

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 628.16:541.183:504

DOI: 10.31675/1607-1859-2018-20-1-148-159

*О.Д. ЛУКАШЕВИЧ<sup>1</sup>, Н.Т. УСОВА<sup>2</sup>,*

*<sup>1</sup>Томский государственный архитектурно-строительный университет,*

*<sup>2</sup>Национальный исследовательский*

*Томский государственный политехнический университет*

## СОРБЕНТ ИЗ ЖЕЛЕЗИСТОГО ШЛАМА ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Разработан и экспериментально проверен способ получения гранулированного сорбента для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов (на примере меди и цинка). В состав сырьевой смеси для получения сорбционного материала входят железистый шлам – отход водоподготовки, жидкое стекло, оксид кальция, вода. Выбрано оптимальное массовое соотношение компонентов состава сырьевой смеси, обеспечивающее высокую прочность и водостойкость образцов сорбента: 10 – железистого шлама (в сухом состоянии), 1 – оксида кальция, 14 – жидкого стекла и 4 – воды. Исследованы режимы приготовления образцов, и подобраны оптимальные условия термообработки, при которых обеспечивается прочность и сохраняется достаточная пористость и удельная поверхность. Представлены результаты исследования физико-механических свойств образцов гранулированного сорбента. Определены статическая обменная ёмкость сорбента и степень извлечения полученными образцами сорбентов ионов меди и цинка из модельных растворов их солей. Результаты исследования вносят вклад в решение задачи повышения эффективности замкнутых водохозяйственных систем. Их внедрение позволит одновременно утилизировать многотоннажные отходы водоподготовки и обеспечить эффективными дешевыми сорбентами сооружения для очистки сточных вод.

**Ключевые слова:** железистый шлам; сорбент; жидкое стекло; водоочистка; утилизация отходов; тяжелые металлы; адсорбция.

**Для цитирования:** Лукашевич О.Д., Усова Н.Т. Сорбент из железистого шлама для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 1. С. 148–159.

*O.D. LUKASHEVICH<sup>1</sup>, N.T. USOVA<sup>2</sup>,*

*<sup>1</sup>Tomsk State University of Architecture and Building,*

*<sup>2</sup>National Research Tomsk Polytechnic University*

## IRON SLUDGE SORBING AGENT FOR SEWAGE PURIFICATION FROM HEAVY METAL IONS

The paper suggests a method of synthesizing a granulated sorbing agent for sewage purification from ions of heavy metals (copper and zinc). The raw material mixture includes iron sludge

produced by water treatment, liquid glass, caustic limestone, and water. The optimum mass ratio of 10:1:14:4 (dry iron sludge, calcium oxide, liquid glass, water) is selected for the mixture composition which provides the high strength and water resistance of sorbing agent. The paper considers the preparation and the optimum thermal treatment conditions which ensure the strength, appropriate porosity and specific surface of specimens. Research results are obtained for mechanical-and-physical properties of synthesized granular sorbing agent. The static exchange capacity and the extraction degree of copper and zinc ions from model saline solutions are detected herein. Research results contribute to the problem of the efficiency improvement of closed water utilization systems and can be used in utilization of large-tonnage water treatment wastes, thereby providing sewage purification facilities with inexpensive sorbing agents.

**Keywords:** iron sludge; sorbing agent; liquid glass; water purification; heavy metals; waste treatment; adsorption.

**For citation:** Lukashevich O.D., Usova N.T. Sorbent iz zhelezistogo shlama dlya ochistki stochnykh vod ot ionov tyazhelykh metallov [Iron sludge sorbing agent for sewage purification from heavy metal ions]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2018. V. 20. No. 1. Pp. 148–159. (rus)

### Введение

Среди методов очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов особое место занимают сорбционные. Несмотря на достаточно большой перечень природных, искусственных и синтетических материалов, предлагаемых промышленностью для использования в качестве твердых сорбентов, нельзя утверждать, что этот рынок полностью сформирован. Анализ современных российских и зарубежных публикаций по данной тематике показывает, что поиск новых эффективных сорбентов, полученных по ресурсосберегающим технологиям, – актуальная научно-практическая проблема [1–5].

Представляет большой практический интерес вовлечение в качестве сырья для производства сорбентов тех отходов, которые в большом объеме образуются при очистке природных вод от железа. В работе [6] приведены следующие данные, характеризующие количество высокожелезистых шламов, образующихся за год на крупных фильтровальных сооружениях юга Томской области: Томский водозабор – 423 т; водозаборы г. Северска – 91,6 т; водозабор Томского Академгородка – 21,9 т (в пересчете на сухой остаток). Около  $\frac{1}{3}$  массы в этих отходах составляют железосодержащие минералы, включающие оксиды, гидроксиды, соли двух- и трехвалентного железа. Эти шламы до настоящего времени не находят применения. Их сбрасывают в канализацию, в водоемы и водотоки, на рельеф, помещают на иловые корты. И захоронение, и складирование на отведенных площадках, и сброс сточных вод – все это наносит большой экологический ущерб экосистемам прилегающих территорий.

Ранее были изучены основные физико-химические свойства железистых шламов (ЖШ), влияние электро- и температурной обработки на их состав и структуру [7–9]. Экспериментально была показана высокая поглощающая способность гетита  $\alpha\text{-FeOOH}$  –  $\alpha$ -оксогидроксида железа (основного компонента ЖШ) в процессах извлечения ионов меди, свинца, цинка [7, 10–13]. Однако использование порошкообразного гетита затруднительно с технологической позиции. Представляет интерес создать из ЖШ удобный в обращении прочный водостойкий гранулированный сорбент с высокими эксплуатационными характеристиками.

Представленные в настоящей работе результаты исследования объединяют два эколого-ориентированных направления: расширение ассортимента дешевых отечественных сорбентов для очистки сточных вод и утилизация шламовых отходов станций обезжелезивания.

Целью исследования является разработка способа получения дешевого сорбента из железистого шлама; изучение его физико-химических, физико-механических характеристик и сорбционной способности в отношении ионов тяжелых металлов при очистке сточных и технологических вод.

### Материалы и методики эксперимента

В качестве сырья для получения образцов сорбентов были использованы легкодоступные недорогие компоненты:

- СаО – оксид кальция, химический реактив марки «химически чистый»;
- жидкое стекло по ГОСТ 13078–81 с силикатным модулем 3, плотностью 1460 кг/м<sup>3</sup>;
- железистый шлам, выделенный из сточной воды после промывки фильтра на водозаборе № 1 г. Северска, с содержанием железа (по Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), в пересчете на сухое вещество, 38,40 % масс.

Удельная поверхность образцов исследовалась методом Брунауэра – Эммета – Теллера по низкотемпературной адсорбции азота.

Объем пор образцов сорбентов определяли по предельной адсорбции бензола. Для этого образцы взвешивали на аналитических весах, затем помещали на фарфоровую подставку в эксикатор, нижняя часть которого была заполнена бензолом с добавкой 4 мл н-бутилового спирта, способствующего испарению бензола. Образцы выдерживали в среде растворителя (8–24 ч) до тех пор, пока их масса не достигала постоянной величины.

Дальнейшие расчеты производились по формуле, см<sup>3</sup>/г

$$\sum V_n = \frac{m_2 - m_1}{m_1 \cdot \rho}.$$

где  $\sum V_n$  – суммарный объем пор;  $\rho$  – плотность бензола (0,876 кг/дм<sup>3</sup> при температуре 20 °С);  $m_1$  и  $m_2$  – масса образца до и после насыщения парами бензола, г.

Оценку адсорбционных свойств исследуемых образцов проводили в статических условиях при контактировании сорбента с водными растворами солей металлов. Использовали модельные растворы, имитирующие сточные воды: раствор CuSO<sub>4</sub> с концентрацией ионов меди 11,6 мг/дм<sup>3</sup> и раствор ZnSO<sub>4</sub> с концентрацией ионов цинка 24 мг/дм<sup>3</sup>.

Обменную емкость сорбента рассчитывали по формуле, мг/г

$$OE_{\text{стат}} = \frac{(C_{\text{исх}} - C_{\text{равн}})V}{g},$$

где  $C_{\text{исх}}$  и  $C_{\text{равн}}$  – исходная и равновесная концентрации ионов тяжелых металлов в растворах их солей, мг/дм<sup>3</sup>;  $V$  – объем модельного раствора соли тяжелого металла, дм<sup>3</sup>;  $g$  – навеска сорбента, г.

Концентрации ионов меди и цинка в модельных растворах до и после суточного контакта с образцами сорбентов ( $C_{исх}$  и  $C_{равн}$ ) определяли методом инверсионной вольтамперометрии. Использовали анализатор ТА-Lab с тремя электрохимическими ячейками (НПП «Томьаналит»). Определение проводили с использованием ртутно-пленочного электрода, потенциал анодного пика меди и цинка на фоне муравьиной кислоты составлял  $-0,1$  и  $-0,9$  В соответственно. Концентрации ионов металлов определяли методом добавок с использованием аттестованных смесей.

### Обсуждение результатов исследования

**Физико-химические свойства железистых шламов.** На основе литературных данных и ранее полученных авторами результатов экспериментов по физико-химическому изучению свойств систем «вода – оксиды железа – гидроксиды железа» (модельных коллоидных оксидно-гидроксидных систем и реальных суспензий и паст в виде шламов, взятых на станциях водоподготовки) при различных условиях их обработки были сделаны следующие обобщения, послужившие основой для исследований, результаты которых представлены в настоящей работе.

При выделении из водных растворов оксидно-гидроксидных соединений железа образуются рыхлые осадки с развитой поверхностью. Присутствие оксидов и гидроксидов железа существенно влияет на сорбционные свойства тех природных сред, в состав которых они входят (почвы, глины, болотные руды) [14]. Результаты экспериментов по изучению адсорбции тяжелых металлов на оксидах и гидроксидах железа представлены в работах [5, 8, 9, 15]. Показано, что характер сорбции зависит от таких факторов, как активная реакция среды (рН), концентрация адсорбента, ионная сила раствора, количество активных центров на поверхности адсорбата, сопутствующие примеси (в первую очередь лигандообразующие, поскольку образование устойчивых комплексных соединений с участием ионов тяжелых металлов приводит к их десорбции) [7, 10–13, 15]. Ультразвуковое воздействие оказывает иницирующее влияние на формирование сорбентов и на адсорбционные процессы [10, 16].

В зависимости от способа получения и условий последующего температурного воздействия, гидроксиды железа (II, III) образуют те или иные оксидно-гидроксидные формы, соответствующие целому ряду минералов. Изменения в аморфно-кристаллической структуре влияют на физико-химические характеристики сухих ЖШ, состав которых в общем виде можно представить общей формулой  $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ . Среди них ведущее место занимает гетит; меньшая доля принадлежит магнетиту, ферригидриту, лепидокрокиту, гематиту и другим минералам. При высушивании на воздухе при  $20-25$  °С теряется часть физически адсорбированной воды, содержащейся в ЖШ. Анализ кривых ДТА показал, что прочно связанная вода удаляется, главным образом, при нагревании в интервале температур  $110-300$  °С. Высокотемпературная обработка приводит к дальнейшей потере воды, увеличению доли гематита и маггемита. Исследуемый железистый шлам – полидисперсный аморфно-кристаллический порошок. Электронно-микроскопическими исследованиями установлено, что размеры большинства частиц составляют  $0,030-0,035$  мкм.

Часть из них объединены в кластеры и имеют размеры от 0,40 до 1,70 мкм. Наноразмерные частицы обеспечивают высокую удельную поверхность, связанную с особенностями макро- и микроструктуры шлама как дисперсной системы. С позиций строительного материаловедения исследуемый объект характеризуется рыхлозернистой, конгломератной и мелкопористой составляющими макроструктуры. Микроструктура включает как кристаллическую, так и аморфную формы оксигидроксидных частиц и сопутствующих примесей, в основном карбонатов и силикатов.

На рис. 1 показаны результаты изучения влияния температуры обработки образцов воздушно-сухого железистого шлама на величину их удельной поверхности. При повышении температуры наблюдается уменьшение удельной поверхности, т. к. происходит сжатие пор, сращивание отдельных частиц в более крупные новообразования. Эти процессы протекают необратимо. При температуре выше 250 °С удельная поверхность уменьшается до критически низкой величины, что неприемлемо для эффективных сорбентов.

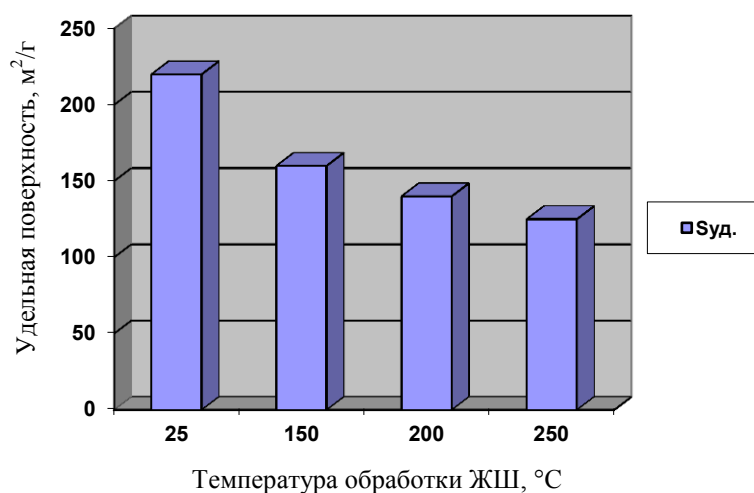


Рис. 1. Изменение удельной поверхности железистого шлама при температурной обработке

Общий объем пор при термообработке повышался (рис. 2), что можно объяснить эффектом газообразования при нагревании ЖШ. Роль порообразователей, вероятно, играют примеси органических веществ, карбонатов и гидрокарбонатов природного происхождения, входящих в состав ЖШ.

Таким образом, термообработка изменяет физико-химические показатели, характеризующие сорбционные свойства ЖШ. Хотя с увеличением температуры удельная поверхность образцов снижается, общая пористость увеличивается. При этом часть частиц, находившихся в аморфных формах, переходит в кристаллические, что делает более удобным использование компактного порошка ЖШ в качестве сорбента в технологическом процессе. Эксперименты позволили выбрать температуру 200 °С как оптимальную для обработки ЖШ при изготовлении сорбентов.

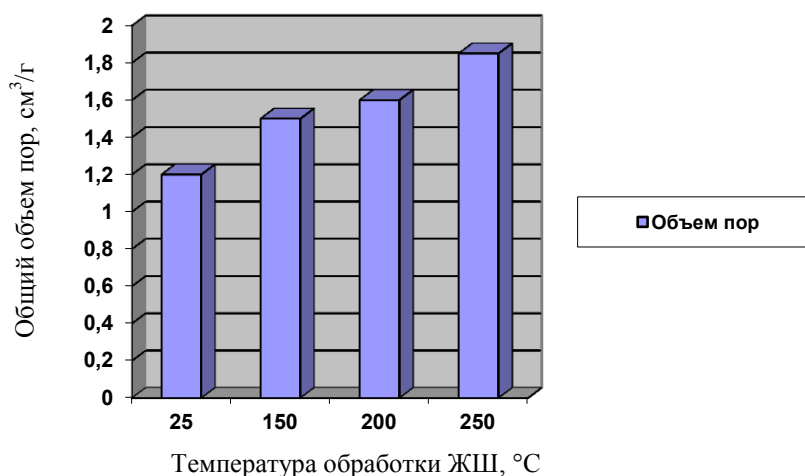


Рис. 2. Изменение общего объема пор образца порошка железистого шлама при температурной обработке

**Приготовление сорбентов из железистых шламов и исследование их физико-механических свойств.** Ранее был разработан способ получения композиционного материала, особенностью которого было использование железосодержащего шлама, песка и, в качестве клеящей субстанции, жидкого стекла в присутствии кальцийсодержащих компонентов –  $\text{CaO}$  или  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [17]. Установлено, что прочность и водостойкость композита обусловлены наличием водостойких натрий-кальциевых гидросиликатов и кремнегеля, которые образуются благодаря обменной реакции извести с жидким стеклом. Гидросиликаты с кремнегелем играют роль «связки» между частицами шлама и песка в композиционном материале. Естественно предположить, что описанный процесс будет продуктивен для получения сорбционных материалов, т. к. натрий-кальциевые гидросиликаты могут проявлять не только клеящие и структурирующие, но также и адсорбционные свойства.

В работе использовали сухой железосодержащий шлам станции водочистки Северского водозабора № 1. Из ЖШ, негашеной извести, жидкого стекла и воды, взятых в разных соотношениях (табл. 1), были приготовлены образцы с разным составом компонентов смеси. Для этого навески шлама и оксида кальция тщательно перетирали и смешивали в агатовой ступке, затем при постоянном перемешивании добавляли порциями жидкое стекло и воду.

Формование образцов проводили при помощи ручного пресса. Полученные гранулы в форме коротких цилиндров (таблеток) выдерживали в воздушной среде при комнатной температуре 3–24 ч, после чего подвергали термообработке (табл. 1). Термообработку одной части полученных гранул проводили в сушильном шкафу при температуре 200 °C в течение 40 мин, другую часть подвергали термообработке в СВЧ-печи.

Проверку полученных гранул сорбентов на водостойкость проводили выдерживанием последних в воде в течение 7 сут. Прочность образцов оценивали по стандартным методикам.

Таблица 1

**Влияние состава исходной смеси  
на прочностные свойства образцов сорбентов,  
полученных с использованием железосодержащего шлама,  
жидкого стекла и извести**

Состав сырьевой смеси для получения сорбента. Масса, г					Режим обработки образцов		Прочностные свойства образцов
№ образца	ЖШ	СаО	Жидкое стекло	H <sub>2</sub> O	Время выдерживания на открытом воздухе, ч	Условия термообработки	
1	10	1	14	4	3	40 мин в печи при 200 °С	Прочные водостойкие
2	10	1	14	4	3	10 мин в СВЧ-печи	Прочные водостойкие
3	10	1	14	4	3	5 мин в СВЧ-печи	Прочные водостойкие
4	10	1	14	4	3	3 мин в СВЧ-печи	Достаточно прочные водостойкие
5	10	1	10	4	24	40 мин в печи при 200 °С	Достаточно прочные водостойкие
6	10	0,5	5	5	24	40 мин в печи при 200 °С	Хрупкие неводостойкие
7	10	0,1	7	2	24	40 мин в печи при 200 °С	Очень хрупкие неводостойкие
8	10	–	7	–	3	Без обработки	Очень хрупкие неводостойкие

Установлено, что по прочностным характеристикам сорбенты – композиционные материалы из железистого шлама (образцы 1–5) – удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 51641–2000 «Материалы фильтрующие зернистые. Общие технические условия». Достаточная величина истираемости, хорошая водостойкость характеризуют образцы 1–3. При малом содержании СаО и жидкого стекла (образцы 6, 7) не образуется достаточное количество натрий-кальциевых гидросиликатов, что приводит к получению хрупких неводостойких материалов. Образец 8, полученный смешиванием шлама и жидкого стекла в отсутствии добавки извести и воды, оказался непригодным для целевого применения.

Были определены величины суммарного объема пор  $\sum v_n$  у полученных гранул, что показано в табл. 2. Наибольший объем пор 0,13 см<sup>3</sup>/г имеют образцы с составом сырьевой смеси, соответствующим № 1, приведенному в табл. 1.

Таблица 2

## Результаты определения суммарного объема пор гранул сорбента

№ образца	Режим термообработки	Время выдерживания, ч	$m_1$ , г	$m_2$ , г	$m_1 \cdot \rho$ , г <sup>2</sup> /см <sup>3</sup>	$\sum v_n$ , см <sup>3</sup> /г
1	В муфельной печи при 200 °С 40 мин	3	0,495	0,550	0,434	0,127
2	В СВЧ-печи 10 мин	3	0,470	0,510	0,412	0,097
3	В СВЧ-печи 5 мин	3	0,510	0,540	0,447	0,067
4	В СВЧ-печи 3 мин	3	0,400	0,425	0,3507	0,071
5	В муфельной печи при 200 °С 40 мин	24	0,415	0,445	0,364	0,082

Сравнение пористости образцов, полученных при разных условиях, указывает на сложный характер взаимосвязей между составом сырьевой смеси и режимами дальнейшей обработки; для обоснованных выводов требуются дополнительные исследования. Вместе с тем очевидно, что по сравнению с порошком железистого шлама (рис. 2) образцы гранулированного сорбента значительно уступают по объему пор и, соответственно, должны в меньшей степени проявлять сорбционные свойства, что и подтвердилось на следующем этапе проведенного исследования.

**Изучение сорбции ионов цинка и меди из сточных вод на модельных растворах.** Изучена сорбционная способность гранулированного сорбента состава № 1 в сравнении с порошком ЖШ в отношении тяжелых металлов (на примере ионов цинка и меди). В колбы вместимостью 200 мл помещали по 80–100 мл каждого модельного раствора, добавляли навеску сорбента (0,4–0,6 г). Смесь перемешивали в течение нескольких минут и оставляли на сутки для установления равновесия в системе, после чего сорбент отфильтровывался, а раствор подвергался количественному определению оставшихся в нем ионов тяжелых металлов. На основе выявленных концентраций меди и цинка рассчитывали статическую обменную ёмкость сорбента  $OE_{\text{стат}}$ . Полученные результаты представлены в табл. 3.

Таблица 3

## Результаты определения статической обменной ёмкости сорбента и степени извлечения ионов тяжелых металлов из модельных растворов их солей

Сорбент	Масса сорбента, г	Модельный раствор		$C_{\text{исх}}$ , мг/дм <sup>3</sup>	$C_{\text{равн}}$ , мг/дм <sup>3</sup>	$OE_{\text{стат}}$ , мг/г	Степень извлечения ионов $Zn^{2+}$ и $Cu^{2+}$ , %
		Вещество	Объем, мл				
ЖШ (порошок)	0,415	ZnSO <sub>4</sub>	100	24,0	0,10	5,7	99,6
ЖШ (порошок)	0,410	CuSO <sub>4</sub>	100	11,6	0,11	2,8	99,0
Гранулы сорбента состава № 1	0,545	ZnSO <sub>4</sub>	80	24,0	3,2	3,1	53,5
Гранулы сорбента состава № 1	0,557	CuSO <sub>4</sub>	100	11,6	6,5	0,9	44,0



Исследуемые образцы характеризуются достаточно высокими значениями обменной емкости и степени извлечения ионов металлов. При сорбции цинка из раствора  $\text{ZnSO}_4$  обменная емкость составила: 5,7 мг/г для порошка ЖШ и 3,1 для гранул сорбента. В процессе сорбции меди как порошок ЖШ, так и гранулированный сорбент проявили меньшую активность: величина обменной емкости оказалась 2,8 и 0,9 мг/г соответственно. Более высокая  $OE_{\text{стат}}$  и степень извлечения ионов  $\text{Zn}^{2+}$  и  $\text{Cu}^{2+}$  у порошка ЖШ объясняется участием в сорбционном процессе всей его поверхности, в то время как у гранул сорбента – только верхнего слоя, а часть внутренних пор не была задействована.

Величина pH оказывает существенное влияние на адсорбционные процессы. Снижение эффективности очистки модельных растворов от меди и цинка в кислой среде связано с образованием растворимых соединений металлов. Увеличение pH ведет к образованию основных солей и гидроксидов металлов. По литературным данным [1], диапазон  $\text{pH} = 6\text{--}6,5$  является оптимальным для сорбции ионов  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$ .

Исследуемый гранулированный сорбционный материал, в соответствии со способом его получения, имеет явно выраженный основной характер. В экспериментах при помещении образцов в воду или в модельные растворы создавалась щелочная среда (величина  $\text{pH} 8\text{--}9$ ) за счет частичного вымывания ионов натрия и кальция из сорбционного материала. В результате, помимо адсорбции тяжелых металлов сорбентом, происходило химическое осаждение  $\text{Zn}(\text{OH})_2$ ,  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ,  $(\text{ZnOH})_2\text{SO}_4$ ,  $(\text{CuOH})_2\text{SO}_4$ . Появилась возможность образования крупных растворимых аквагидрокомплексов металлов. Их сорбция затруднена ввиду стерического фактора. По-видимому, это одна из причин, которой объясняется более низкая степень извлечения  $\text{Cu}^{2+}$  и  $\text{Zn}^{2+}$  гранулами сорбента по сравнению с порошком ЖШ.

В связи с подщелачивающей способностью гранулированного сорбента возникла необходимость проверки его химической стойкости. Этот показатель важен для сорбентов и фильтрующих материалов, предназначенных для очистки воды. Установлено, что при длительном контакте с щелочным, нейтральным и кислым растворами материал сорбента сохраняет стабильность, в раствор не переходят вредные примеси.

Проведенные единичные эксперименты показали, что при переходе от статического режима к динамическому, когда модельный раствор пропускается с постоянной скоростью через слой сорбента, pH постепенно снижается до околонеutralной величины. Установлено, что после первых двух часов процесс сорбции металлов стабилизируется.

Полученные гранулированные сорбенты позволяют очищать загрязненную растворенными соединениями цинка и меди воду до нормативов, принятых для воды хозяйственно-питьевого назначения:  $\text{Zn}^{+2} - 1,0$ ;  $\text{Cu}^{+2} - 0,5$  мг/л. При использовании сорбентов для очистки сточных вод в цветной металлургии, в химической промышленности, на гальванических производствах возможно уменьшение отрицательного воздействия тяжелых металлов на почвы, в которых ПДК составляют 23,0 и 3,0 мг/кг для цинка и меди соответственно.

### Выводы

1. Выполнена комплексная оценка физико-химических и сорбционных свойств железистых шламов – отходов водоподготовки и приготовленных из них композиционных материалов.

2. Предложен способ утилизации железистых шламов – отходов водоподготовки для получения гранулированных композиционных сорбционных материалов, применимых для очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов. Степень извлечения ионов цинка и меди составила соответственно 53,5 и 44,0 %.

3. Использование результатов исследования позволит одновременно утилизировать железистые отходы водоподготовки, улучшить экологическое состояние природных вод и почв, обеспечить эффективными дешевыми сорбентами сооружения для очистки сточных вод.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Климов, Е.С. Природные сорбенты и комплексоны в очистке сточных вод / Е.С. Климов, М.В. Бузаева. – Ульяновск : УлГТУ, 2011. – 201 с.
2. *Sorption of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions: A Review* / G. Zhao, X. Wu, X. Tan, X. Wang // *The Open Colloid Science Journal*. – 2011. – № 4. – P. 19–31.
3. *Физико-химические аспекты загрязнения и очистки поверхностных вод от тяжелых металлов и нефтепродуктов природными сорбентами* / О.А. Давыдова, А.А. Лукьянов, Е.С. Ваганов [и др.] // *Известия Самарского научного центра РАН*. – 2014. – Т. 16. – № 4. – С. 523–525.
4. Пимнева, Л.А. Очистка природных и сточных вод от цветных металлов / Л.А. Пимнева // *Успехи современного естествознания*. – 2011. – № 5. – С. 99–100.
5. Benjamine, M.M. Multiple-site adsorption of Cd, Cu, Zn and Pb on amorphous iron oxyhydroxide / M.M. Benjamine // *J. Colloid Interface Sci.* – 1981. – V. 79. – № 1. – P. 209–221.
6. *Природно-техногенные минеральные новообразования на водозаборах Томской области* / И.В. Вологодина, Е.М. Дутова, Д.С. Покровский [и др.] // *Вестник СПбГУ. Сер. 7*. – 2015. – Вып. 3. – С. 58–72.
7. Станкевич, К.С. Выделение и утилизация отходов водоподготовки Томского водозабора / К.С. Станкевич, Н.Т. Усова, О.Д. Лукашевич // *Использование и охрана природных ресурсов в России*. – 2010. – № 3. – С. 12–15.
8. Лукашевич, О.Д. Экологические проблемы обработки и утилизации осадков сточных вод / О.Д. Лукашевич, Н.Т. Усова, И.В. Барская // *Экология промышленного производства*. – 2007. – № 3. – С. 10–15.
9. Лукашевич, О.Д. Комплексное решение технологических проблем очистки сточных вод и утилизации железосодержащих осадков станций водоподготовки / О.Д. Лукашевич, И.В. Барская // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. – 2009. – № 1. – С. 153–158.
10. *Влияние ЭДТА на сорбцию тяжелых металлов гетитом* / А.С. Антонова, Т.Н. Кропачева, М.В. Дидик, В.И. Корнев // *Вестник Удмуртского университета*. – 2013. – № 1. – С. 3–10.
11. Abdus-Salam, N. The influence of pH and adsorbent concentration on adsorption of lead and zinc on a natural goethite / N. Abdus-Salam, F.A. Adekola // *Af. J. Sci. Tech.* – 2005. – V. 6. – № 2. – P. 55–66.
12. Kooner, Z.S. Prediction of adsorption of divalent heavy metals at the goethite/water interface by surface complexation modeling / Z.S. Kooner, Ch.D. Cox, J.L. Smoot // *Environ. Toxicol. Chem.* – 1995. – V. 14. – № 12. – P. 2077–2083.
13. Weirich, D.A. Influence of Organic Ligands on the Adsorption of Copper, Cadmium, and Nickel on Goethite : dis. ... dr. nat. sci. – Zürich, 2000. – 184 p.
14. Водяницкий, Ю.Н. Гидроксиды железа в почвах (обзор литературы) / Ю.Н. Водяницкий // *Почвоведение*. – 2010. – № 11. – С. 1341–1352.

15. Погадаева, Н.И. Извлечение нефтяных примесей и фенола из водных сред сорбентами на основе железосодержащего осадка водоочистки : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Томск : Институт химии нефти СО РАН, 2010. – 23 с.
16. Шарапова, А.В. Применение ультразвука для интенсификации сорбционной очистки сточных вод / А.В. Шарапова // Вестник Нижегородского ун-та им. Н.И. Лобачевского. – 2013. – № 1 (1). – С. 109–111.
17. Усова, Н.Т. Водостойкие безавтоклавные силикатные строительные материалы на основе песка, жидкостеклоподобных композиций и шламов водоочистки / Н.Т. Усова, В.А. Лотов, О.Д. Лукашевич // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 2. – С. 276–284.

## REFERENCES

1. Klimov E.S., Buzaeva M.V. Prirodnye sorbenty i kompleksy v oчитke stochnykh vod [Natural sorbing agents in sewage purification]. Ulyanovsk: UIGTU Publ., 2011. 201 p. (rus)
2. Zhao G., Wu X., Tan X., Wang X. Sorption of heavy metal ions from aqueous solutions. A Review. *The Open Colloid Science Journal*. 2011. No. 4. Pp. 19–31.
3. Davydova O.A., Luk'janov A.A., Vaganov E.S., et al. Fiziko-himicheskie aspekty zagryazneniya i oчитki poverhnostnykh vod ot tzhazhelykh metallov i nefteproduktov prirodnyimi sorbentami [Physicochemical aspects of surface water pollution and purification from heavy metals and oil products using natural sorbing agents]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra RAN*. 2014. V. 16. No. 4. Pp. 523–525. (rus)
4. Pimneva L.A. Oчитka prirodnnykh i stochnykh vod ot cvetnykh metallov [Purification of natural and waste water from non-ferrous metals]. *Uspehi sovremennogo estestvoznaniya*. 2011. No. 5. Pp. 99–100. (rus)
5. Benjamine M.M. Multiple-site adsorption of Cd, Cu, Zn and Pb on amorphous iron oxyhydroxide. *J. Colloid Interface Sci*. 1981. V. 79. No. 1. P. 209–221.
6. Vologdina I.V., Dutova E.M., Pokrovskii D.S., et al. Prirodno-tehnogennyye mineral'nye novobrazovaniya na vodozaborakh Tomskoi oblasti [Natural and man-made mineral new formations at water intakes of the Tomsk region]. *Vestnik SPbGU. Ser. 7*. 2015. No. 3. Pp. 58–72. (rus)
7. Stankevich K.S., Usova N.T., Lukashevich O.D. Vydelenie i utilizatsiya otkhodov vodopodgotovki Tomskogo vodozabora [Separation and utilization of water treatment waste of Tomsk water intake]. *Ispol'zovanie i ohrana prirodnnykh resursov v Rossii*. 2010. No. 3. Pp. 12–15. (rus)
8. Lukashevich O.D., Usova N.T., Barskaya I.V. Ekologicheskie problemy obrabotki i utilizatsii osadkov stochnykh vod [Ecological problems of treatment and utilization of sewage sludge]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva*. 2007. No. 3. Pp. 10–15. (rus)
9. Lukashevich O.D., Barskaya I.V. Kompleksnoe reshenie tekhnologicheskikh problem oчитki stochnykh vod i utilizatsii zhelezosoderzhashchikh osadkov stantsii vodopodgotovki [Complex solution of technological problems of wastewater treatment and utilization of iron-containing precipitations at water treatment plants]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2009. No. 1. Pp. 153–158. (rus)
10. Antonova A.S., Kropacheva T.N., Didik M.V., Kornev V.I. Vliyanie EDTA na sorbtsiyu tyazhelykh metallov getitom [EDTA effect on goethite absorption of heavy metals]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta*. 2013. No. 1. Pp. 3–10.
11. Abdus-Salam N., Adekola F.A. The influence of pH and adsorbent concentration on adsorption of lead and zinc on a natural goethite. *African Journal of Science Technology*. 2005. V. 6. No. 2. Pp. 55–66.
12. Kooner Z.S., Cox Ch.D., Smoot J.L. Prediction of adsorption of divalent heavy metals at the goethite/water interface by surface complexation modeling. *Environ. Toxicol. Chem*. 1995. V. 14. No. 12. Pp. 2077–2083.
13. Weirich D.A. Influence of organic ligands on the adsorption of copper, cadmium, and nickel on goethite. DSc Thesis. Zürich, 2000. 184 p.
14. Vodyanitskii Yu.N. Gidroksidy zheleza v pochvakh (obzor literatury) [Iron hydroxides in soils (literature review)]. *Pochvovedenie*. 2010. No. 11. Pp. 1341–1352. (rus)

15. *Pogadaeva N.I.* Izvlechenie nefjtjanyh primesej i fenola iz vodnyh sred sorbentami na osnove zhelezosoderzhashhego osadka vodoочистki [Extraction of oil impurities and phenol from aqueous media by sorbents based on iron-containing sludge of water treatment. PhD Abstract]. Tomsk: Institut himii nefti SO RAN, 2010. 23 p. (rus)
16. *Sharapova A.V.* Primenenie ul'trazvuka dlja intensivifikacii sorbcionnoj очистki stочnyh vod [Application of ultrasound for the intensification of sorption purification of waste water]. *Vestnik Nizhegorodskogo un-ta im. N.I. Lobachevskogo*. 2013. No. 1. Pp. 109–111. (rus)
17. *Usova N.T., Lotov V.A., Lukashevich O.D.* Vodostoikie bezavtoklavnye silikatnye stroitel'nye materialy na osnove peska, zhidkostekol'nykh kompozitsii i shlamov vodoочистki [Water-resistant non-autoclave silicate construction materials based on sand, liquid-glass compositions and water treatment sludge]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 2. Pp. 276–284. (rus)

#### Сведения об авторах

*Лукашевич Ольга Дмитриевна*, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, odluk@yandex.ru

*Усова Надежда Терентьевна*, канд. техн. наук, Национальный исследовательский Томский государственный политехнический университет, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30, usovant@tpu.ru

#### Authors Details

*Olga D. Lukashevich*, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, odluk@yandex.ru

*Nadezhda T. Usova*, PhD, National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Ave., 634050, Tomsk, Russia, usovant@tpu.ru