

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ СОРБЕНТОВ НА ОСНОВЕ БЕНТОНИТОВЫХ ГЛИН ДЛЯ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ВОДЫ

Кошелев А. В., Веденева Н. В., Заматырина В. А.,
Тихомирова Е. И., Скиданов Е. В.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY FOR OBTAINING SORBENTS BASED ON BENTONITE CLAYS FOR WATER PURIFICATION SYSTEMS

Koshelev A. V., Vedeneva N. V., Zamatyrina V. A., Tichomirova E. I., Skidanov E. V.

Аннотация

Введение: статья посвящена технологии создания сорбентов на основе бентонитовых глин. Актуальность разработки определяется возрастающим интересом к созданию новых экологически безопасных сорбентов из природных алюмосиликатов. Однако сдерживающим фактором широкого использования бентонитов для очистки воды является отсутствие эффективных технологий гранулирования, поскольку глинистые минералы подвержены в водных средах эффекту диспергирования. **Методы и материалы:** для обоснования возможности применения разработанной технологии гранулирования бентонита, а также полученных образцов сорбентов в процессе водоподготовки, у гранул были изучены минералогический состав методом рентгенофазового анализа, проведен анализ удельной поверхности, пористости (объем пор, распределение пор по радиусу) методом сорбции и капиллярной конденсации газов, определены их химическая и механическая стойкости. После исследования физических свойств оценивали сорбционную емкость образцов в отношении цветных и мутных растворов, а также растворов, содержащих тяжелые металлы. **Результаты:** подробный анализ физических и химических свойств разработанных сорбентов показал, что разработанные сорбенты соответствуют требованиям ГОСТ и эффективны для использования, как в качестве самостоятельного фильтрующего материала, так и составляющей в системах водоочистки.

Ключевые слова: сорбенты, бентонитовые гранулы, сорбционная емкость, водоочистка, алюмосиликаты.

Введение

Подготовка воды для питьевого и промышленного водоснабжения принципиально отличается от других областей химической технологии: процессы водоподготовки протекают в больших объемах воды и при очень малых количествах растворенных веществ [5]. Применение адсорбентов природного происхождения крайне ограничено в связи с высокими требованиями к фильтрующим зернистым материалам [7]. В настоя-

Abstract

Introduction: the article is devoted to the technology of creating sorbents based on bentonite clays. The urgency of development is determined by the growing interest in the creation of new environmentally friendly sorbents from natural aluminosilicates. However, a deterrent to the widespread use of bentonites for water purification is the lack of efficient granulation technologies, since clay minerals are susceptible to dispersing in aqueous media. **Methods and materials:** to substantiate the possibility of using the developed technology of granulation of bentonite, as well as the obtained samples of sorbents in the course of water preparation, their mineralogical composition was studied by X-ray phase analysis, the specific surface area, porosity (pore volume, pore radius distribution) was analyzed by sorption and capillary condensation of gases, chemical and mechanical durability of granules was determined. After studying the physical properties, the sorption capacity of the samples was evaluated for color and turbid solutions, as well as solutions containing heavy metals. **Results:** a detailed analysis of the physical and chemical properties of the developed sorbents showed that they meet the requirements of Russian National Standard and are effective for use both as an independent filtering material and as a component in water treatment systems.

Keywords: sorbents, bentonite granules, sorption capacity, water purification, aluminosilicates.

щее время активно разрабатываются научные основы технологий обработки воды алюмосиликатными материалами природного происхождения, обладающих уникальными адсорбционными свойствами. К таким адсорбентам относятся бентонитовые глины, состоящие в основном из монтмориллонита [9, 10].

Бентонитовые глины с доисторических времен использовались для очистки вина, масел, воды. Они не токсичны и имеют чрезвычайно

развитую поверхность, что обуславливает значительную адсорбционную емкость, т. е. способность активно поглощать из растворов различные вещества. Сдерживающим фактором широкого использования природных бентонитовых сорбентов для очистки питьевой воды и промстоков является отсутствие эффективных технологий гранулирования, поскольку глинистые минералы подвержены в водных средах эффекту пептизации, т. е. диспергированию [6].

Целью настоящей работы являлось создание экологически чистой технологии гранулированных сорбентов из бентонита, исследование их строения и физико-химических свойств.

Как известно, для бентонитовых глин (монтмориллонита) характерна слоистая кристаллическая структура (3-слойная), основанная на Al-Fe-Mg-октаэдрической сетке, заключенной между кремнекислородными тетраэдрами (структура TOT) с толщиной силикатного слоя 0,94 нм [8, 14]. Одна элементарная ячейка монтмориллонита образована 20 атомами кислорода и 4 гидроксильными группами, что составляет 8 силикатных тетраэдров и четыре Al-содержащих октаэдра [8, 17]. В межслоевом пространстве находятся обменные катионы (Na^+ , K^+ или Ca^{2+}) и молекулы воды, препятствующие слипанию слоев. В монтмориллоните заряд сосредоточен в октаэдрических слоях и распределяется по всем атомам кислорода в структуре. Обычно недостаток положительного заряда составляет от 0,4 до 1,2 \bar{e} на одну элементарную ячейку Si_8O_{20} [3], который при переводе на катионообменную емкость соответствует 0,5–1,5 мг-экв./г. Обычно обменная емкость монтмориллонитов составляет примерно 0,7–1,0 мг-экв./г. Обменный комплекс монтмориллонита в основном представлен ионами Na^+ и Ca^{2+} , находящимися в пространстве между силикатными слоями. Другим источником обменных центров являются слабокислые гидроксильные группы (Si-OH) и основные (Al-OH) на боковых гранях и ребрах, которые в зависимости от pH участвуют в ионном обмене. Например, наличие OH^- групп обуславливает у слоистых минералов способность к анионному обмену [12, 14, 15].

Наряду с ионным обменом, для бентонитовых глин характерна физическая и молекулярная сорбция. Физическая сорбция обусловлена на-

личием избыточного отрицательного заряда на гранях кристаллов и поверхностных гидроксидных групп кислого и основного характера, способных к ионизации. При молекулярной сорбции сорбируемые вещества располагаются между плоскостями пакетов, разрушая первоначальные аквакомплексы, не изменяя строения самих слоев. Таким образом, наличие таких активных центров, как обменные катионы, гидроксильные группы, а также активация бентонитовых глин позволяет значительно расширить практическое применение слоистых силикатов для очистки водных сред за счет модифицирования их поверхности [2, 11].

Методы и материалы

Объектами исследования являлись бентонит Даш-Салахлинского месторождения производства СП «АзРПИ» и гранулированные сорбенты на его основе, полученные на лабораторном оборудовании НПП «ЛИССКОН» (г. Саратов).

Гранулы требуемого качества получали из бентонита при пропускании хорошо перемешанной глины с щелочным водным раствором (pH 10–11) через лабораторный экструдер с соответствующей фильерной головкой. В результате экструзионной формовки получали цилиндрические гранулы диаметром 0,5–3 мм и высотой 1–3 мм, которые подвергались температурному диапазону от 400 до 800 °С. Для дальнейшего проведения исследований использовались гранулы диаметром 0,5–2 мм и высотой не более 2 мм.

Площадь удельной поверхности, пористости (микро-, мезопористость), объема пор, распределения пор по размерам определяли методом сорбции и капиллярной конденсации газов с помощью анализатора сорбции газов NOVA 4200e фирмы Quantachrome.

Для определения минералогического состава образцов был проведен рентгенофазовый анализ объектов. Съемка дифрактограмм проводилась на дифрактометре ДРОН-5, работающем на $\text{Fe}_{K\alpha}$ -излучении. Интервал съёмки по углам отражения составлял 10–80°.

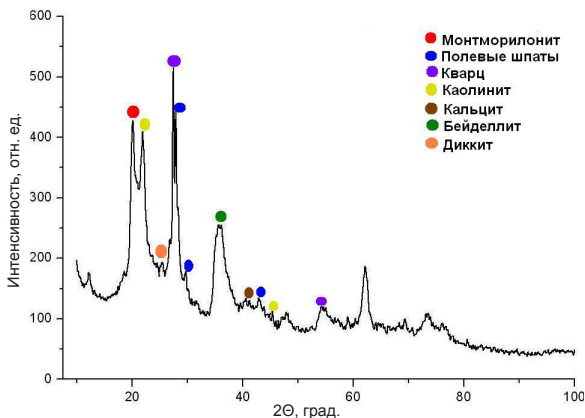
Определение химической и механической стойкости гранул полученных сорбентов осуществлялось по ГОСТ Р 51641–2000 «Материалы фильтрующие зернистые. Общие технические условия» на встряхивающем аппарате АВУ-6с [7]. Для определения химической стой-

кости материала проводили химический анализ кислотной, щелочной и нейтральной вытяжек после выдержки в течение одних суток проб в статических условиях. Механическая прочность гранулированного материала определялась его измельчаемостью и истираемостью.

Результаты и обсуждение

Минералогический состав образцов

Согласно полученным данным рентгенофазового анализа исследуемые образцы гранул, отожженных при различной температуре, обладают сходным минералогическим составом. Термообработка образцов практически не влияет на минералогический состав и структуру гранулированного материала, а с ростом температуры обжига происходит небольшое увеличение интенсивности пиков, что свидетельствует о кристаллизации и обезвоживании фаз. На рисунке представлена дифрактограмма гранулированного образца бентонита, термообработанного при температуре 600 °С. Монтмориллонит (Ca, Na...) (Mg, Al, Fe)₂ [(Si, Al)₄O₁₀](OH)₂·nH₂O иден-



Рентгеновская дифрактограмма образца бентонита (t = 600 °С в течении 1 часа)

тифицирован по рефлексу с величиной угла $2\theta = 22,01^\circ$. Также в бентоните присутствуют каолинит $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$, его полиморфная модификация — диксит, полевые шпаты $K[AlSi_3O_8]$ — $Na[AlSi_3O_8]$ — $Ca[Al_2Si_2O_8]$, кварц SiO_2 , бейделлит $(Na,Ca)_{0,3}Al_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$, кальцит $CaCO_3$.

Порометрический анализ образцов

Результаты определения пористости бентонитовой глины и сорбентов на ее основе представлены в табл. 1.

Из данных таблицы видно, что наибольшей удельной поверхностью обладал исходный порошок бентонита (образец № 1). Повышение температуры обжига приводит к значительному снижению площади поверхности, а также увеличению процентного содержания макропор с радиусом 10–52 нм.

Химическая и механическая стойкость

Для определения химической и механической стойкости образцы гранул массой по 100 г помещали в стеклянные колбы вместимостью 250 см³ и наливали в них по 150 см³ дистиллированной воды. Колбы с исследуемым сорбентом, залитые водой и закрытые пробками, встряхивались в непрерывном режиме 24 часа на устройстве АВУ-6 со скоростью 120 встряхиваний в минуту. После высушивания сорбент рассеивался на ситах 0,5 и 0,25 мм. Прошедшие сито 0,5 мм и оставшиеся на сите 0,25 мм гранулы характеризуют измельчаемость, а прошедшие сито 0,25 — истираемость. Полученные данные приведены в табл. 2.

Установлено положительное влияние увеличения температуры термообработки на механическую прочность гранул, что связано с испарением всей кристаллизационной воды и струк-

Таблица 1

Пористая структура образцов бентонитовой глины после высокотемпературного обжига

| Образец | Удельная поверхность S, м ² /г | Общий объем пор V _{пор} , см ³ /г | Распределение пор по радиусам, % | | | |
|--------------------------------|---|---|----------------------------------|------------|------------|--------------|
| | | | 1,5–2,0 нм | 2,0–4,0 нм | 4,0–8,0 нм | 10,0–52,0 нм |
| № 1 исходный порошок бентонита | 51 | 0,061 | 9 | 21 | 21 | 49 |
| № 2 обжиг t = 550 °С | 37 | 0,092 | 6 | 16 | 23 | 55 |
| № 3 обжиг t = 600 °С | 36 | 0,096 | 6 | 17 | 23 | 54 |
| № 4 обжиг t = 650 °С | 35 | 0,100 | 5 | 13 | 25 | 57 |
| № 5 обжиг t = 700 °С | 26 | 0,090 | 4 | 14 | 24 | 58 |
| № 6 обжиг t = 800 °С | 12 | 0,031 | 5 | 15 | 24 | 56 |

Таблица 2

Показатели механической прочности гранул сорбента

| Образец | Истираемость, % (норма ≤ 0,5) | Измельчаемость, % (норма ≤ 4,0) |
|------------------------|----------------------------------|------------------------------------|
| № 2 обжиг $t = 550$ °С | 0,45 | 2,70 |
| № 3 обжиг $t = 600$ °С | 0,25 | 2,20 |
| № 4 обжиг $t = 650$ °С | 0,25 | 2,00 |
| № 5 обжиг $t = 700$ °С | 0,10 | 1,20 |
| № 6 обжиг $t = 800$ °С | 0,0 | 1,00 |
| № 7 обжиг $t = 400$ °С | 1,80 | 6,30 |

турной воды. Однако под воздействием более высокой температуры (свыше 700 °С) в гранулах наблюдается значительное снижение значений удельной поверхности (табл. 1), тем самым снижается сорбционная емкость, что делает менее целесообразным практическое применение получаемых гранул. Проводить обжиг при температуре менее 550 °С также не целесообразно, так как образцы не обладают достаточной прочностью из-за неполного выхода кристаллизационной воды. Таким образом, экспериментально установленная оптимальная температура обжига находится в интервале 550–650 °С

Химическую стойкость определяли на примере бентонитовых гранул, полученных при температуре обжига 600 °С согласно ГОСТ 51641–2000 [7], помещая испытуемый сорбент на 24 часа в различные среды: дистиллированную воду (ДВ), растворы натрия хлористого (р-р NaCl) с массовой долей 0,05 %, соляной кислоты (р-р HCl) с массовой долей 0,017 %, натриевой щелочи (р-р NaOH) с массовой долей 0,02 %, гипохлорита кальция (р-р Ca(OCl)₂) с массовой концентрацией активного хлора 30 мг/дм³ [7].

В каждом растворе (вытяжке) определяли перманганатную окисляемость, содержание кремниевой кислоты, сухого остатка, алюминия и железа по ГОСТ Р51232. Вытяжка дистиллированной водой является контрольной. Прирост показателей вычисляют как разность между показателями, определенными в растворе и контрольной вытяжке.

Полученные экспериментальные данные по сухому остатку приведены в табл. 3. Норматив по значению прироста сухого остатка — до 20 мг прироста.

Таблица 3

Экспериментальные данные по сухому остатку (СО)

| Показатель | р-р NaCl | р-р NaOH | р-р HCl | р-р Ca(OCl) ₂ |
|-------------------|----------|----------|---------|--------------------------|
| Масса СО, мг | 25,0 | 33,0 | 38,0 | 34,0 |
| Масса СО в ДВ, мг | 19,0 | 19,0 | 19,0 | 19,0 |
| Прирост, мг | 6,0 | 14,0 | 19,0 | 15,0 |

В табл. 4 приведены данные по определению перманганатной окисляемости. Максимальное значение по приросту окисляемости — 10 мг/дм³.

В табл. 5 приведены данные по определению алюминия и железа (III). Максимально допустимый прирост суммарной массовой концентрации алюминия и железа в пересчете на оксиды (III) — 2 мг/дм³.

В табл. 6 приведены данные по определению в растворах концентрации кремниевой кислоты. Максимально допустимый прирост — 10 мг/дм³.

Проведенные испытания на механическую и химическую прочность сорбентов показали

Таблица 4

Экспериментальные данные по приросту окисляемости

| Показатель | р-р NaCl | р-р NaOH | р-р HCl | р-р Ca(OCl) ₂ |
|--------------------------|----------|----------|---------|--------------------------|
| Окисляемость исх., мгО/л | 8,3 | 9,3 | 12,1 | 7,5 |
| Окисляемость в ДВ, мгО/л | 6,6 | 6,6 | 6,6 | 6,6 |
| Прирост, мгО/л | 1,6 | 2,7 | 5,5 | 0,9 |

Таблица 5

Экспериментальные данные по определению алюминия и железа

| Показатель | NaCl | NaOH | HCl | р-р Ca(OCl) ₂ |
|---------------------------------|------|------|-----|--------------------------|
| Конц. исх., мг/ дм ³ | 1,6 | 2,2 | 3,2 | 2,7 |
| Конц. в ДВ, мг/ дм ³ | 1,4 | 1,4 | 1,4 | 1,4 |
| Прирост, мг/ дм ³ | 0,2 | 0,8 | 1,8 | 1,3 |

Таблица 6

Экспериментальные данные по определению кремниевой кислоты

| Показатель | NaCl | NaOH | HCl | р-р Ca(OCl) ₂ |
|---------------------------------|------|------|-----|--------------------------|
| Конц. исх., мг/ дм ³ | 3,8 | 10,2 | 5,6 | 6,5 |
| Конц. в ДВ, мг/ дм ³ | 0,7 | 0,7 | 0,7 | 0,7 |
| Прирост, мг/ дм ³ | 3,1 | 9,5 | 4,8 | 5,8 |

удовлетворительные результаты (табл. 2–5), что говорит о возможном использовании бентонитовых гранул в качестве зернистых загрузок для водоочистки [7].

Анализ эффективности сорбции цветных и мутных вод

После определения физических свойств бентонитовых гранул был выполнен анализ эффективности сорбции в отношении цветных и мутных растворов. Как известно, природная вода обладает цветностью, т. е. окраской в тот или иной цвет. Обуславливающие цветность воды комплексные соединения железа и гумусовые вещества находятся в природных водах во взвешенном состоянии (нерастворимые вещества почвы) и истинно растворенном состоянии. Их содержание в морских водах достигает 0,1–3 мг/л, а в речных — 20 мг/л. Цветность природных вод колеблется от единиц до несколько сотен градусов, для некоторых регионов РФ этот показатель достигает 200 градусов (по Pt-Co шкале) [13].

При исследовании сорбционной емкости образцов использовали растворы гуматов разной концентрации, обуславливающих цветность от 24 до 350 градусов. Пятикратный объем модельного раствора пропускали через фильтрующую загрузку. Далее измеряли оптическую плотность в исходном растворе и фильтрате. Результаты измерений представлены в табл. 7.

Степень извлечения гумусовых веществ из раствора составила 68,3–97,7 %. Выявлено также, что с ростом концентрации веществ в растворе сорбционная активность растет. Установлено, что температура обжига несущественно влияет на уровень адсорбции гумусовых веществ.

Аналогично цветности оценивали степень извлечения взвешенных частиц из воды (табл. 8). В качестве модели высокомутных растворов использовали разведенный в дистиллированной воде порошок мелкодисперсного бентонита.

Установлено, что эффективность фильтрации составляла в среднем 97 %, несмотря на значительное превышение показателя мутности мо-

Таблица 7

Сорбционная активность исследуемых образцов в отношении цветности

| Образец | Показатель | Цветность модельного раствора, град | | | | | | | | ПДК |
|---|--------------|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| | | 350 | 300 | 280 | 225 | 190 | 100 | 60 | 24 | |
| № 1 исходный порошок бентонита | Цветн., град | 15 | 12 | 10 | 20 | 10 | 15 | 19 | 4 | 20 |
| | Сорбция, % | 95,6 | 96,0 | 99,6 | 91,1 | 94,7 | 85,0 | 68,3 | 83,3 | |
| № 2 обжиг $t = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ | Цветн., град | 8 | 14 | 9 | 8 | 8 | 14 | 19 | 5 | |
| | Сорбция, % | 97,7 | 95,3 | 96,7 | 96,4 | 95,8 | 86,0 | 68,3 | 71,2 | |
| № 3 обжиг $t = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ | Цветн., град | 13 | 9 | 15 | 19 | 7 | 18 | 20 | 5 | |
| | Сорбция, % | 96,3 | 97,0 | 94,6 | 91,6 | 96,3 | 82,0 | 65 | 71,2 | |
| № 4 обжиг $t = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ | Цветн., град | 15 | 10 | 13 | 20 | 8 | 19 | 15 | 8 | |
| | Сорбция, % | 95,7 | 96,7 | 95,4 | 91,1 | 95,8 | 81,0 | 75,0 | 66,7 | |
| № 5 обжиг $t = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ | Цветн., град | 10 | 12 | 15 | 10 | 9 | 20 | 17 | 5 | |
| | Сорбция, % | 97,1 | 96,0 | 94,6 | 95,6 | 95,2 | 80,0 | 71,7 | 71,2 | |
| № 6 обжиг $t = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ | Цветн., град | 17 | 11 | 19 | 25 | 7 | 17 | 17 | 2 | |
| | Сорбция, % | 95,1 | 96,3 | 93,2 | 88,9 | 96,3 | 83,0 | 71,7 | 91,7 | |

Таблица 8

Степень извлечения взвешенных частиц из воды исследуемыми образцами бентонитовых гранул

| Концентрация модельного раствора | Мутность, ЕМФ/Степень очистки, % | | | |
|--|----------------------------------|-----------|-----------|----------|
| | 150 | 100 | 50 | ПДК, ЕМФ |
| Образец № 2, $t = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 2,4/98,40 | 2,2/97,80 | 2,4/95,20 | 2,6 |
| Образец № 3, $t = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 2,0/99,67 | 2,0/98,00 | 1,7/96,60 | 2,6 |
| Образец № 4, $t = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 2,0/98,67 | 2,2/97,80 | 2,0/96,00 | 2,6 |
| Образец № 5, $t = 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 2,5/98,33 | 2,3/97,70 | 2,4/95,20 | 2,6 |
| Образец № 6, $t = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 2,6/98,27 | 2,5/97,50 | 2,5/95,00 | 2,6 |

Таблица 9

Значения максимальной сорбционной емкости бентонитовых гранул

| Сорбируемый элемент | Образец | A_{∞} , мг/г |
|---------------------|-------------------|---------------------|
| Свинец | № 2, $t = 550$ °C | 2,12 |
| | № 3, $t = 600$ °C | 1,89 |
| | № 4, $t = 650$ °C | 1,52 |
| | № 5, $t = 700$ °C | 1,38 |
| | № 6, $t = 800$ °C | 1,22 |
| Железо | № 2, $t = 550$ °C | 3,20 |
| | № 3, $t = 600$ °C | 2,25 |
| | № 4, $t = 650$ °C | 1,57 |
| | № 5, $t = 700$ °C | 1,28 |
| | № 6, $t = 800$ °C | 1,23 |
| Мышьяк | № 2, $t = 550$ °C | 1,98 |
| | № 3, $t = 600$ °C | 1,57 |
| | № 4, $t = 650$ °C | 1,57 |
| | № 5, $t = 700$ °C | 0,93 |
| | № 6, $t = 800$ °C | 0,61 |

дельного раствора относительно средних показателей. Согласно литературным данным средние значения мутности воды в р. Волге составляют 1,4–1,6 мг/л (3,64–4,16 ЕМФ), в период паводка мутность возрастает до 4–6 мг/л (10,4–15,6 ЕМФ) [16]. Отметим, что с увеличением мутности раствора повышается сорбционная активность бентонитовых гранул [4]. Лучшими адсорбционными свойствами по отношению к взвешенным веществам обладали образцы, отожженные при 600 °C (образец № 3).

Оценка сорбционных свойств в отношении микроэлементов

Для оценки сорбционных свойств бентонитовых гранул в отношении тяжелых металлов и мышьяка использовали растворы нитрата свинца (II), хлорида железа (II) и арсената натрия. Определение сорбционной емкости проводилось согласно Borden и Giese [1]. Результаты рассчитанной сорбционной емкости для исследуемых элементов представлены в табл. 9.

Отмечено, что высокотемпературный обжиг снижает адсорбционную активность сорбентов. Лучшей адсорбционной емкостью обладали гранулы, отожженные при температуре 550 °C. Сорбционная емкость бентонитовых гранул по отношению к железу выше, чем к свинцу или арсенатам. Эффективность очистки от тяжелых металлов составила 37–87 %.

Заключение

Разработана технология получения гранулированного сорбента для очистки воды из природного бентонита методом экструзии с последующим обжигом.

Установлено, что термообработка образцов практически не влияет на минералогический состав и структуру сорбента, положительно влияет на механическую прочность гранул.

Установлено также, что оптимальная температура обжига составляет 550–650 °C, так как при более низких температурах обжига образцы не обладают достаточной прочностью, а под воздействием более высоких температур происходит снижение удельной поверхности, что негативно сказывается на сорбционных свойствах гранул.

Проведенные испытания механической и химической стойкости показали, что полученный адсорбционный материал соответствует требованиям ГОСТ Р 51641–2000 «Материалы фильтрующие зернистые. Общие технические условия» [7].

В результате исследований сорбционных свойств гранул доказана их способность извлекать из воды взвешенные частицы, а также очищать от гумусовых веществ.

Гранулы достаточно эффективно сорбируют ионы тяжелых металлов из воды. Сорбционная емкость по отношению к железу выше, чем к свинцу или ионам мышьяка.

Таким образом, разработанный сорбент может рекомендоваться к использованию как самостоятельный фильтрующий материал для обезжелезивания и очистки высокомутных и цветных вод, так и для адсорбционно-мембранных систем водоподготовки.

Благодарности

Работа выполнена в рамках Госзадания РФ 2017 № 5.3922.2017/ПЧ «Разработка экологически чистых энергосберегающих технологий комплексной очистки вод, загрязненных в результате природных и техногенных чрезвычайных ситуаций, для станций локальной водоподготовки в проблемных регионах Российской Федерации».

Литература

1. Borden, D., Giese, R. F. (2001). Baseline studies of the clay minerals society source clays: cation exchange capacity

measurements by the ammonia-electrode method. *Clays Clay Miner*, vol. 49, pp. 444–445.

2. Lin, S. H., Juang, R. S. (2002). Heavy metal removal from water by sorption using surfactant-modified montmorillonite. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 92, № 3, pp. 315–326.

3. Браун, Г. (1965). Рентгеновские методы изучения и структура глинистых минералов. М.: МИР, 307 с.

4. Веденева, Н. В., Кошелев, А. В., Заматырина, В. А. (2017). Оценка эффективности сорбции веществ гумусовой природы на модельных растворах. В: *Экологические проблемы промышленных городов*, сс. 424–428.

5. Беликов, С. Е. (ред.) (2007). Водоподготовка: справочник. М.: Аква-Терм, 240 с.

6. Годовиков, А. А. (1983). Минералогия. М.: Недра, 460 с.

7. Госстандарт России (2000). ГОСТ Р 51641–2000. Материалы фильтрующие зернистые. Общие технические условия. М.: Стандартинформ, 13 с.

8. Карнаухов, А. П. (1999). Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов. Новосибирск: Наука, Сиб. Предприятие РАН, 470 с.

9. Кирсанов, Н. В. (1981). Генетические типы и закономерности распространения месторождений бентонитов в СССР. М.: Недра, 214 с.

10. Комаров, В. С. (1997). Адсорбенты: вопросы теории, синтеза и структуры. Минск: Беларуская навука, 287 с.

11. Комов, Д. Н., Никитина, Н. В., Казаринов, И. А. (2015). Сорбенты на основе природных бентонитов, модифицированные полигидроксокациями железа (III) и алюминия методом «золь-гель». *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология*, т. 15, № 2, сс. 27–34.

12. Куковский, Е. Г. (1966). Особенности строения и физико-химические свойства глинистых минералов. Киев: Наукова думка, 128 с.

13. Орлов, А. А., Спирин, В. Ф. (2006). Гигиенические вопросы сельского водоснабжения в современных условиях. В: *Экология человека, гигиена и медицина окружающей среды на рубеже веков: состояние и перспективы развития*, Москва, сс. 375–379.

14. Осипов, В. И., Соколов, В. Н., Румянцев, Н. А. (1989). Микроструктура глинистых пород. М.: Недра, 211 с.

15. Осипов, В. И., Соколов, В. Н. (2013). Глины и их свойства. Состав, строение и формирование свойств. М.: ГЕОС, 576 с.

16. Рафф, П. А., Селюков, А. В., Байкова, И. С. (2011). Технология контактного осветления воды в условиях Волжского водозабора г. Казани. *Водоснабжение и санитарная техника*, № 6, сс. 25–29.

17. Тарасевич, Ю. И. (1975). Адсорбция на глинистых минералах. Киев: Наукова думка, 351 с.

References

1. Borden, D., Giese, R. F. (2001). Baseline studies of the clay minerals society source clays: cation exchange capacity measurements by the ammonia-electrode method. *Clays Clay Miner*, vol. 49, pp. 444–445.

2. Lin, S. H., Juang, R. S. (2002). Heavy metal removal from water by sorption using surfactant-modified montmorillonite. *Journal of Hazardous Materials*, vol. 92, № 3, pp. 315–326.

3. Braun, G. (1965). Рентгеновские методы изучения и структура глинистых минералов [X-ray methods of studying and the structure of clay minerals]. М.: МИР, 307 p. (in Russian).

4. Vedeneva, N. V., Koshelev, A. V., Zamatyrina, V. A. (2017). Ocenka ehffektivnosti sorbcii veshchestv gumusovoj prirody na model'nyh rastvorah [Estimation of sorption efficiency of substances of humic nature on model solutions]. In: *Ekologicheskie problemy promyshlennyh gorodov*, pp. 424–428. (in Russian).

5. Belikov, S. E. (ed.) (2007). Vodopodgotovka: spravocchnik [Water treatment: Handbook]. М.: Akva-Term, 240 p. (in Russian).

6. Godovikov, A. A. (1983). Mineralogiya [Mineralogy]. М.: Nedra, 460 p. (in Russian).

7. Gosstandart Rossii (2000). GOST R 51641–2000. Materialy fil'truyushchie zernistyje. Obshchie tekhnicheskie usloviya [Filtering granular materials. General specifications]. М.: Standartinform, 13 p. (in Russian).

8. Karnauhov, A. P. (1999). Adsorbciya. Tekstura disper-snyh i poristyh materialov [Adsorption. Texture of dispersed and porous materials]. Novosibirsk: Nauka, Sib. Predpriyatye RAN, 470 p. (in Russian).

9. Kirsanov, N. V. (1981). Geneticheskie tipy i zakonomernosti rasprostraneniya mestorozhdenij bentonitov v SSSR [Genetic types and regularities of the distribution of bentonite deposits in the USSR]. М.: Nedra, 214 p. (in Russian).

10. Komarov, V. S. (1997). Adsorbenty: voprosy teorii, sinteza i struktury [Adsorbents: questions of theory, synthesis and structure]. Minsk: Belaruskaya navuka, 287 p. (in Russian).

11. Komov, D. N., Nikitina, N. V., Kazarinov, I. A. (2015). Sorbenty na osnove prirodnyh bentonitov, modifitsirovannye poligidroksokationami zheleza (III) i alyuminiya metodom “zol'-gel” [Sorbents based on natural bentonites, modified with iron (III) polyhydroxocations and aluminum by the “sol-gel” method]. *Izvestiya Saratovskogo universiteta. Novaya seriya. Seriya: Himiya. Biologiya. Ekologiya*, vol. 15, № 2, pp. 27–34. (in Russian).

12. Kukovskij, E. G. (1966). Osobennosti stroeniya i fiziko-himicheskie svoystva glinistykh mineralov [Features of the structure and physical and chemical properties of clay minerals]. Kiev, Naukova dumka, 128 p. (in Russian).

13. Orlov, A. A., Spirin, V. F. (2006). Gigenicheskie voprosy sel'skogo vodosnabzheniya v sovremennyh usloviyah [Hygienic issues of rural water supply in modern conditions]. In: *Ekologiya cheloveka, gigiena i medicina okruzhayushchej sredy na rubezhe vekov: sostoyanie i perespektivy razvitiya*, М., pp. 375–379. (in Russian).

14. Osipov, V. I., Sokolov, V. N., Rumyancev, N. A. (1989). Mikrostruktura glinistykh porod [Microstructure of clay rocks]. М.: Nedra, 211 p. (in Russian).

15. Osipov, V. I., Sokolov, V. N. (2013). Gliny i ih svoystva. Sostav, stroenie i formirovanie svoystv [Clays and their properties. Composition, structure and formation of properties]. М.: GEOS, 576 p. (in Russian).

16. Raff, P. A., Selyukov, A. V., Bajkova, I. S. (2011). Tekhnologiya kontaktnogo osvetleniya vody v usloviyah Volzhskogo vodozabora g. Kazani [Technology of contact clarification of water in the conditions of the Volga water intake in Kazan]. *Water Supply and Sanitary Technique*, № 6, pp. 25–29. (in Russian).

17. Tarasevich, Yu. I. (1975). Adsorbciya na glinistyh mineralah [Adsorption on clay minerals]. Kiev: Naukova dumka, 351 p. (in Russian).

Авторы

Кошелев Алексей Васильевич, канд. техн. наук
ФГУП «ГосНИИОХТ»
E-mail: koshelevsarator@gmail.com

Веденева Наталия Владимировна, канд. биол. наук
Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю. А.
E-mail: vnv09@yandex.ru

Заматырина Валентина Алексеевна, канд. техн. наук
Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю. А.
E-mail: zam-valentina@yandex.ru

Тихомирова Елена Ивановна, д-р биол. наук,
профессор
Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю. А.
E-mail: tichomirova_ei@mail.ru

Скиданов Евгений Викторович
ООО НПП «Лисскон»
E-mail: mail@lisskon.ru

Authors

Koshelev Aleksey Vasilievich, PhD in Engineering
FSUE “GosNIIOKhT”
E-mail: koshelevsarator@gmail.com

Vedeneva Nataliia Vladimirovna, PhD in Biology
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU)
E-mail: vnv09@yandex.ru

Zamatyrina Valentina Alekseevna, PhD in Engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU)
E-mail: zam-valentina@yandex.ru

Tichomirova Elena Ivanovna, Doctor of Biological Sciences, Professor,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (SSTU)
E-mail: tichomirova_ei@mail.ru

Skidanov Eugeny Viktorovich
LLC LNS “Lisscon”
E-mail: mail@lisskon.ru