



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-87-94>
УДК 543.39: 665.081

Поступила 08.04.2024
Received 08.04.2024

ВЛИЯНИЕ КИСЛОТНОЙ ОБРАБОТКИ НА АДсорбЦИОННО-СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЗАГРУЗОК, СОЗДАНЫХ НА ОСНОВЕ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКА

*А. С. ПАНАСЮГИН, Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: nilogaz@tut.by*
*А. Р. ЦЫГАНОВ, Н. П. МАШЕРОВА, Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск, Беларусь, ул. Свердлова, 13а. E-mail: Masherova.Nat@mail.ru*
*Н. Д. ПАВЛОВСКИЙ, Гродненский государственный медицинский университет,
г. Гродно, Беларусь, ул. Горького, 80*
*В. А. ЛОМОНОСОВ, ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»,
г. Минск, Беларусь, ул. Петруся Бровки, 19*

Многие промышленные предприятия используют гальванические процессы, приводящие к образованию вод, содержащих ионы тяжелых металлов, например, хрома, меди, цинка, никеля и др. Такие воды являются опасными источниками загрязнения окружающей среды. Большинство ионов тяжелых металлов относятся к I–II классу опасности, они отличаются канцерогенными, мутагенными свойствами и обладают кумулятивным эффектом.

Анализ литературных данных показал, что имеется положительный опыт применения сталеплавильных шлаков в процессах очистки загрязненных вод различного происхождения от тяжелых металлов.

В работе изучено влияние кислотной активации на адсорбционно-структурные характеристики фильтрующих загрузок, созданных на основе сталеплавильного шлака. Показано, что при взаимодействии некоторых кислот со шлаком на его поверхности образуются новые кристаллографические фазы, а контакт с другими кислотами ведет к выщелачиванию ионов с их переходом в водную фазу. Установлено, что в ходе кислотной активации происходит увеличение удельной поверхности в 5,7–13,2 раза по сравнению с исходным материалом.

Ключевые слова. Сталеплавильный шлак, кислотная обработка, фильтрующие загрузки.

Для цитирования. Панасюгин, А. С. Влияние кислотной обработки на адсорбционно-структурные характеристики фильтрующих загрузок, созданных на основе сталеплавильного шлака / А. С. Панасюгин, А. Р. Цыганов, Н. П. Машерова, Н. Д. Павловский, В. А. Ломоносов // *Литье и металлургия*. 2024. № 3. С. 87–94. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-87-94>.

THE INFLUENCE OF ACID TREATMENT ON THE ADSORPTION-STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF FILTERING MATERIALS CREATED BASED ON STEELMAKING SLAG

*A. S. PANASYUGIN, Belarusian National Technical University Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave.
E-mail: nilogaz@tut.by*
*A. R. TSYGANOV, N. P. MASHEROVA, Belarusian State Technological University,
Minsk, Belarus, 13a, Sverdlova str. E-mail: Masherova.Nat@mail.ru*
N. D. PAVLOVSKY, Grodno State Medical University Grodno, Belarus, 80, Gorkogo str.
*V. A. LOMONOSOV, State Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for
Materials Science, Minsk, Belarus, 19, Petrusa Brovki str.*

Many industrial enterprises use electroplating processes that lead to the formation of water containing heavy metal ions such as chromium, copper, zinc, nickel, and others. Such water is a dangerous source of environmental pollution. Most heavy metal ions belong to hazard classes I–II, they have carcinogenic and mutagenic properties, and have a cumulative effect.

The literature analysis showed that there is positive experience in the use of steelmaking slags in the processes of cleaning contaminated water of various origins from heavy metals.

The study examines the effect of acid activation on the adsorption-structural characteristics of filtering materials created based on steelmaking slag. It is shown that during the interaction of some acids with slag, new crystallographic phases are formed

on its surface, and contact with other acids leads to the leaching of ions and their transition to the aqueous phase. It has been established that during acid activation, the specific surface area increases by 57–132 times compared to the original material.

Keywords. *Steelmaking slag, acid treatment, filtering materials.*

For citation. *Panasyugin A. S., Tsyganov A. R., Masherova N. P., Pavlovsky N. D., Lomonosov V. A. The influence of acid treatment on the adsorption-structural characteristics of filtering materials created based on steelmaking slag. Foundry production and metallurgy, 2024, no. 3, pp. 87–94. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-3-87-94>.*

Введение

В природе для тяжелых металлов не существует надежных механизмов самоочищения. Тяжелые металлы лишь перераспределяются из одного природного источника в другой, взаимодействуя с различными живыми организмами и повсюду оставляя видимые нежелательные последствия этого взаимодействия [1, 2].

Токсическое воздействие тяжелых металлов на человека и животных вызывает изменение системы кроветворения, внутренней секреции; способствует возникновению злокачественных новообразований и нарушению аппарата наследственности. Одновременное присутствие нескольких тяжелых металлов в воде часто приводит к усилению токсичных проявлений на биологические объекты, в том числе и на человека. Так, при одновременном присутствии в воде соединений меди и цинка наблюдается возрастание токсичности в 5 раз. В водных и почвенных системах, имеющих дефицит растворенного кислорода, токсическое влияние тяжелых металлов на микроорганизмы резко повышается [2]. Тяжелые металлы накапливаются микроорганизмами водных объектов и почвы, растениями, далее попадают в корм домашних животных и по естественной пищевой цепочке в организм человека [1, 2].

При неэффективной очистке сточных вод, содержащих тяжелые металлы, последние попадают в природные водоемы. В результате этого возникает ряд экологических проблем: теряется природная способность водоемов к самоочищению; нарушается функционирование активного ила на станциях очистки городских стоков. Большинство промышленных предприятий в крупных городах имеют установки локальной очистки, на которых сточные воды подвергаются лишь частичной очистке, а частично очищенная вода разбавляется и сбрасывается в природные водные объекты.

Поступление металлов в гидросферу может характеризоваться разной интенсивностью, иметь сезонный характер и зависит от различных факторов. Во многих отраслях промышленности, таких, как машиностроение, горно-металлургическая, текстильная, кожевенная, гальванотехническая, химическая и др., в больших масштабах образуются и используются технологические растворы с высоким содержанием металлов-токсикантов. В сточных водах чаще всего присутствуют медь, никель, хром, кадмий и кобальт, свинец. Во всех типах сточных вод независимо от их происхождения присутствуют железо и марганец [3–5].

Существующие методы очистки воды от ионов тяжелых металлов отличаются низкой эффективностью, требуют больших расходов реагентов, электроэнергии и часто приводят к образованию побочных продуктов [3–6]. Содержание тяжелых металлов в сточных водах в растворенном состоянии зависит от температуры воды, общего солесодержания, наличия неорганических и органических лигандов-комплексообразователей, величины pH. Ионы тяжелых металлов в сточных водах часто образуют комплексы с присутствующими там же органическими веществами. Особенно это характерно для гуминовых соединений в щелочной и нейтральной средах.

Несмотря на то что в сточных водах обычно содержатся катионы нескольких металлов, применение специфического или группового осадителя для удаления каждого из них невозможно. В качестве реагентов-осадителей нашли применение гидроксид кальция, сульфид натрия, а также известь.

Применение сульфида натрия обусловлено более глубокой очисткой от тяжелых металлов, это связано с тем, что растворимость сульфидов тяжелых металлов значительно ниже растворимости любых других соединений. В качестве недостатка можно отметить, что осадки сульфидов тяжелых металлов образуют устойчивые коллоидные системы, поэтому для ускорения процессов осаждения в технологическую цепочку вводят дополнительно коагулянты и флокулянты, что приводит к введению дополнительных загрязнений в очищаемые растворы. Использование соединений железа в качестве коагулянта позволяет получать большую гидравлическую прочность и крупность хлопьев, быстро оседающих в отстойниках. К преимуществам этих коагулянтов относятся высокая эффективность соединений железа при низких температурах и более широкая область оптимальных значений pH среды [7–9]. После отделения осадка сточная вода с небольшим содержанием ионов тяжелых металлов может быть возвращена в систему оборотного водоснабжения.

Необходимая доза извести для полного осаждения того или иного металла изменяется в широких пределах и составляет 0,05–0,3 кг/м³.

Анализ литературных данных показал, что имеется положительный опыт применения сталеплавильных шлаков в процессах очистки загрязненных вод различного происхождения от тяжелых металлов [10–12].

По данным рН-метрии, степень перевода соединений металлов в осадок при начальной концентрации 100 мг/л и соответственно степень удаления соединений металлов методом осаждения их в виде гидроксидов, превышающая 99,5%, указаны в табл. 1.

Цель работы заключается в изучении влияния кислотной активации на адсорбционно-структурные характеристики фильтрующих загрузок, созданных на основе сталеплавильного шлака.

Материалы и методы исследования

В качестве исходного материала для модифицирования был использован шлак ОАО «БМЗ», образующийся при производстве стали 45 размером гранул 4–6 мм.

Для активации шлака применяли 0,5 н. растворы кислот при нагреве до 80 °С в течение 3 ч. По мере уменьшения активности кислоты (pK_a) они располагались в следующий ряд: HCl > H₂SO₄ > HNO₃ > H₃PO₄ > CH₃COOH.

Для исследования полученных образцов использовали следующие приборы.

- Сканирующий электронный микроскоп Vega II LMU, предназначенный для изучения топографии поверхности компактных и порошковых материалов, распределения химических элементов и фаз в исследуемых материалах.

- Энергодисперсионный спектрометр Inca 350 сканирующего электронного микроскопа Vega II LMU, предназначенный для анализа химического состава макро- и микрообластей материалов в диапазоне от В до U при концентрациях от 0,2 до 100%, построения карт распределения химических элементов по анализируемой поверхности.

- Волнодисперсионный спектрометр «Спектоскан МАКС-GV», предназначенный для качественного и количественного определения химического состава поверхности материалов в диапазоне концентраций от 0,001 до 100%.

- Сканирующий зондовый микроскоп Solver Pro-M, предназначенный для получения трехмерного изображения поверхности образцов материалов с высоким разрешением.

- Экспресс-анализатор Micromeritics 2200, предназначенный для определения удельной поверхности твердых образцов и тенденций изменения удельной поверхности материалов при различных способах модифицирования.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенных исследований методом волнодисперсионной спектроскопии получены усредненные данные распределения химических элементов в образцах при контакте с растворами кислот, имеющих различную активность (табл. 1).

Таблица 1. Изменение содержания элементов при контакте исходного шлака с растворами кислот, имеющих различную активность

Номер образца	Образец	Элемент, %													
		C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	P	Cl
1	Исходный	8,86	44,0	0,25	1,94	2,34	6,98	0,21	22,15	0,22	0,38	1,73	10,9		
2	HCl	6,59	46,7	0,18	1,03	9,14	12,4		6,70	0,23	0,55	1,83	14,5		0,19
3	H ₂ SO ₄	6,3	48,4	0,04	0,09	0,92	2,70	18,7	22,92	0,07			1,64	0,11	
4	HNO ₃	8,87	42,6	0,15	1,48	4,12	12,7	0,43	3,22	0,25	0,52	1,17	24,5		
5	H ₃ PO ₄	6,90	50,5	0,17	0,71	3,77	4,58	0,08	13,04			0,88	7,69	11,7	
6	Уксусная кислота	6,05	43,3	0,13	1,31	3,63	14,1	0,18	8,49	0,39		2,38	19,5		

На рис. 1 показано распределение в образцах элементов O, Ca, Si, Al, Fe и C, содержание которых претерпело наибольшие изменения в ходе кислотной активации.

В табл. 2 приведены изменения материального баланса элементов при контакте с растворами кислот, имеющих различную активность.

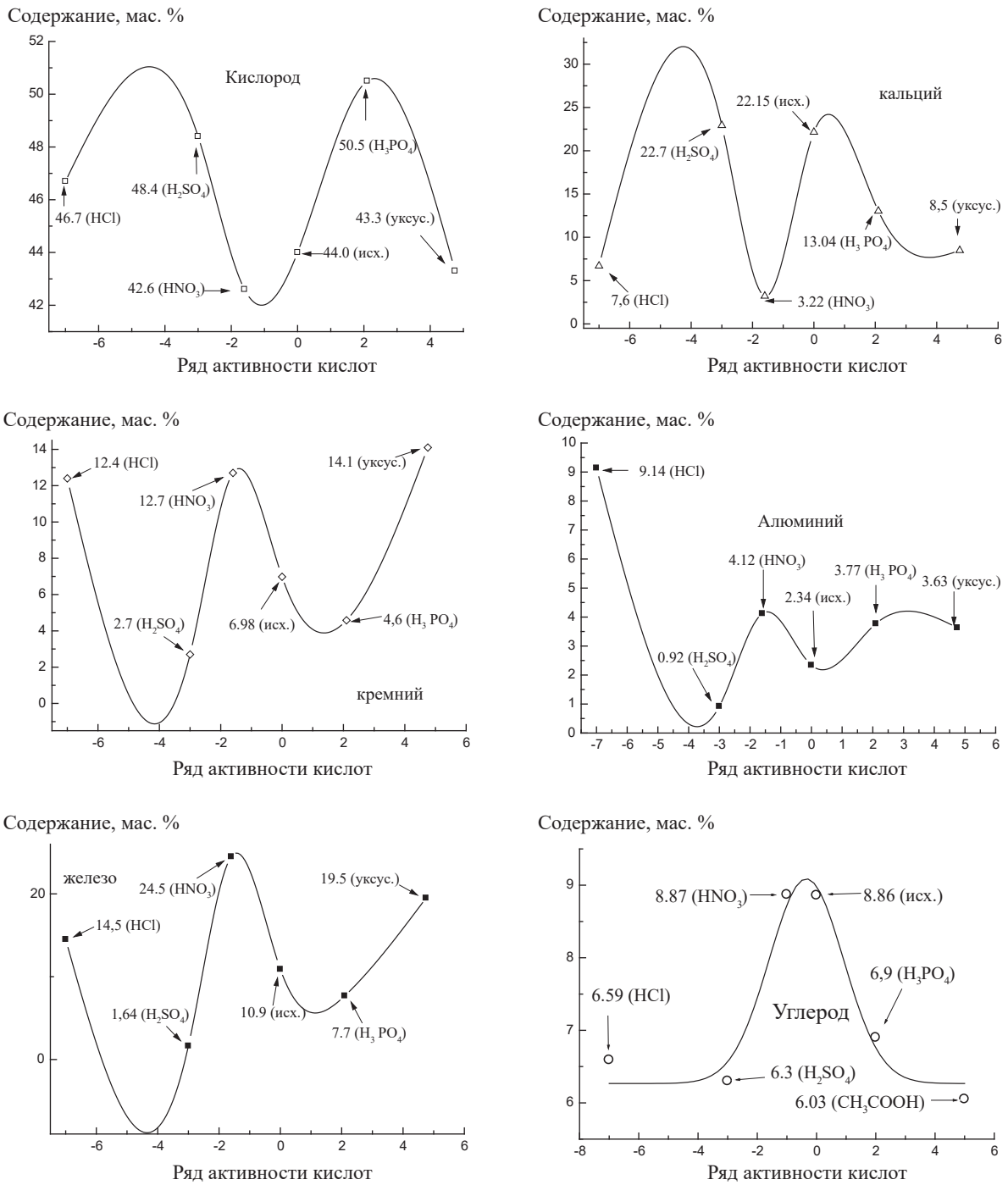


Рис. 1. Распределение элементов (O, Ca, Si, Al, Fe и C) в образцах в зависимости от активности кислот

Таблица 2. Результаты изменения материального баланса элементов при контакте с растворами кислот, имеющих различную активность

Номер образца	Образец	Элемент, %													
		C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	P	Cl
1	Исходный	8.86	44.0	0.25	1.94	2.34	6.98	0.21	22.15	0.22	0.38	1.73	10.9		
2	HCl	- 2,7	+ 2,24	- 0,07	- 0,91	+ 6,8	+ 5,42		- 9,11		+ 0,17	+ 0,1	+ 3,6		0,19
3	H ₂ SO ₄	- 2,56	+ 4,4	- 0,16	- 1,85	- 1,42	- 4,28	+ 18,5	+ 0,77	- 0,15			- 9,26		
4	HNO ₃		+ 2,7	- 0,1	- 0,46	+ 1,8	+ 5,72		- 18,9		+ 0,18	- 0,56	+ 13,6		
5	H ₃ PO ₄	- 1,96	+ 6,5	- 0,08	- 1,23	+ 1,43	- 2,4	- 0,8	- 9,11			- 0,85	- 3,21	+ 11,7	
6	Уксусная кислота	- 2,81	- 0,7	- 0,12	- 0,63	+ 1,29	+ 7,12		- 13,66	+ 0,17		+ 0,65	+ 8,6		

Из таблицы видно, что в зависимости от активности кислот изменение материального баланса элементов протекает специфически.

Так, для углерода характерно уменьшение при контакте со всеми кислотами, кроме азотной кислоты, по сравнению с исходным образцом на 2–3%. Для натрия наблюдается уменьшение в среднем на 0,1%, а содержание магния – на 0,46–1,85%.

При контакте с серной кислотой уменьшение содержания алюминия, кремния, железа составило соответственно 1,42, 4,28 и 9,26%.

Взаимодействие с фосфорной кислотой приводит к уменьшению Si, S, Ca, Mn и Fe соответственно на 2,4, 0,8, 9,11, 0,85 и 3,21%. Контакт с соляной кислотой ведет к уменьшению содержания кальция на 9,11%.

Азотная кислота при взаимодействии вызывает снижение содержания кальция на 18,9% и марганца – на 0,56%. Уксусная кислота вызывает уменьшение содержания кислорода на 0,7% и кальция – на 13,66%.

Для кислорода характерно увеличение на 2,24–6,5%, кроме уксусной кислоты.

Серная кислота ведет к увеличению содержания серы на 18,5%, кальция – на 0,77, фосфорная кислота приводит к увеличению содержания алюминия на 1,43 и фосфора – на 11,7%. Контакт с соляной кислотой увеличивает содержание алюминия на 6,8%, кремния – на 5,42, хрома – на 0,17, марганца – на 0,1, железа – на 3,6 и хлора – на 0,19%.

Азотная кислота приводит к увеличению содержания алюминия на 1,8%, кремния – на 5,72, хрома – на 0,18 и железа – на 13,6%.

Уксусная кислота приводит к увеличению содержания Al на 1,26%, Si – на 7,12, Ti – на 0,17, Mn – на 0,65 и Fe – на 8,6%.

Следует отметить, что при контакте с серной и фосфорной кислотами на поверхности шлака образуются новые кристаллографические фазы – кристаллы гипса в виде «гипсовая роза» и призматические кристаллы апатита.

Согласно данным электронной микроскопии (рис. 2), кристаллы гипса представляют собой фрагменты колец, формирующих структуру «гипсовая роза», призматические кристаллы апатита формируются достаточно четко.

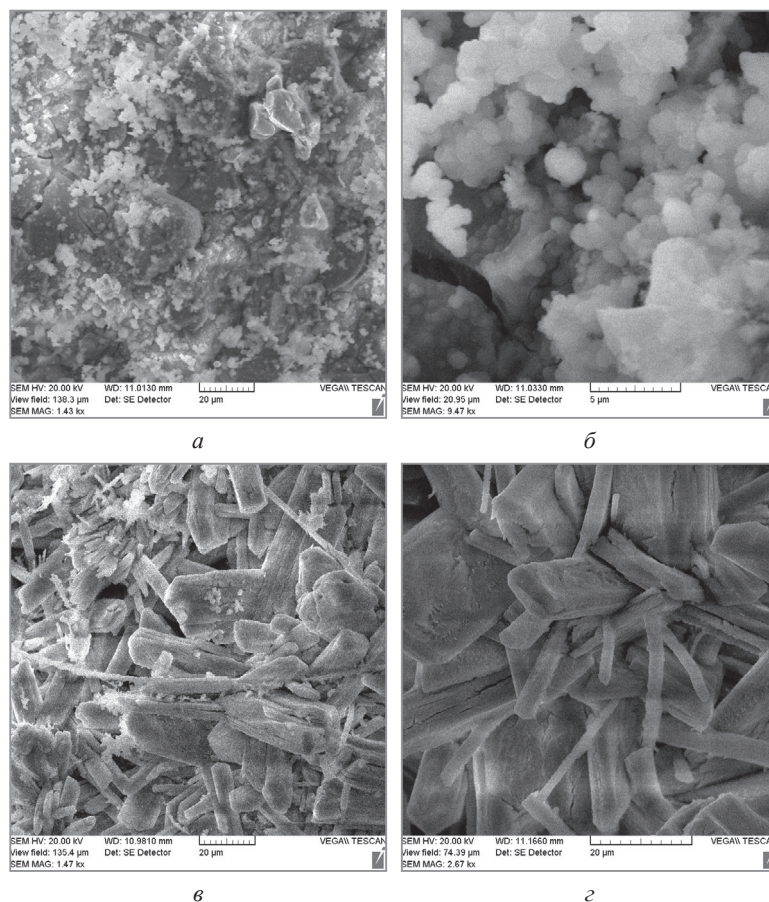


Рис. 2. Электронные снимки шлака, модифицированного серной и фосфорной кислотами: а, б – шлак, обработанный серной кислотой; в, г – шлак, обработанный фосфорной кислотой; а, в – $\times 1500$; б, г – $\times 10000$

На рис. 3 представлены структуры гипса и апатита, полученные в работе [13]. Сравнение рис. 2, 3 показывает, что кристаллы гипса, полученные в нашей работе, сформированы в виде «гипсовой розы» столь явно, как на рис. 3, *а*. Данное обстоятельство обусловлено тем, что формирование такой кристаллической структуры требует особых условий – микроклимат приморских побережий Красного и Мертвого морей [13].

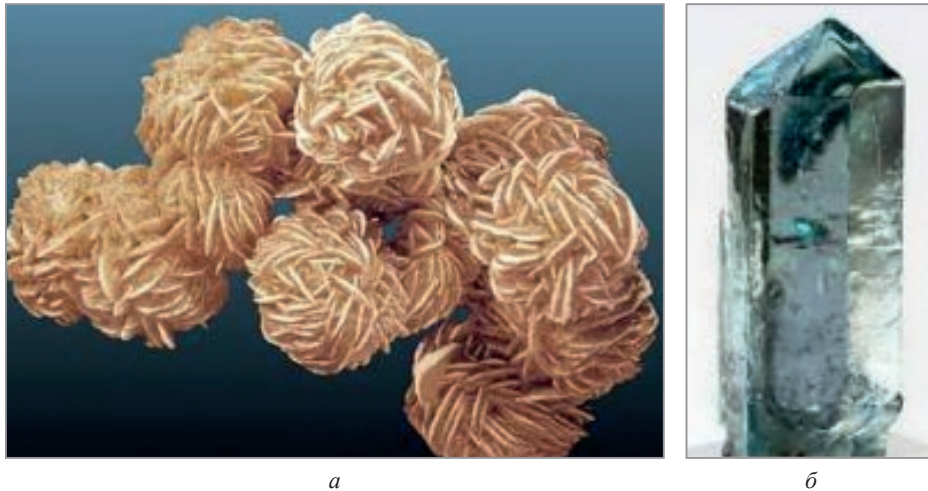


Рис. 3. Структуры гипса и апатита: *а* – кристаллы гипса в виде «гипсовая роза»; *б* – призматические кристаллы апатита

На рис. 4 показаны снимки исходного и контактировавшего с растворами HNO_3 , HCl , и CH_3COOH шлаков. Как видно из рисунка, воздействие кислот оказывает различное влияние на структуру изученных образцов.

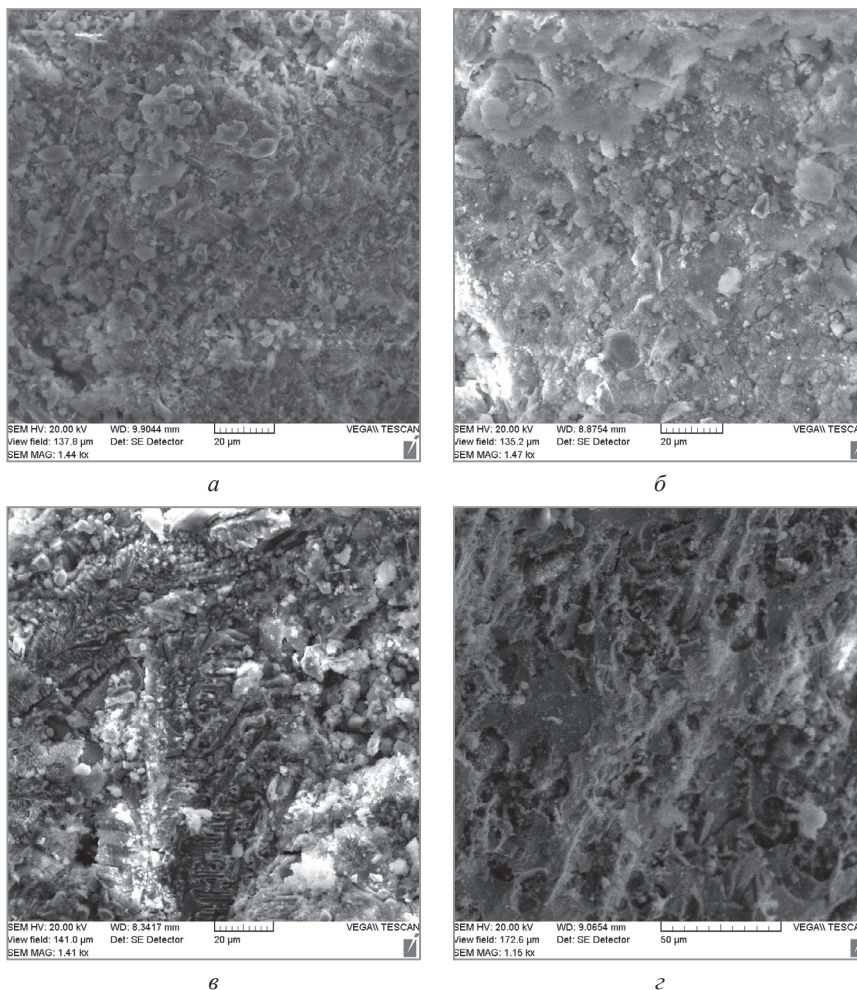


Рис. 4. Электронные снимки исходного (*а*) и модифицированных растворами HNO_3 (*б*), HCl (*в*), CH_3COOH (*г*) шлаков. $\times 1500$

Так, для образца исходного шлака характерна глобулярная структура поверхности размером 4–12 μm . Для шлака, обработанного азотной кислотой, наблюдаются прямоугольные образования 2,7–13,3 μm . После контакта с соляной кислотой формируется смешанная структура на поверхности образца, представленная глобулами, прямоугольными и цепочечными образованиями размерами 2–32 μm . При взаимодействии с уксусной кислотой образуются цепочечные и островные структуры соответственно 10·39,7 и 7·27,0 μm .

На рис. 5 показано изменение удельной поверхности образцов в результате активации растворами кислот.

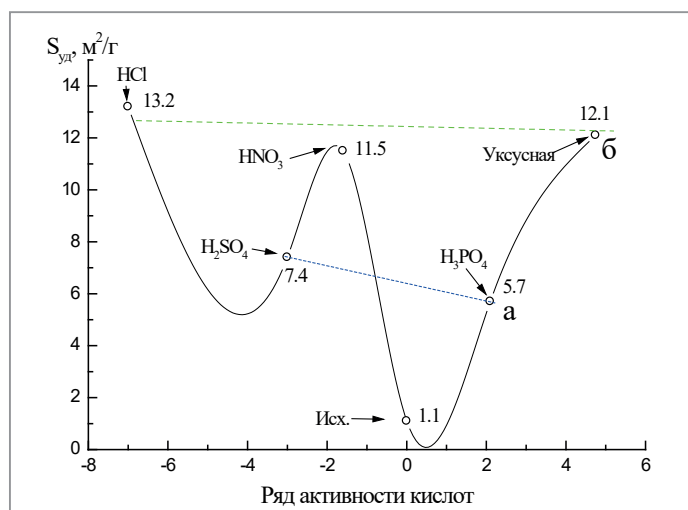


Рис. 5. Зависимость удельной поверхности модифицированного шлака от ряда активности кислот

На рисунке линией «а» обозначены кислоты, при взаимодействии с которыми на поверхности шлака образуются новые кристаллографические фазы, линией «б» – кислоты, взаимодействие с которыми приводит к обычному выщелачиванию с переходом ионов в водную фазу.

Подтверждением этому могут служить данные электронной микроскопии, представленные на рис. 2–4.

Выводы

Изучено влияние кислотной активации на адсорбционно-структурные характеристики фильтрующих загрузок, созданных на основе сталеплавильного шлака.

Показано, что при взаимодействии с серной и фосфорной кислотами на поверхности шлака образуются новые кристаллографические фазы, а контакт с другими кислотами (соляной, азотной, уксусной) ведет к выщелачиванию ионов с их переходом в водную фазу.

Установлено, что в ходе кислотной активации происходит увеличение удельной поверхности модифицированных образцов в 5,7–13,2 раза по сравнению с исходным материалом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Охрана окружающей среды / С. В. Белов, Ф. А. Барбинов, А. Ф. Козьяков и др. – М.: Высш. шк., 1991. – 339 с.
2. Ляшко, И. И. Логистические принципы разработки стратегии управления вторичными ресурсами / И. И. Ляшко // Экология и здоровье человека. Охрана воздушного и водного бассейнов. Утилизация отходов: сб. науч. ст. XIII междунар. науч.-практ. конф. – Харьков: Райдер, 2005. – С. 188–193.
3. Васильев, А. Н. Технологии предупреждения распространения тяжелых металлов в окружающей среде / А. Н. Васильев, Н. Н. Тудель // Экология и ресурсосбережение. – 2000. – № 2. – С. 36–44.
4. Амитан, В. Н. Региональные аспекты управления ресурсосбережением / В. Н. Амитан, Н. Н. Потапова // Менеджер. Вестник ДонГАУ. – 2002. – С. 115–120.
5. Проскуряков, В. А. Очистка сточных вод в химической промышленности / В. А. Проскуряков, Л. И. Шмидт. – Л.: Химия, 1977. – 464 с.
6. Clearfield, A. Inorganic ion exchange materials / A. Clearfield. – Florida: CRC Press. – 1982. – p. 290.
7. Алферова, Л. А. Замкнутые системы водного хозяйства промышленных предприятий, комплексов и районов / Л. А. Алферова, А. П. Нечаев. – М.: Стройиздат, 1984. – 412 с.
8. Кузнецов, Ю. В. Основы очистки воды от радиоактивных загрязнений / Ю. В., Кузнецов, В. Н. Щebetковский, Ф. Г. Трусов. – М.: Атомиздат. 1974. – 360 с.
9. Лурье, Ю. Ю. Аналитическая химия промышленных сточных вод / Ю. Ю. Лурье. – М.: Химия, 1984. – 464 с.
10. Извлечение из водных растворов ионов железа и свинца фильтрующей загрузкой, созданной на основе сталеплавильного шлака / А. С. Панасюгин [и др.] // Литье и металлургия. – 2018. – № 3. – С. 58–62.

11. Извлечение из водных растворов ионов железа и нитрат-ионов фильтрующей загрузкой, созданной на основе сталеплавильного шлака / А. С. Панасюгин [и др.] // Тр. 26-й Междунар. науч.-техн. конф. «Литейное производство и металлургия 2018. Беларусь». Минск, 17–18 октября. С. 58–63.
12. **Цыганов, А. Р.** Концентрирование из водных растворов ионов Fe^{3+} , Cu^{2+} и Pb^{2+} фильтрующими загрузками, содержащими сталеплавильную шлаковую фазу/ А. Р. Цыганов, А. С. Панасюгин, А. И. Теран // Природопользование и экологические риски: науч.-практ. конф. Минск, 5 июня 2019 г. – Минск, 2019. – С. 261–265.
13. **Черкасова, Т. Ю.** Основы кристаллографии и минералогии / Т. Ю. Черкасова. – Томск: Томский политехн. ун-т, 2014. – 207 с.

REFERENCES

1. **Belov S.V., Barbinov F.A., Kozyakov A.F. [et al.].** *Ohrana okruzhayushchej sredy* [Environmental protection]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1991, 339 p.
2. **Lyashko I.I.** Logisticheskie principy razrabotki strategii upravleniya vtorichnymi resursami [Logistic principles for developing a strategy for managing secondary resources]. *Ekologiya i zdorov'ye cheloveka. Ohrana vozdushnogo i vodnogo bassejnov. Utilizaciya othodov = Ecology and human health. Protection of air and water basins. Waste disposal: Sat. scientific art.* XIII International scientific-practical conf. Kharkov, Rider Publ., 2005, pp. 188–193.
3. **Vasiliev A.N., Tudel N.N.** Tekhnologii preduprezhdeniya rasprostraneniya tyazhelyh metallov v okruzhayushchej srede [Technologies for preventing the spread of heavy metals in the environment]. *Ekotekhnologiya i resursosberezhenie = Ecotechnology and resource saving*, 2000, no. 2, pp. 36–44.
4. **Amitan V.N., Potapova N.N.** Regional'nye aspekty upravleniya resursosberezheniem [Regional aspects of resource saving management]. *Menedzher. Vestnik DonGAU = Manager. Bulletin of DonGAU*, 2002, pp. 115–120.
5. **Proskuryakov V.A., Shmidt L.I.** *Ochistka stochnyh vod v himicheskoy promyshlennosti* [Waste water treatment in the chemical industry]. Leningrad, Khimiya Publ., 1977, 464 p.
6. **Clearfield A.** Inorganic ion exchange materials. Florida, CRC Press, 1982, p. 290.
7. **Alferova L.A., Nechaev A.P.** *Zamknutyje sistemy vodnogo hozyajstva promyshlennyh predpriyatij, kompleksov i rajonov* [Closed systems of water management of industrial enterprises, complexes and regions]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1984, 412 p.
8. **Kuznetsov Yu. V., Shechetkovsky V.N., Trusov F.G.** *Osnovy ochistki vody ot radioaktivnyh zagryaznenij* [Fundamentals of water purification from radioactive contamination]. Moscow, Atomizdat Publ., 1974, p. 360.
9. **Lurie Yu. Yu.** *Analiticheskaya himiya promyshlennyh stochnyh vod* [Analytical chemistry of industrial wastewater]. Moscow, Himiya Publ., 1984, 464 p.
10. **Panasyugin A.S., Grigor'ev S.V., Teran A.I. et al.** Izvlechenie iz vodnyh rastvorov ionov zheleza i svinca fil'truyushchej zagruzkoj, sozdannoj na osnove staleplavil'nogo shlaka [Extraction from aqueous solutions ions of iron and lead by filter loading, created on the basis of steel melting slag]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2018, no. 3, pp. 58–62.
11. **Panasyugin A.S., Grigor'ev S.V., Teran A.I., Anufriev V.N.** Izvlechenie iz vodnyh rastvorov ionov zheleza i nitrat ionov fil'truyushhej zagruzkoj, sozdannoj na osnove staleplavil'nogo shlaka [Extraction of iron and nitrate ions from aqueous solutions using a filter media created on the basis of steel-smelting slag]. *Trudy 26-j Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Litejnoe proizvodstvo i metallurgiya 2018. Belarus'». Minsk, 17–18 oktyabrya = Proceedings of the 26th International Scientific and Technical Conference “Foundry and Metallurgy 2018. Belarus”*. Minsk, october 17–18, pp. 58–63.
12. **Tsyganov A.R., Panasyugin A.S., Teran A.I.** Koncentrirovaniye iz vodnyh rastvorov ionov Fe^{3+} , Cu^{2+} i Pb^{2+} fil'truyushchimi zagruzkami, sodержashchimi staleplavil'nyuyu shlakovuyu fazu [Concentration of Fe^{3+} , Cu^{2+} and Pb^{2+} ions from aqueous solutions with filter media containing a steel-smelting slag phase]. *Prirodopol'zovanie i ekologicheskie riski = Nature management and environmental risks: scientific-pract. conf., Minsk, June 5, 2019*. Minsk, 2019, pp. 261–265.
13. **Cherkasova T. Yu.** *Osnovy kristallografii i mineralogii* [Fundamentals of crystallography and mineralogy]. Tomsk, Tomsk Polytechnic. univ. Publ., 2014, 207 p.