ekologiya urbanizirovannykh territoriy* [Ecology of urbanized territories], 2008, no. 2, pp. 100-105. (In Russ., abstract in Eng.)

6. Krasnova T.A., Belyayeva O.V., Kirsanov M.P. [Use of active coals in the processes of water treatment and sanitation], *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Technique and technology of food production], 2012, no. 3 (26), pp. 46-56. (In Russ., abstract in Eng.)

7. Karlina A.I. [Analysis of modern and promising ways of influencing natural and waste water], *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Irkutsk State Technical University], 2015, no. 5 (100), pp. 146-150. (In Russ., abstract in Eng.)

8. Demin A.P. [Wastewater and water quality in the Volga River Basin (2000 - 2015)], *Uchenyye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* [Scientific Notes of the Russian State Hydrometeorological University], 2017, no. 48, pp. 55-71. (In Russ., abstract in Eng.)

9. Kanatnikova N.V., Kochkarev V.R. [Heavy metals in drinking water and their characteristics], *Uchenyye zapiski Orlovskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Yestestvennyye, tekhnicheskiye i meditsinskiye nauki* [Scientific notes of the Oryol State University. Series: Natural, technical and medical sciences], 2008, no. 2, pp. 10-14. (In Russ., abstract in Eng.)

10. Alykov N.M., Pavlova A.V., Kkhan' Zuy Nguen, Abuova G.B., Utyubayeva N.V. [Sorption removal of heavy metal ions from water], *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Life safety], 2010, no. 4 (112), pp. 17-20. (In Russ., abstract in Eng.)

11. Istrashkina M.V., Atamanova O.V., Tikhomirova Ye.I. [Features of the adsorption of aromatic amino compounds on various variants of modified bentonite], *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2016, vol. 18, no. 2-2, pp. 381-384. (In Russ., abstract in Eng.)

12. Tikhomirova E.I., Plotnikova O.A., Atamanova O.V., Istrashkina M.V., Koshelev A.V., Podolsky A.L. The use of Multicomponent Adsorption Filters in Water Purification Systems and Luminescent Control of Ecotoxicant Content, *Theoretical and Applied Ecology*, 2019, no. 1, pp. 73-81, doi: 10.25750/1995-4301-2019-1-073-081

13. <http://ej.kubagro.ru/2017/02/pdf/20.pdf> (accessed 25 January 2022).

14. Frolov Yu.G., Grodskiy A.S. [Eds.] *Laboratornyye raboty i zadachi po kolloidnoy khimii* [Laboratory work and problems in colloidal chemistry], Moscow: Khimiya, 1986, 216 p. (In Russ.)

15. Zelentsov V.I., Datsko T.Ya. [Application of adsorption models to describe the equilibrium in the system of aluminum oxyhydroxide fluorine], *Elektronnaya obrabotka materialov* [Electronic Processing of Materials], 2012, vol. 48, no. 6, pp. 65-73. (In Russ., abstract in Eng.)

16. Lupandina N.S., Kiryushina N.Yu., Sverguzova Zh.A., Yel'nikov D.A. [The use of industrial waste for wastewater treatment], *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and industry of Russia], 2010, no. 5, pp. 38-41. (In Russ., abstract in Eng.)

---

### **Improvement of Wastewater Treatment Methods of Textile Enterprises**

**O. V. Atamanova, E. I. Tikhomirova,  
A. S. Glubokaya, A. A. Podoksenov**

*Yuri Gagarin Saratov State Technical University, Saratov, Russia*

**Keywords:** adsorption filter; adsorption; bentonite;  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{2+}$  ions; local wastewater treatment plant; cleaning of drains; textile enterprises; carbon nanotubes.

**Abstract:** The adsorption capacity of bentonite modified with carbon nanotubes (CNT) and fired at a temperature of 550 °C was studied. Adsorption isotherms of  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{2+}$  ions by CNT-modified bentonite are plotted as functions of  $C_p$  concentrations under static conditions. It is shown that the bentonite fraction with a granule size of 0.10...0.99 mm has the highest adsorption efficiency. Studies of the process of adsorption of  $\text{Cu}^{2+}$  ions on CNT-modified bentonite showed that it is described by the Freundlich isotherm, while the process of adsorption of  $\text{Fe}^{2+}$  ions on the same bentonite can be represented in terms of the Langmuir isotherm. An improved local wastewater treatment plant for a textile enterprise is proposed, which, as one of the main elements, includes an adsorption filter loaded with CNT-modified bentonite. The effectiveness of wastewater treatment of a textile enterprise has been confirmed by production tests.

---

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