



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-138-144>
УДК 543.39: 665.081

Поступила 14.11.2024
Received 14.11.2024

СИНТЕЗ И ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ФИЛЬТРУЮЩИХ ЗАГРУЗОК НА ОСНОВЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ТЕХНОГЕННЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

*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 настоящее время широко используются процессы нанесения на поверхность стальных изделий защитных покрытий – бронзирование, латунирование и др. Данные операции выполняются путем термokatалитического нанесения на поверхность стальных изделий соединений свинца с последующей надежной фиксации на данной подложке слоя бронзы, латуни и др. С учетом последующих технологических операций образуется значительное количество оборотных, промывных и сточных вод, содержащих достаточно большое количество растворенных соединений.

Ключевые слова. Сталеплавильный шлак, ионы Fe^{3+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cr^{3+} , Al^{3+} .

Для цитирования. Панасюгин, А. С. Синтез и изучение свойств фильтрующих загрузок на основе модифицированных сталеплавильных шлаков для очистки сточных вод от техногенных загрязнений / А. С. Панасюгин, А. Р. Цыганов, Н. П. Машерова, Н. Д. Павловский // *Литье и металлургия*. 2024. № 4. С. 138–144. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-138-144>.

SYNTHESIS AND STUDY OF PROPERTIES OF FILTER MEDIA BASED ON MODIFIED STEELMAKING SLAGS FOR WASTEWATER TREATMENT FROM ANTHROPOGENIC POLLUTANTS

*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.

Currently, the processes of applying protective coatings to the surface of steel products are widely used – bronzing, latuning, etc. These operations are performed by thermocatalytically applying lead compounds to the surface of steel products, followed by reliable fixation of a layer of bronze, brass, etc. on this substrate.

Taking into account subsequent technological operations, a significant amount of circulating, washing and wastewater containing a sufficiently large number of dissolved compounds is formed.

Keywords. Steelmaking slag, Fe^{3+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cr^{3+} , Al^{3+} ions.

For citation. Panasyugin A. S., Tsyganov A. R., Masherova N. P., Pavlovsky N. D. Synthesis and study of properties of filter media based on modified steelmaking slags for wastewater treatment from anthropogenic pollutants. *Foundry production and metallurgy*, 2024, no. 4, pp. 138–144. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2024-4-138-144>.

Интенсивное развитие промышленности привело к значительному росту различных типов отходов, в частности гальванических шламов, формирующих высокий уровень антропогенной нагрузки на окружающую среду, как из-за несовершенства технологических процессов, так и накопления огромного количества данного класса отходов, усложняющих обеспечение экологической безопасности прилегающих территорий. Как известно, гальванические шламы являются лобильными соединениями и в случае незначительного изменения значения pH или контакта с атмосферной влагой очаги загрязнений становятся делокализованными, могут многократно превышать площади их первоначального складирования.

Проблема утилизации гальванических шламов является актуальной для РБ, поскольку ежегодно их накапливается до 6 тыс. т, оводненность составляет 35–60% в зависимости от аппаратного оформления процесса нейтрализации. Переработке подвергается примерно 50–55%. На данный момент эффективную нейтрализацию гальванических шламов и сточных вод, образующихся в производственном процессе, могут осуществлять предприятия, имеющие в составе очистных сооружений выпарные и установки обратного осмоса. Таким оборудованием оснащены не более 50% организаций, у остальных остро стоит вопрос доочистки стоков, поскольку такие очистные сооружения могут позволить только крупные предприятия.

Кроме того, ежегодно в Республике Беларусь образуется более 12 тыс. т сталеплавильных шлаков, переработке подвергается не более 25–30% от общего количества. Основная масса шлаков лежит в отвалах или же вывозится на полигоны, что требует выделение под их захоронение все новых территорий.

Проведение данного исследования позволит снизить антропогенную нагрузку на окружающую среду за счет вовлечения в оборот сталеплавильных шлаков, снижения количества полигонов и очистки вод различного происхождения.

Широко используемые процессы нанесения на поверхность изделий защитных покрытий (бронзирование, латунирование и др.) выполняются путем термокаталитического нанесения на стальную поверхность соединений свинца с последующей надежной фиксации на данной подложке слоя бронзы, латуни и др. [1]. Последующие технологические операции приводят к образованию значительных количеств оборотных, промывных и сточных вод, содержащих достаточно большое количество растворенных соединений железа, меди, цинка, хрома, свинца, кобальта и других металлов. Среди сорбционно-активных материалов, применяемых для очистки водных сред и концентрирования ионов многовалентных металлов, наиболее используемыми являются соединения на основе фосфата циркония, силикагель, сополимеры сурьмы-титана, сурьмы-олова, кристаллические оксиды пентавалентной сурьмы, ионообменные смолы Dowex и т.д. [2]. Однако при решении конкретных задач, связанных с концентрированием или извлечением ионов многовалентных металлов из вод различного происхождения, возникает ряд трудностей, обусловленных различным химическим составом очищаемых вод. Следует подчеркнуть, что ценность литературных данных о степени и коэффициенте очистки часто теряется, если не указаны конкретные условия постановки эксперимента [3].

С экономической точки зрения сталеплавильные шлаки могут рассматриваться как потенциальное вторичное сырье и составляющих компонентов при производстве строительных материалов: порландцементного клинкера, керамзита, кирпича, асфальтобетона, а также фильтрующих материалов для очистки сточных вод предприятий машиностроительного профиля при соответствующем технологическом и нормативном обеспечении [2–4].

Внедрение малоотходных технологий стимулирует реализацию мероприятий по охране окружающей среды: выявление ресурсной ценности и полезных свойств металлургических шлаков, обоснование целесообразности их использования в качестве фильтрующих материалов.

Целью исследования является синтез фильтрующих загрузок на основе модифицированных сталеплавильных шлаков и изучение их свойств для очистки сточных вод от ионов многовалентных металлов Fe^{3+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , Cr^{3+} , Al^{3+} , выделяющихся при нанесении гальванических покрытий.

Материалы и методы исследования

Фильтрующий материал был получен из сталеплавильного шлака. Усредненный химический состав полученного фильтрующего материала приведен в табл. 1.

Таблица 1. Усредненный химический состав фильтрующего материала

Соединение	Мас. %
SiO_2	21,1
CaO	39,2
MgO	6,2
Al_2O_3	6,5
FeO	22,6
MnO	2,98
P_2O_5	0,3
Cr_2O_3	0,8
S	0,23
Итого	99,91

Полученный фильтрующий материал перспективен для решения поставленной задачи. Он может выполнять роль как осаждающего реагента для гидроксида железа, являющегося одним из основных коллекторов, применяемых в практике водоподготовки и водоочистки, так и механического фильтра, способного задерживать частицы образующего осадка между гранулами фильтрующего материала.

Взвешивание реагентов и образцов проводили на электронных весах OHAUS Explorer Pro. ИК-спектры снимали на ИК-спектрометре UR-50 (образцы для исследования готовили с использованием KBr). ИК-спектроскопия подтверждает образование труднорастворимых соединений (по механизму хемосорбции) в процессе извлечения ионов многовалентных металлов. На это указывает наличие характеристических полос поглощения в области 487 см^{-1} , 501 см^{-1} и плеча при 522 см^{-1} , что соответствует колебаниям связей Fe–O–Si, O–Pb–O и Fe–O–Fe [5–7].

Адсорбционно-структурные характеристики фильтрующего материала, содержащего оксиды кальция, железа, кремния, алюминия и магния, изучали методом адсорбции азота на Metrometrics 2200. Полученный материал имеет удельную поверхность ($S_{уд}$) $5,5\text{ м}^2/\text{г}$ и сорбционный объем (V_s) $0,15\text{ см}^3/\text{г}$.

Фазовый состав образцов определяли на дифрактометре ДРОН-3 (Cu-K $_{\alpha}$ -излучение). Рентгенофазовый анализ с использованием базы данных JCPDS PDF-1 [8] показал присутствие в образцах фаз диоксида алюминия Ca (Mg, Fe, Al) (Si, Al) $_2$ O $_6$ (карточка 38–466), диоксида CaMg (SiO $_3$) $_2$ (карточка 11–654), диоксида, обогащенного кальцием CaMgSi $_2$ O $_6$, (карточка 41–1370), а также незначительные количества кварца SiO $_2$, маргарита Ca $_{0,88}$ Na $_{0,12}$ Al $_2$ (Si $_{2,12}$ Al $_{1,88}$ O $_{10}$)(OH) $_2$, альбита NaAlSi $_3$ O $_8$, иллита K(Al $_4$ Si $_2$ O $_9$ (OH) $_3$). Массовое содержание диоксидной фазы составляет 94,7%, кварца – 3,2, маргарита – 0,7, иллита – 1,0, альбита – 0,4%.

Методика проведения эксперимента

Кинетические параметры при концентрировании ионов фильтрующими загрузками определяли следующим образом: к навескам исследуемого материала, помещенного в колбы с притертыми пробками, приливали по 100 мл растворов, содержащих ионы Fe $^{3+}$, Cu $^{2+}$, Pb $^{2+}$, Cr $^{3+}$, Al $^{3+}$ с концентрациями, приведенными в табл. 2. Затем через 5, 10, 20, 60, 120, 180, 180, 360 и 540 мин отбирали аликвоты, в которых определяли остаточное содержание Fe $^{3+}$, Cu $^{2+}$, Pb $^{2+}$, Cr $^{3+}$, Al $^{3+}$ на спектрометре Solar PV 1251C по методикам [9, 10].

Таблица 2. Исходные концентрации ионов Fe $^{3+}$, Cu $^{2+}$, Pb $^{2+}$, Cr $^{3+}$, Al $^{3+}$

Ион	Мг/дм 3	Мг-экв/дм 3
Fe $^{3+}$	20,0	1,07
Cu $^{2+}$	20,0	0,625
Pb $^{2+}$	20,0	0,13
Cr $^{3+}$	20,0	1,16
Al $^{3+}$	20,0	2,22

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены изотермы концентрирования (C) ионов Fe $^{3+}$, Cu $^{2+}$ и Pb $^{2+}$ фильтрующей загрузкой, полученной на основе шлака.

Как видно из рисунка, количество осажденных ионов на фильтрующей загрузке в ряду изменяется следующим образом: Fe $^{3+}$ \gg Al $^{3+}$ \gg Cr $^{3+}$ \gg Cu $^{2+}$ \gg Pb $^{2+}$, что составляет 14,4, 10,1, 9,7, 3,8 и 0,14 мг-экв/г соответственно. Различие в сравнении с ионами Fe $^{3+}$ для Cu $^{2+}$ – в 3,8 раза, для Al $^{3+}$ – в 1,4 раза, для Cr $^{3+}$ – в 1,5 раза и для Pb $^{2+}$ – \approx в 10 раз. Данное обстоятельство обусловлено прежде всего коллоидно-химическим состоянием ионов в водных растворах. В более ранних работах, где изучались параметры извлечения Fe $^{3+}$ на фоне общего солесодержания $500\text{ мг}/\text{дм}^3$ и Fe $^{3+}$ до $50\text{--}60\text{ мг}/\text{дм}^3$, было показано, что при гидролизе разбавленных растворов солей Fe (III) в составе гидроксокомплексов может находиться от 1 до 50 ионов железа (III). Следовательно, железо (III) находится в предкоагуляционном состоянии и достаточно одного осаждающего иона, чтобы связать сразу несколько ионов железа (III). Поэтому взаимодействие больших количеств кислого раствора Fe $^{3+}$ с силикатом кальция практически не снижает щелочность сорбента.

При описании процесса осаждения (концентрирования), учитывая его сложный характер, необходимо знание механизма и кинетических характеристик отдельных стадий. Описание кинетики осаждения на основе формально-кинетического анализа позволяет учесть вклад диффузии и химических реакций, а также определить кинетические параметры.

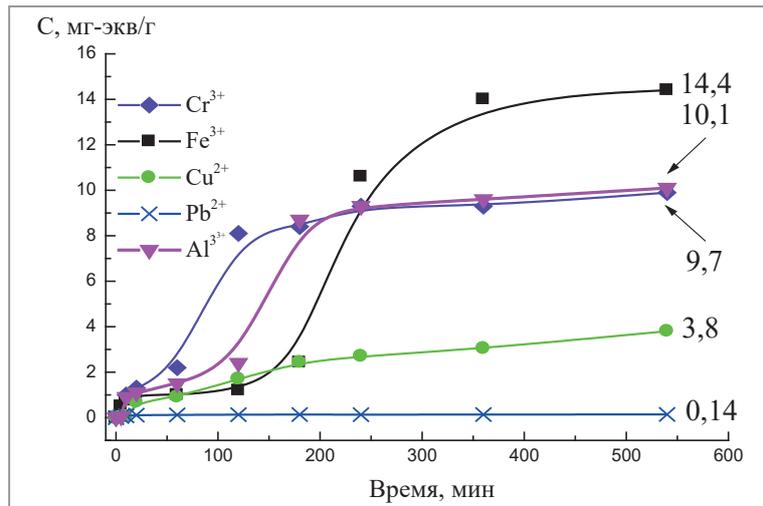


Рис. 1. Изотермы концентрирования (C) растворов ионов Fe³⁺, Cu²⁺, Cr³⁺, Al³⁺ и Pb²⁺ фильтрующей загрузкой, полученной на основе шлака

На рис. 2 показана зависимость F от времени осаждения (концентрирования), где $F = C_R / C_{max}$, C_R – осаждающая способность материала за определенное время контакта (t); C_{max} – максимальное концентрирование.

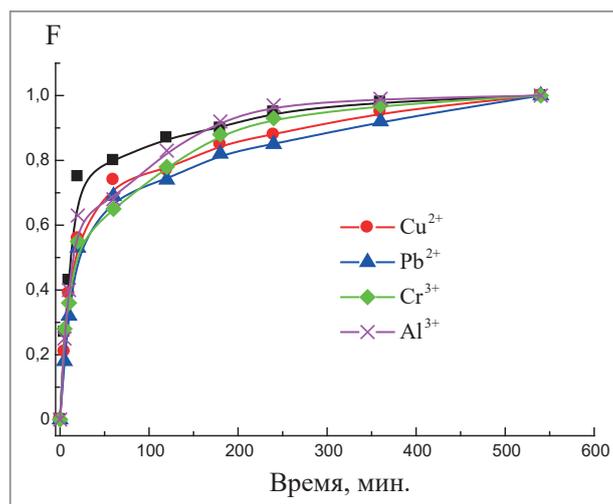


Рис. 2. Кинетическая зависимость степени концентрировании (F) от времени контакта растворов ионов Fe³⁺, Cu²⁺, Cr³⁺, Al³⁺ и Pb²⁺ с фильтрующей загрузкой, полученной на основе шлака

С целью выявления лимитирующей стадии сорбции проанализирована типовая зависимость $F - t^{0,5}$ (рис. 3, табл. 3).

При обработке кинетических кривых использовали упрощенные модели, учитывающие, что скорость процесса может контролироваться диффузией либо протеканием химических реакций. Применение формально-кинетического подхода при выборе модели, описывающей экспериментальные кинетические данные осаждения на основе закономерности $g(\alpha) = f(\tau)$, где $\alpha = 1 - F$, позволило определить механизм осаждения на отдельных стадиях процесса и кинетические характеристики.

Вид функции $g(\alpha)$ зависит от механизма процесса и, как правило, заранее неизвестен. Для каждой установленной стадии, соответствующей определенному интервалу α , выбирали такую функцию $g(\alpha)$, соответствующую определенной кинетической модели, которая представляет идеализированное протекание процесса.

В табл. 4 приведены механизмы с соответствующими видами функции $g(\alpha)$.

Из совокупности уравнений были выбраны те, которые в заданной области степени завершения процесса давали минимальное значение дисперсии, т. е. описывали процесс в системе на данном этапе с максимальной вероятностью. С учетом области применимости были выбраны три модели, которые наиболее соответствуют реальным процессам.

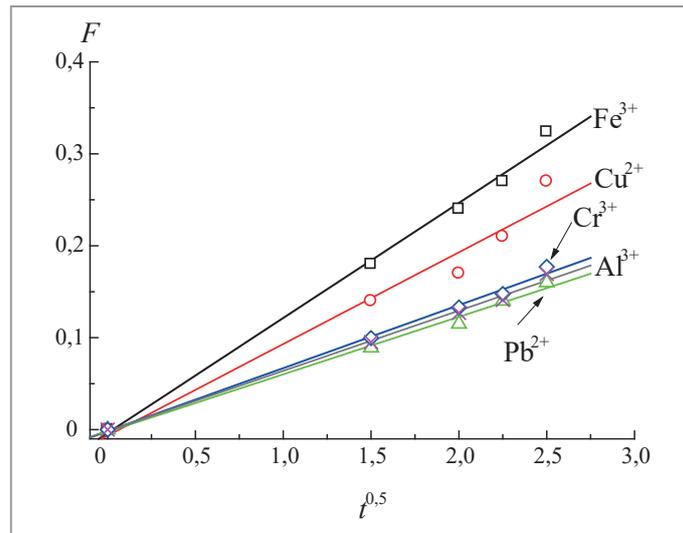


Рис. 3. Зависимость $F - t^{0,5}$ при концентрировании ионов Fe^{3+} , Cu^{2+} , Cr^{3+} , Al^{3+} и Pb^{2+}

Т а б л и ц а 3. Зависимость $F - t^{0,5}$ при концентрировании ионов Fe^{3+} , Cu^{2+} , Cr^{3+} , Al^{3+} и Pb^{2+}

Ион	Формула
Fe^{3+}	$Y=0,125 \times t^{0,5}$
Cu^{2+}	$Y=0,0977 \times t^{0,5}$
Pb^{2+}	$Y=0,078 \times t^{0,5}$
Cr^{3+}	$Y=0,0685 \times t^{0,5}$
Al^{3+}	$Y=0,065 \times t^{0,5}$

Т а б л и ц а 4. Возможные механизмы процесса осаждения

Механизм	Вид функции $g(\alpha)$
Трехмерная диффузия	$[1-(1-\alpha)^{1/3}]^2$
Диффузия по Гинстлингу-Броунштейну	$[1-2/3 \alpha - (1-\alpha)^{2/3}]$
Диффузия по Журавлеву-Темпельману	$[1/(1-\alpha)^{1/3}]^2$
Реакция на границе раздела фаз	$1-(1-\alpha)^{1/3}$
Зародышеобразование по Авраами-Ерофееву	$-\lg(1-\alpha)^{1/n}$
Зародышеобразование по Прауту-Томпкинсу	$\ln[\alpha(1-\alpha)]^{1/2}$

Во внимание принята модель формирования осадка (рис. 4), где показана схема развития реакционной зоны на границе раздела фаз. В данном случае, когда реакция протекает в кинетической области, топохимическую реакцию можно представить как последовательность следующих стадий:

- 1) образование отдельных молекул или элементарных ячеек продукта реакции на поверхности раздела фаз;
- 2) возникновение отдельных зародышей (ядер) фазы продукта реакции (рис. 4, t_2);
- 3) рост ядер вплоть до их смыкания (рис. 4, t_3), образование на поверхности исходного вещества сплошного продукта реакции;
- 4) рост сплошного слоя продукта реакции и поверхности еще непрореагировавшего вещества (рис. 4, t_4).

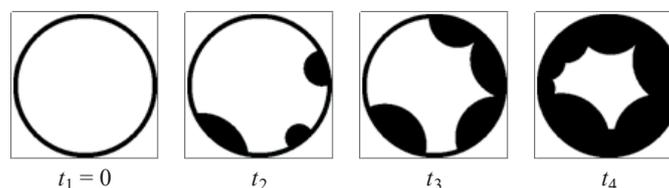


Рис. 4. Схема развития реакционной зоны на разделе фаз

Выявлено, что процесс осаждения на начальном этапе лимитирует химическая стадия зародышеобразования (формирование кристаллического осадка), далее – реакции на границе раздела фаз (образование на поверхности зародышей сплошного слоя продуктов реакции), а на заключительной стадии – рост сплошного слоя продуктов реакции.

Вид кинетических кривых, представленный в координатах $-\lg(\alpha) - \tau$, позволил предположить многостадийный характер протекания процесса (рис. 5). При обработке кинетических кривых использовали упрощенные модели, учитывающие, что скорость процесса может контролироваться диффузией либо протеканием химических реакций. Применение формально-кинетического подхода при выборе модели, описывающей экспериментальные кинетические данные осаждения на основе закономерности $g(\alpha) = f(\tau)$, позволило определить механизм осаждения на отдельных стадиях процесса и кинетические характеристики.

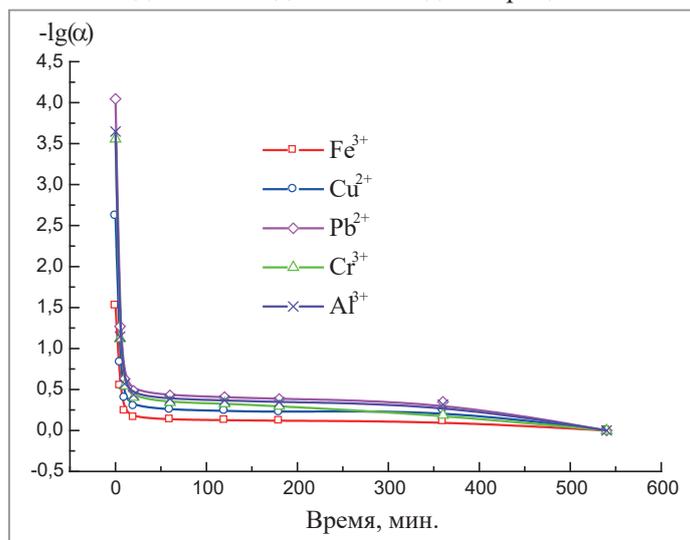


Рис. 5 Зависимость изменения значений функции $-\lg \alpha$ от времени τ

Таким образом, для всех ионов в интервалах α от 0,10 до 0,67 процесс описывается уравнением Авраами–Ерофеева: $g(\alpha) = -\lg(1 - \alpha)^{1/n}$. Значение n , равное 3, позволяет говорить о замедлении кинетической стадии химического процесса.

В интервалах α от 0,54 до 0,94 процесс характеризуется реакциями на границе раздела фаз, соответствует уравнению $1 - (1 - \alpha)^{1/3}$ и, как отмечалось выше, образованию на поверхности зародышей сплошного слоя продуктов реакции.

В интервале α от 0,83 до 0,99 процесс обусловлен реакциями на границе раздела фаз по уравнению $[1 - (1 - \alpha)^{1/3}]^2$, ростом сплошного слоя продуктов реакции.

Значения кинетических характеристик для конкретных ионов (Fe^{3+} , Cu^{2+} , Cr^{3+} , Al^{3+} и Pb^{2+}) приведены в табл. 5.

Таблица 5. Кинетические параметры процесса осаждения

Ион	Интервал α	Вид функции $g(\alpha)$
Fe^{3+}	0,10–0,67	$-\lg(1 - \alpha)^{1/n}$
	0,67–0,94	$1 - (1 - \alpha)^{1/3}$
	0,94–0,99	$[1 - (1 - \alpha)^{1/3}]^2$
Cr^{3+}	0,10–0,65	$-\lg(1 - \alpha)^{1/n}$
	0,65–0,94	$1 - (1 - \alpha)^{1/3}$
	0,94–0,99	$[1 - (1 - \alpha)^{1/3}]^2$
Al^{3+}	0,10–0,66	$-\lg(1 - \alpha)^{1/n}$
	0,66–0,94	$1 - (1 - \alpha)^{1/3}$
	0,94–0,99	$[1 - (1 - \alpha)^{1/3}]^2$
Cu^{2+}	0,10–0,61	$-\lg(1 - \alpha)^{1/n}$
	0,61–0,88	$1 - (1 - \alpha)^{1/3}$
	0,88–0,99	$[1 - (1 - \alpha)^{1/3}]^2$
Pb^{2+}	0,10–0,54	$-\lg(1 - \alpha)^{1/n}$
	0,54–0,83	$1 - (1 - \alpha)^{1/3}$
	0,83–0,99	$[1 - (1 - \alpha)^{1/3}]^2$

Таким образом, установлено, что процесс осаждения на начальном этапе лимитирует химическая стадия зародышеобразования (формирование кристаллического осадка), далее – реакции на границе раздела фаз (образование на поверхности зародышей сплошного слоя продуктов реакции), а на заключительной стадии – рост сплошного слоя продуктов реакции.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Ляшко, И.И.** Логистические принципы разработки стратегии управления вторичными ресурсами // Сб. науч. ст. XIII Междунар. науч.-практ. конф. «Экология и здоровье человека. Охрана воздушного и водного бассейнов. Утилизация отходов». – Харьков: Райдер, 2005. – С. 188–193.
2. **Амитан, В.Н.** Региональные аспекты управления ресурсосбережением / В.Н. Амитан, Н.Н. Потапова // Менеджер. Вестник ДонГАУ. – 2002. – С. 115–120.
3. Комплексная оценка технологий утилизации осадков сточных вод гальванических производств / С.А. Тимофеева [и др.] // Химия и технология воды. – 1991. – Т. 13. – № 1. – С. 68–71.
4. **Лисицкая, И.Н.** Утилизация отходов гальванического производства / И.Н. Лисицкая // Водоснабжение и санитарная техника. – 1991. – № 10. – С. 6–7.
5. **Розовский, А.Я.** Кинетика топохимических реакций / А.Я. Розовский. – М.: Химия, 1974. – 220 с.
6. **Котова, Д.Л.** Плотность бинарных подвижных фаз / Д.Л. Котова, Т.А. Крысанова, В.Ф. Селеменев // Журнал физической химии. – 1999. – Т. 3. – № 7. – С. 1316–1318.
7. **Ратько, А.И.** Извлечение из водных растворов ионов железа (III) силикатами кальция / А.И. Ратько, А.С. Панасюгин, Е.А. Колос // Журнал прикладной химии. – 1998. – Т. 71. – № 10. – С. 1638–1642.
8. **Третьяков, Ю.Д.** Твердофазные реакции / Ю.Д. Третьяков. – М.: Химия, 1978. – 360 с.
9. **Clearfield, Ab.** Inorganic Ion Exchange Materials / Ab. Clearfield. – Florida: CRC Press, Inc., 1982. – 290 p.
10. **Кузнецов, Ю.В.** Основы очистки воды от радиоактивных загрязнений / Ю.В. Кузнецов, В.Н. Щецетковский, Ф.Г. Трусов. – М.: Атомиздат, 1974. – 360 с.

REFERENCES

1. **Lyashko I. I.** Logisticheskie principy razrabotki strategii upravleniya vtorichnymi resursami [Logistic principles of development of the strategy of secondary resources management]. *Ekologiya i zdorov'e cheloveka. Ohrana vozdušnogo i vodnogo bassejnov. Utilizaciya othodov: sb. nauch. st. XIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. = Ecology and Human Health. Protection of air and water basins. Waste utilization: Collection of scientific articles of XIII International Scientific and Practical Conference.* Kharkov, Ryder Publ., 2005, pp. 188–193.
2. **Amitan V.N., Potapova N.N.** Regional'nye aspekty upravleniya resursosberezeniem [Regional aspects of resource saving management]. *Menedzher. Vestnik DonGAU = Manager. Bulletin of DonGAU*, 2002, pp. 115–120.
3. **Timofeeva S., Barasov A. [et al.]** Kompleksnaya ocenka tekhnologij utilizacii osadkov stochnyh vod gal'vanicheskikh proizvodstv [Comprehensive evaluation of technologies for utilization of waste water sludge from galvanic industries]. *Himiya i tekhnologiya vody = Chemistry and Water Technology*, 1991, vol. 13, no. 1, pp. 68–71.
4. **Lisitskaya I.N.** Utilizaciya othodov gal'vanicheskogo proizvodstva [Waste utilization of galvanic production]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika = Water supply and sanitary engineering*, 1991, no. 10, pp. 6–7.
5. **Rozovsky A. Ya.** *Kinetika topohimicheskikh reakcij* [Kinetics of topochemical reactions]. Moscow, Khimiya Publ., 1974, 220 p.
6. **Kotova D.L., Krysanova T.A., Selemenev V.F.** Plotnost' binarnykh podvizhnykh faz [Density of binary mobile phases]. *Zhurnal fizicheskoy himii = Journal of Physical Chemistry*, 1999, vol. 3, no. 7, pp. 1316–1318.
7. **Ratko A.I., Panasyugin A.S., Kolos E.A.** Izvlechenie iz vodnyh rastvorov ionov zheleza (III) silikatami kal'ciya [Extraction of iron (III) ions with calcium silicates from aqueous solutions]. *Zhurnal prikladnoj himii = Journal of Applied Chemistry*, 1998, vol. 71, no. 10, pp. 1638–1642.
8. **Tretyakov Yu.D.** *Tverdogaznye reakcii* [Solid-phase reactions]. Moscow, Himiya Publ., 1978, 360 p.
9. **Clearfield Ab.** *Inorganic Ion Exchange Materials.* Florida, CRC Press, Inc., 1982, 290 p.
10. **Kuznetsov Yu. V., Shchetkovsky V.N., Trusov F.G.** *Osnovy ochistki vody ot radioaktivnykh zagryaznenij* [Fundamentals of water purification from radioactive contamination]. Moscow, Atomizdat Publ., 1974, 360 p.