

## МЕТАЛЛУРГИЯ

Научная статья

УДК 669.66-5:66.935.5

EDN: JOCNFM

DOI: 10.21285/1814-3520-2024-1-149-161



## Опыт решения проблемы фильтрования и промывки неструктурированных осадков гидрометаллургической переработки полиметаллического шлама

Н.Л. Мохирева<sup>1✉</sup>, И.В. Логинова<sup>2</sup>, В.Р. Миролюбов<sup>3</sup>, А.А. Шопперт<sup>4</sup><sup>1</sup>ООО «Бергауф Строительные Технологии», г. Екатеринбург, Россия<sup>2-4</sup>Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

**Резюме:** Цель – выбор конструкции фильтра и режима промывки осадка гидрометаллургической переработки полиметаллического шлама для минимизации объема промывных вод и получения качественного осадка – прекурсора железоксидного пигмента. Изучение химического состава объекта исследований – пульпы после солянокислой обработки полиметаллического шлама – проводилось методами атомно-абсорбционной спектрофотометрии, рентгенофлуоресцентной спектрометрии, а гранулометрического состава – методом лазерной дифракции. В результате изучения химического состава установлено, что в жидкой фазе содержится, г/дм<sup>3</sup>: MgCl<sub>2</sub> 90,5–105,6; AlCl<sub>3</sub> 35,8–37,6; NiCl<sub>2</sub> 8,1–9,0; FeCl<sub>3</sub> 24,5–27,1; CrCl<sub>3</sub> 5,9–6,5; MnCl<sub>2</sub> 2,1–2,4; HCl 6,5–7,7. Твердые частицы, содержащиеся в пульпе, представлены двумя выраженными группами частиц со следующими размерами: от 0,1 до 1 мкм и от 1 до 120 мкм. Установлено, что разделение пульпы с использованием модели камерно-мембранного фильтр-пресса с вертикальным расположением плит позволяет минимизировать объем промывных вод до Т:Ж=1:1, вернуть захваченный осадком маточный раствор в технологический цикл и получить качественный промытый осадок с минимальным содержанием остаточных солей (0,5% масс.). Оптимальная температура пульпы, поступающей на фильтрование, соответствует 80°C, температура воды для промывки – 60°C. Установлено, что лимитирующей стадией процесса разделения пульпы является промывка осадка, которая осуществима методом вытеснения при условии использования подкисленной воды с pH 1,5. Определено, что следует использовать фильтровальные салфетки, изготовленные из 100% полипропилена, с удельным весом ткани 540 г/м<sup>2</sup> ± 10%, воздухопроницаемостью при 200 Па 6 л/дм<sup>2</sup> в минуту ± 30% и максимальной рабочей температурой не менее 90°C. Таким образом, выполнен расчет удельной производительности фильтр-пресса и выбрана стандартная машина с вертикальным расположением плит и поверхностью фильтрования 500 м<sup>2</sup> для разделения пульпы после гидрометаллургической переработки 8000 т/год влажного полиметаллического шлама.

**Ключевые слова:** гидрометаллургия, выщелачивание, фильтрование, шлам, фильтр-пресс, мембрана, скорость фильтрования

**Для цитирования:** Мохирева Н.Л., Логинова И.В., Миролюбов В.Р., Шопперт А.А. Опыт решения проблемы фильтрования и промывки неструктурированных осадков гидрометаллургической переработки полиметаллического шлама // iPolytech Journal. 2024. Т. 28. № 1. С. 149–161. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-149-161>. EDN: JOCNFM.

## METALLURGY

Original article

## Experience in solving the problem of filtering and washing unstructured sediments of hydrometallurgical processing of polymetal sludge

Natalya L. Mokhireva<sup>1✉</sup>, Irina V. Loginova<sup>2</sup>, Vitaly R. Mirolyubov<sup>3</sup>, Andrey A. Shoppert<sup>4</sup><sup>1</sup>LLC “Bergauf Construction Technologies”, Ekaterinburg, Russia<sup>2-4</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

**Abstract.** The article aims to select a filter design and mode of washing cake in the hydrometallurgical processing of polymetallic sludge in order to minimize the volume of washing water and obtain a high-quality cake—iron oxide pigment precursor. An analysis of the chemical composition of the subject matter—pulp following hydrochloric acid treatment of

© Мохирева Н.Л., Логинова И.В., Миролюбов В.Р., Шопперт А.А., 2024

<https://ipolytech.elpub.ru>

polymetallic sludge—was performed using atomic absorption spectrophotometry and X-ray fluorescence spectrometry, while the particle size distribution was studied via laser diffraction. The analysis of the chemical composition revealed that the liquid phase contains, g/dm<sup>3</sup>: MgCl<sub>2</sub> 90.5–105.6; AlCl<sub>3</sub> 35.8–37.6; NiCl<sub>2</sub> 8.1–9.0; FeCl<sub>3</sub> 24.5–27.1; CrCl<sub>3</sub> 5.9–6.5; MnCl<sub>2</sub> 2.1–2.4; HCl 6.5–7.7. The solid particles present in the pulp are represented by two distinct groups of particles having the following sizes: 0.1–1 µm and 1–120 µm. It was found that pulp separation using a chamber-membrane filter-press with the vertical arrangement of plates minimizes washing water volume up to S:L 1:1, returns the mother liquor captured by the cake to the process cycle, and helps to obtain high-quality washed cake with a minimum content of residual salts (0.5 wt%). The optimal temperature of the pulp entering the filtering process is 80°C, while that of washing water is 60°C. Cake washing was shown to be the limiting step of the pulp separation process, which can be realized via the displacement method given the use of acidified water with pH 1.5. It was found necessary to use filter cloths made of 100% polypropylene, with a specific weight of the fabric of 540 g/m<sup>2</sup> ± 10%, air permeability of 6 L/dm<sup>2</sup> per minute ± 30% at 200 Pa, and a maximum operating temperature of at least 90°C. Thus, the specific capacity of the filter press was calculated and a standard machine with the vertical arrangement of plates and a filtering surface of 500 m<sup>2</sup> was selected for pulp separation following hydrometallurgical processing of wet polymetallic sludge (8000 tons/year).

**Keywords:** hydrometallurgy, leaching, filtering, sludge, filter press, membrane, filtration rate

**For citation:** Mokhireva N.L., Loginova I.V., Mirolyubov V.R., Shoppert A.A. Experience in solving the issue of filtering and washing unstructured cake in the hydrometallurgical processing of polymetallic sludge. *iPolytech Journal*. 2024;28(1):149-161. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2024-1-149-161>. EDN: JOCNFM.

## ВВЕДЕНИЕ

Технологические процессы гидрометаллургии предусматривают необходимость разделения объемных потоков жидких пульп и подготовки воды. Зачастую сложность вызывают эффективность разделения суспензий и промывка осадков ввиду неоптимального содержания твердой взвеси [1, 2], агрессивности разделяемых фаз [3, 4], высоких требований к качеству продуктов фильтрования [5, 6].

Разделение и промывка неструктурированных осадков остаются актуальной проблемой для всей гидрометаллургии [7–11]. Потеря целевого компонента, длительность технологического цикла, отсутствие автоматизации, энергоемкость в ряде случаев не позволяют достичь желаемых экономических показателей, что препятствует реализации технологии глубокой переработки руд на предприятиях цветной и черной металлургии [12–17]. Совершенствование фильтровальных аппаратов и появление новых материалов открывают неисследованные возможности на пути решения задачи разделения сложных суспензий.

Целью обсуждаемого исследования явился выбор конструкции фильтра и режима промывки осадка гидрометаллургической переработки полиметаллического шлама для минимизации объема промывных вод и получения качественного осадка – прекурсора железистого пигмента.

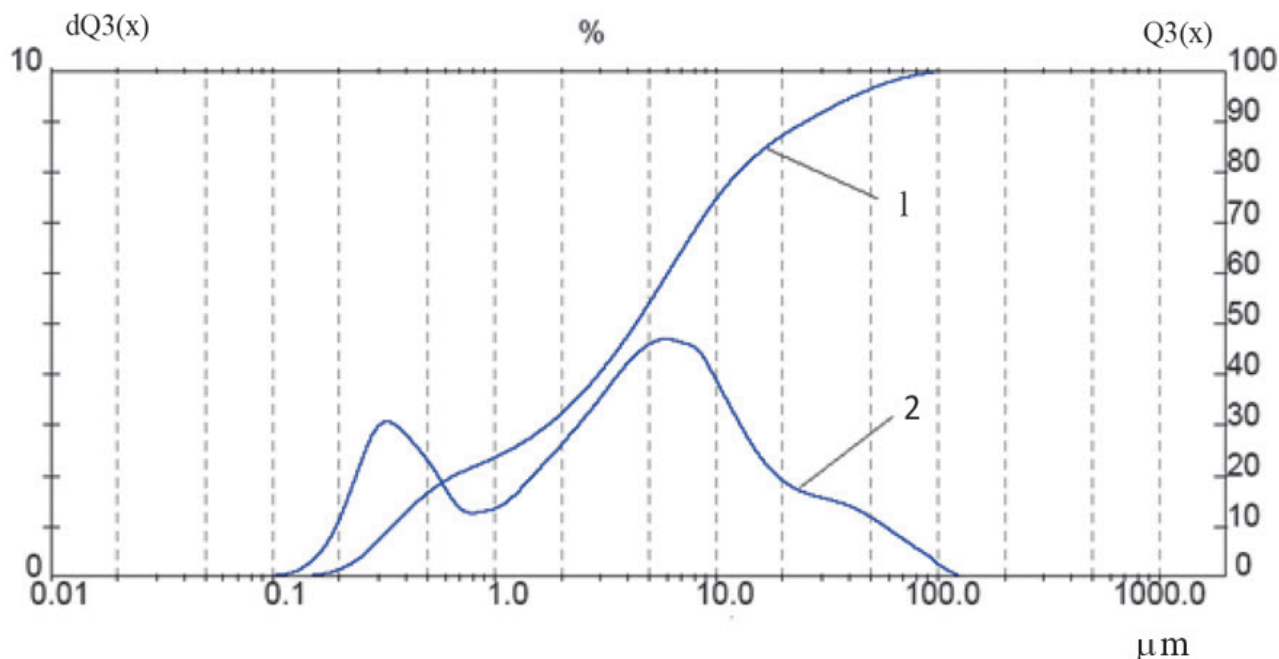
## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования служила пульпа после гидрометаллургической переработки полиметаллического шлама (продукта комплексной переработки серпентинита) соляной

кислотой, состоящая из раствора с pH 1,4–1,6 и мелкодисперсной твердой фазы, содержащей в основном оксид-гидроксид железа [18]. Химический состав жидкой фазы представлен хлоридами металлов и свободной соляной кислотой с концентрацией, г/дм<sup>3</sup>: 90,5–105,6 MgCl<sub>2</sub>; 35,8–37,6 AlCl<sub>3</sub>; 8,1–9,0 NiCl<sub>2</sub>; 24,5–27,1 FeCl<sub>3</sub>; 5,9–6,5 CrCl<sub>3</sub>; 2,1–2,4 MnCl<sub>2</sub>; 6,5–7,7 HCl. Анализ гранулометрического распределения твердых частиц, содержащихся в пульпе (рис. 1), показал наличие полидисперсного осадка с двумя выраженными группами частиц. Первая группа с частицами от 0,1 до 1 мкм, вторая – от 1 до 120 мкм. Размер 90% зерен осадка не превышает 113 мкм. Содержание твердого в пульпе выщелачивания составляло 160–180 г/дм<sup>3</sup> в зависимости от степени испарения воды.

Решение поставленной цели достигли путем реализации двух последовательных серий экспериментов с использованием различных установок.

Первую серию экспериментов по изучению процесса фильтрования пульпы от солянокислой переработки полиметаллического шлама проводили с использованием лабораторного вакуум-фильтра, состоящего из воронки Бюхнера и колбы Бунзена, подключенной к лабораторному вакуум-фильтру. Определенное количество подготовленной пульпы после выщелачивания полиметаллического шлама с заданной температурой вводилось в собранный заранее прогретый фильтр. Для исследования процесса фильтрования использовалась усредненная пульпа, полученная в четырех сериях экспериментов по выщелачиванию.



**Рис. 1. Гранулометрический состав пульпы, полученной при выщелачивании полиметаллического шлама соляной кислотой, определенный методом лазерной дифракции на анализаторе частиц Analysette 22 Micro Tec plus: 1 – интегральное распределение; 2 – дифференциальное распределение**  
**Fig. 1. Grain size distribution of the pulp obtained by polymetallic sludge leaching with hydrochloric acid that was determined by the laser diffraction method on the Analysette 22 Micro Tec plus particle analyzer: 1 – cumulative distribution; 2 – differential distribution**

Методика проведения экспериментов по промывке осадков заключалась в следующем: после окончания процесса фильтрования на поверхность сформированного осадка заливали рассчитанное количество воды, ориентируясь на среднее значение выхода непромытого осадка из исследуемых пульп, полученных в опытах без промывки. Пульпу фильтровали на лабораторном вакуум-фильтре с использованием нескольких марок фильтровальных салфеток при постоянном перепаде давления от 400 до 800 кПа. Все испытуемые образцы тканей (Tamfelt Technical Textiles, Финляндия) были изготовлены на основе полипропиленового волокна, имеющего высокую рабочую температуру и стойкость к растворам кислот. Ткани с артикулом S-2180-L2 и S-1197-L2K2 более плотные, чем образец S-2193-L2K2. В ходе эксперимента оценивали проникновение мельчайших частиц осадка в первые порции фильтрата.

Следует отметить, что определение влажности как полиметаллического шлама, так и осадка после выщелачивания шлама осуществляли с использованием методики, в основе которой заложен весовой метод определения влажности при 105°C. Полученный результат корректировали расчетным путем с учетом

титриметрически определенного количества раствора соли  $MgCl_2$ , унесенной осадком, и кристаллизационной воды, которую  $MgCl_2$  способен связывать с образованием бишофита по реакции  $MgCl_2 + 6H_2O = MgCl_2 \cdot 6H_2O$  при высушивании осадка. Таким образом, влажность определялась как частное от суммы значений количества влаги, унесенной при высушивании материала до постоянной массы при 105°C, и влаги, способной связаться с  $MgCl_2$  к массе навески влажного материала, вычисленного в процентах. Использование данной методики позволило получить корректные значения содержания воды во влажных и высушенных осадках и исключить противоречивость значений влажности осадков, отмеченную в ранее проведенных исследованиях по комплексной переработке серпентинита [19].

Вторую серию экспериментов проводили на экспериментальной фильтровальной установке (рис. 2) с использованием суспензии, полученной в ходе опытно-промышленного опробования технологии солянокислой обработки полиметаллического шлама. Фильтровальные салфетки изготовили из ткани с артикулом S-2193-L2K2 (100% полипропилен, с удельным весом ткани  $540 \text{ г/м}^2 \pm 10\%$ , воздухопроницаемостью при 200 Па  $6 \text{ л/дм}^2 \text{ в мин} \pm 30\%$  и мак-

симальной рабочей температурой не менее 90°C). Для промывки использовали слабый раствор хлористоводородной кислоты с pH 1,5 для недопущения гидролиза хлоридов металлов, захваченных с маточным раствором.

В рамках данной серии экспериментов необходимо было выяснить следующие вопросы:

- выявление рабочего давления фильтрования в диапазоне до 600 кПа, обеспечивающего приемлемую скорость фильтрования;
- определение условий проведения промывки осадка (давление и расход промывной жидкости, давление подпрессовки мембранами, длительность промывки), обеспечивающих требуемую степень вытеснения из его пор маточного раствора при минимальном разбавлении его промывной жидкостью;
- установление оптимальной толщины отфильтрованного осадка из условий получения максимально возможной производительности фильтр-пресса;
- определение влияния давления отжима отфильтрованного осадка в диапазоне 600–800 кПа и его длительности на влажность осадка;
- расчет рабочей циклограммы эксплуатации фильтр-пресса и его производительности;
- выбор типоразмера и требуемого количества фильтр-прессов.

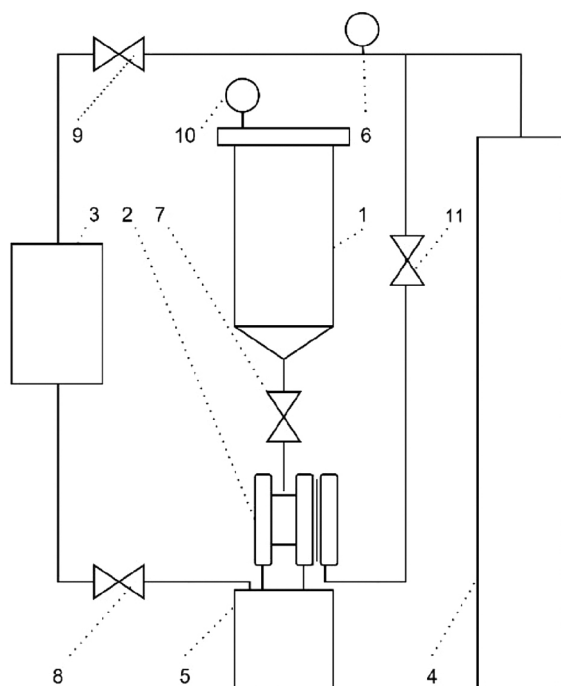


Рис. 2. Экспериментальная фильтровальная установка

Fig. 2. An experimental filtering unit

Экспериментальная фильтровальная установка, моделирующая процессы фильтрования и промывки осадка на фильтр-прессах с вертикальными плитами (рис. 2), содержит вертикальную цилиндрическую емкость 1 для фильтруемой суспензии, оснащенную перемешивающим устройством и греющей рубашкой (на рис. 2 не показаны), фильтрующую ячейку 2, емкость для промывной жидкости 3 и емкость для сбора фильтрата 5. Для управления технологическими операциями установку оснастили запорной арматурой – краны 7, 8, 9, 11. Движущую силу процессов фильтрования и промывки – избыточное давление – обеспечивали с помощью сжатого воздуха от компрессора 4 и регулировали газовым редуктором 6. Для контроля за давлением фильтрования на крышке емкости 1 установлен манометр 10.

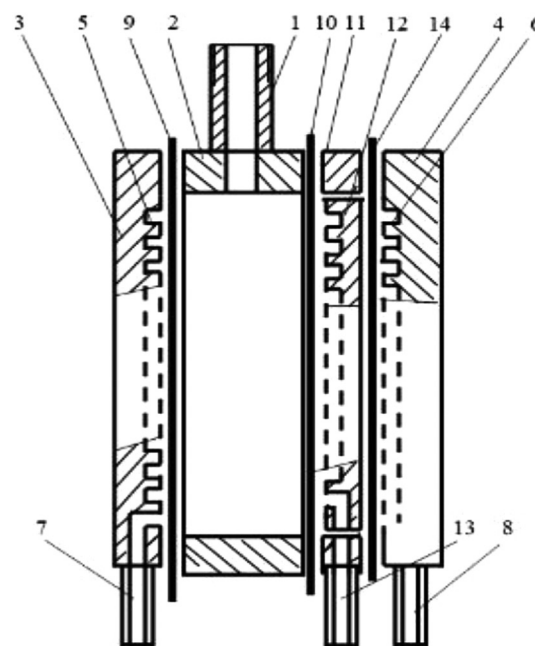


Рис. 3. Фильтрующая ячейка экспериментальной фильтровальной установки

Fig. 3. A filter cell of the experimental filtering unit

Фильтрующая ячейка (рис. 3) содержит резьбовой патрубок 1, приваренный к рамке 2, служащей фильтровальной камерой, а также два фланца 3 и 4. Фланцы имеют дренажные элементы 5 и 6, а также патрубки отвода фильтрата 7 и 8. Между фланцами 3, 4 и рамкой 2 устанавливаются фильтрующие салфетки 9 и 10, и вся ячейка герметизируется с помощью болтов (на рис. 3 не показаны). В составе установки имеются рамки с шириной кольца 10, 20 и 30 мм для моделирования



фильтровальных плит с глубиной камер фильтрования, соответственно, 5, 10 и 15 мм.

В случаях, когда предполагается проводить эксперименты с применением прессования осадка мембраной, между фильтрующей салфеткой 10 и фланцем 4 устанавливается дополнительное кольцо 11, снабженное патрубком отвода фильтрата 13, а также подвижный дренажный элемент 12 и эластичная мембрана 14.

Расчет удельной производительности фильтр-пресса для различных изученных режимов выполнялся по формуле:

$$Q_c = \frac{V_c \cdot 60}{f \cdot T_{\text{ц}}}, \quad (1)$$

где  $Q_c$  – удельная производительность фильтр-пресса по суспензии,  $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{ч}$ ;  $V_c$  – объем суспензии, отфильтрованный за один цикл,  $\text{м}^3$ ; 60 – коэффициент для отнесения длительности отдельных операций к часу;  $f$  – поверхность фильтрования экспериментальной установки,  $\text{м}^2$ ;  $T_{\text{ц}}$  – длительность всего цикла работы фильтр-пресса, мин.

При необходимости расчета удельной производительности по фильтрату или сухому осадку в формулу (1) вместо значения  $V_c$  (объем суспензии) подставляли полученные в экспериментах объемы фильтрата или массу осадка.

Результаты расчета производительности фильтр-пресса позволили установить оптимальную толщину рамки, при которой обеспечивается максимальная производительность, и тем самым определили требуемую глубину камеры фильтровальной плиты, которая в данном случае соответствовала половине оптимальной толщины рамки.

Выбранное значение производительности использовали для определения необходимой поверхности фильтрования по формуле:

$$F = \frac{A}{Q}, \quad (2)$$

где  $F$  – общая необходимая поверхность фильтрования,  $\text{м}^2$ ;  $A$  – общее количество суспензии (фильтрата, сухого осадка), которое необходимо обработать в час;  $Q$  – удельная производительность фильтр-пресса по суспензии (фильтрату, сухому осадку).

Используя полученные значения общей необходимой поверхности фильтрования, выбирали из типоразмерного ряда поверхность фильтрования одного фильтр-пресса и определили общее количество фильтр-прессов.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Параметры и результаты эксперимента по разделению пульпы представлены в табл. 1.

При фильтровании пульпы с использованием ткани S-2180-L2 и S-1197-L2K2 проникновение твердых частиц было одинаковым и в том, и другом случае. И составило 6–7  $\text{г}/\text{дм}^3$  взвешенных веществ. А при использовании ткани S-2193-L2K2 проникновение составило 12–13  $\text{г}/\text{дм}^3$  взвешенных веществ. Все три ткани позволили накопить фильтрующий слой осадка на поверхности. Ткань S-2193-L2K2 менее плотная, имеет большую воздухопроницаемость. При этом она устойчива к высоким рабочим температурам и растворам кислот, что в совокупности повлияло на ее выбор для реализации дальнейших исследований.

Влажность промытого полиметаллического шлама составляла 55–57% масс., а влажность промытого шлама после выщелачивания – 59–61% масс.

В результате лабораторных исследований установлено, что увеличение температуры с 60 до 80°C способствует увеличению скорости фильтрования в 1,2–1,4 раза (серия экспериментов № 1–3).

Определено, что введение в пульпу флокулянта Praestol-650 (Solenis, США) в виде 0,2% раствора, приготовленного на основе маточного раствора, в количестве 20 мл/л исходной пульпы увеличивает скорость фильтрования в 1,6–1,8 раза (эксперименты № 12, 13). Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что введение флокулянта интенсифицирует процесс фильтрования и, кроме того, предотвращает такое нежелательное явление, как проникновение в первые порции фильтрата мельчайших частиц гидроксидов металлов, которые загрязняют его и делают необходимым возврат первой порции фильтрата в технологический цикл. По данным химических анализов концентрация взвешенных веществ в фильтратах при фильтровании с применением флокулянта составляет от 0,01 (и менее) до 0,14  $\text{г}/\text{дм}^3$ .

В результате лабораторных исследований процесса фильтрования установлено, что выход фильтрата составляет ~ 0,6  $\text{кг}/\text{дм}^3$  пульпы после выщелачивания полиметаллического шлама. Выход промытого осадка в среднем составляет ~ 0,4  $\text{кг}/\text{дм}^3$  с влажностью 59–61%. При фильтровании пульпы после выщелачи-

**Таблица 1.** Результаты экспериментов по фильтрованию пульпы после гидрометаллургической переработки полиметаллического шлама и промывке полученного осадка

**Table 1.** Experimental results on pulp filtering after hydrometallurgical processing of polymetallic sludge and washing of the resulting sediment

№	Т пульпы, °С	m пульпы, г	Вода для промывки		t, мин		ω осадка, %	Промывная вода	
			pH	T, °С	Фильтрова- ние	Промывка		MgCl <sub>2</sub> , г/дм <sup>3</sup>	HCl, г/дм <sup>3</sup>
1	60	250	6,9	60	6	—	59,5	—	—
2	60	250	6,9	60	7	—	59,5	—	—
3	80	250	6,9	60	5	—	59,9	—	—
4	80	250	1,5	60	5	55	59,9	25,7	4,80
5	80	250	1,5	60	5	25	58,5	52,0	5,70
6	80	250	1,5	60	5	18	59,1	60,1	7,30
7	80	250	1,0	60	5	28	59,0	53,1	7,00
8	80	250	1,5	60	5	40	60,1	38,0	6,56
9	80	250	1,0	60	5	5	60,2	53,2	8,75
						10		27,1	4,37
						15		18,1	2,18
						28		8,2	1,46
10	80	250	1,5	60	5	4	59,5	59,8	5,50
						8		30,0	2,75
						14		16,1	2,40
						25		10,5	1,20
11	80	500	1,5	60	13	105	61,0	40,5	7,1
12	80	250	1,5	60	4	65	61,2	48,5	7,20
13	80	500	1,5	60	12	120	61,9	47,2	6,50

вания полиметаллического шлама непромытые осадки содержат в среднем 6–8% MgCl<sub>2</sub>, характеризуются как мажущие. Очистка фильтровальной ткани после снятия непромытого осадка затруднена, что может привести к ухудшению ее фильтрационных свойств и сокращению срока службы ткани. Промывка осадков от солей уменьшает их адгезию к различным поверхностям, улучшает транспортные свойства и сьем осадка с фильтровальной ткани.

Промывка осадка на фильтре является более простым способом, позволяющим избежать применения больших емкостей для промывки. Во время промывки осадков на фильтре протекают различные процессы: гидродинамический – вытеснение фильтра из всех проточных пор осадка различного сечения; диффузионный – удаление примесей в результате молекулярной диффузии из тупиковых пор осадка; коллоидный, или физико-химический процесс, который сопровождается десорбцией вещества с поверхности твердых частиц в промывную жидкость [20].

Промывка водопроводной водой остатка от выщелачивания затруднена ввиду обра-

зования новой коллоидной фазы вследствие развития гидролиза хлорида железа (III), захваченного осадком на стадии фильтрования. Гидролиз развивается в результате увеличения pH раствора в составе пульпы из-за добавления воды. Появление коллоидно-дисперсной фазы раствора в составе пульпы выщелоченного полиметаллического шлама является причиной остановки процесса промывки (серия экспериментов № 1–3). Дальнейшие эксперименты по промывке осадка проводили с использованием подкисленной воды.

На основании обобщенных данных, полученных в ходе экспериментов № 9 и 10, построили графики изменения содержания HCl (рис. 4 а) и MgCl<sub>2</sub> (рис. 4 б) в отработанной промывной воде с исходным показателем pH «воды» 1,0 и pH 1,5. В первых трех порциях объемом равным 25 см<sup>3</sup> концентрация соляной кислоты снижалась линейно, а затем при прохождении четвертой и пятой порции воды в осадке получил развитие гидролиз FeCl<sub>3</sub>, поэтому концентрация соляной кислоты в промывных водах практически не изменялась. В подтверждение этому факту является окраска отработанных промывных вод в светло-корич-

невый цвет, которую придал им коллоидный раствор гидроксида железа (III). В последующих трех порциях промывных вод концентрация  $\text{HCl}$  продолжала снижаться. Таким образом, использование подкисленной воды для промывки осадка не исключило гидролиз, но способствовало сдерживанию его развития и возможности завершить процесс промывки. Оптимально использование воды для промывки с pH 1,5 по причине меньшего времени, затрачиваемого на промывку осадка, при прочих равных условиях. Анализ содержания  $\text{MgCl}_2$  в составе отработанной промывной воды указывает на возможность объединения первой четверти объема промывной воды с фильтратом.

Анализ данных, полученных в ходе эксперимента № 11, свидетельствует о снижении фильтрующих характеристик и эффективности промывки при увеличении толщины слоя осадка.

При реализации экспериментов № 12 и 13 по промывке осадка, обработанного для интенсификации разделения пульпы флокулянтom Praestol-650, установлено, что такой осадок плохо поддается промывке. Остаточное содержание  $\text{MgCl}_2$  в осадке, обработанном флокулянтom, составляет 2,1–3,0% против 0,8–1,5% в осадке, не подвергнутом обработке.

С увеличением объема воды, подаваемой на промывку, скорость процесса замедляется. Основную массу растворенного  $\text{MgCl}_2$  удается отмыть из осадка при таком соотношении: Т:Ж=1:2 – до 90%. При других рас-

ходах степень отмывки осадка составляет: 50–60% при Т:Ж=1:0,5; 70–80% при Т:Ж=1:1; 80–85% при Т:Ж=1:1,5. Оптимальная температура воды для промывки соответствует 60°C. Влажность промытых осадков составляет 59–61% масс. Промытые и отжатые осадки можно характеризовать как ломкие, хорошо снимающиеся с фильтровальной ткани. Промывка и отжим осадков уменьшают их адгезию к различным поверхностям, улучшая их транспортабельные свойства и съем с фильтровальной ткани.

Таким образом, по результатам первой серии экспериментов была сформулирована задача обеспечить полный цикл разделения пульпы, состоящей из полидисперсного тонкого осадка, обладающего высокой величиной гидравлического сопротивления, и агрессивного раствора хлоридов металлов. По результатам исследования состава и структуры пульпы принято решение разделять потоки по средствам камерного и камерно-мембранного фильтр-пресса при постоянном перепаде давления от 400 до 800 кПа.

Основными достоинствами фильтр-пресса являются сравнительно высокая способность к обезвоживанию пульпы, обеспечение глубокой промывки осадка, возможность исполнения аппарата из коррозионностойких материалов, способных работать в условиях агрессивных сред. Фильтр-прессы, оснащенные эластичными мембранами, дополнительно позволяют избежать растрескивания высокодисперсного осадка в ходе промывки и достичь

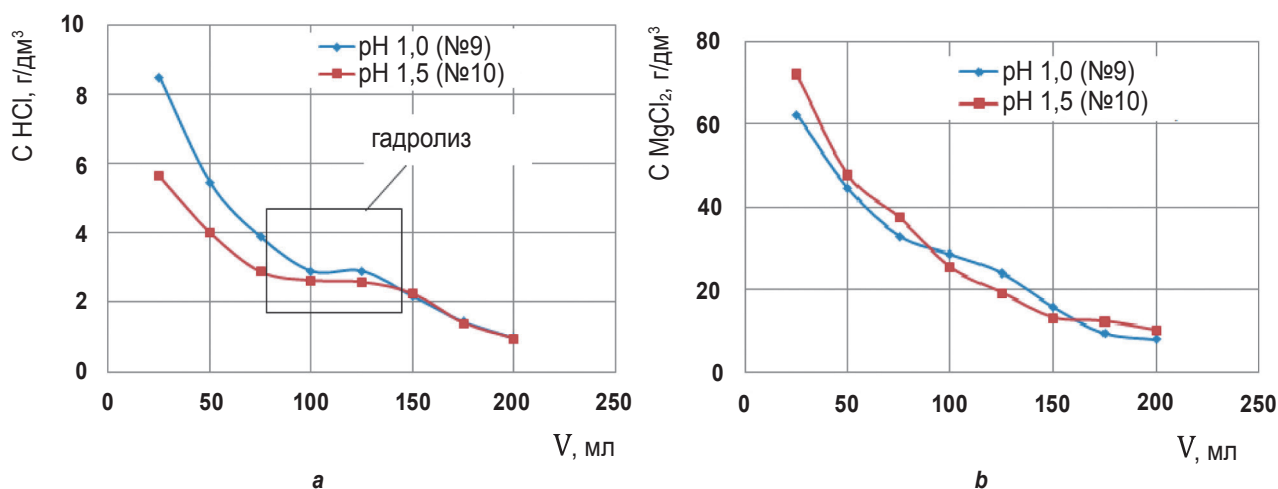


Рис. 4. Графики изменения содержания  $\text{HCl}$  (а) и  $\text{MgCl}_2$  (б) в отработанной промывной воде с исходным показателем pH воды 1,0 и 1,5  
 Fig. 4. Graphs of  $\text{HCl}$  (а) and  $\text{MgCl}_2$  (б) content variation in waste wash water with the initial pH water of 1.0 and 1.5

улучшенных характеристик по остаточной влажности. Процесс съема осадка в промышленном масштабе реализуется посредством автоматизированного встряхивания камер, вследствие чего промытый и отжатый осадок самостоятельно перемещается в приемную емкость, таким образом достигается полная автоматизация фильтровального передела.

Результаты экспериментов по разделению пульпы после выщелачивания полиметаллического шлама с использованием ячейки, моделирующей работу камерно-мембранного фильтр-пресса с вертикальным расположением рам, представлены на рис. 5 и 6.

Установлено, что суспензия относится к трудно фильтруемым: в эксперименте № 1а при использовании ячейки глубиной 30 мм через 160 мин, когда скорость выделения фильтрата существенно снизилась, фильтрование прекратили, отжали осадок давлением 600 кПа и просушили его. После вскрытия ячейки установили, что верхняя ее часть заполнена мягким неуплотненным осадком и неотфильтрованной суспензией. Представляется, что для данной суспензии получение нормального осадка толщиной 30 мм проблематично и не рационально. Дальнейшие эксперименты на модели камерно-мембранного фильтр-пресса выполнялись с использованием фильтровальной ячейки глубиной 20 мм (эксперименты № 2а, 3а, 5а) и 10 мм (эксперименты № 4а, 6а).

Первые эксперименты по фильтрованию суспензии (эксперименты № 1а, 2а) показали, что через 40–50 мин от начала процесса скорость выделения фильтрата существенно снижается. В эксперименте № 2а по истечении 45 мин фильтрования процесс был остановлен и осадок отжат мембраной давлением 800 кПа. Осмотр осадка показал, что большая его часть была довольно плотной, однако сверху (в районе подачи суспензии) осадок оказался влажным и неуплотненным. В эксперименте № 3а длительность фильтрования была увеличена до 52 мин. Осадок был промыт, отжат давлением 600 кПа и выгружен в виде равномерно уплотненного коржа толщиной 18–19 мм. Влажность осадка в обоих случаях (отжим давлением 600 и 800 кПа) была практически одинакова и составляла 56,9% и 55,5% соответственно.

Эксперименты № 3а и 5а выполнены на ячейке с глубиной 20 мм с промывкой осадка.

Во избежание растрескивания осадка во время промывки он был поджат мембраной давлением 300 и 400 кПа. По окончании промывки осадок отжали мембраной давлением 600 кПа (эксперимент № 3а) и 800 кПа (эксперимент № 5а) с последующей просушкой сжатым воздухом давлением 500 кПа. Влажность осадков составила 55,5 и 54,5% соответственно. Скорость фильтрования в момент окончания заполнения ячейки не превышала 31 л/м<sup>2</sup>·ч.

В эксперименте № 3а промывка осадка осуществлялась двумя объемами воды по отношению к массе влажного осадка, а в эксперименте № 5а промывка осадка выполнялась одним объемом воды. Остаточное содержание  $MgCl_2$  в сухом осадке составило 0,51% масс. (эксперимент № 3а) и 1,05% масс. (эксперимент № 5а), при этом общая производительность (с учетом промывки) составила 0,0045 и 0,0076 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч соответственно.

Графики, представленные на рис. 6, иллюстрируют замедление скорости промывки при пропуске второго объема воды по отношению к массе влажного осадка с одновременным снижением ее эффективности с точки зрения содержания вымываемого компонента в промывных водах. С учетом значений остаточной концентрации  $MgCl_2$  в сухом осадке и общей производительности процесса установлено, что промывку в условиях применения камерно-мембранного фильтр-пресса целесообразно осуществлять одним объемом воды по отношению к массе влажного осадка.

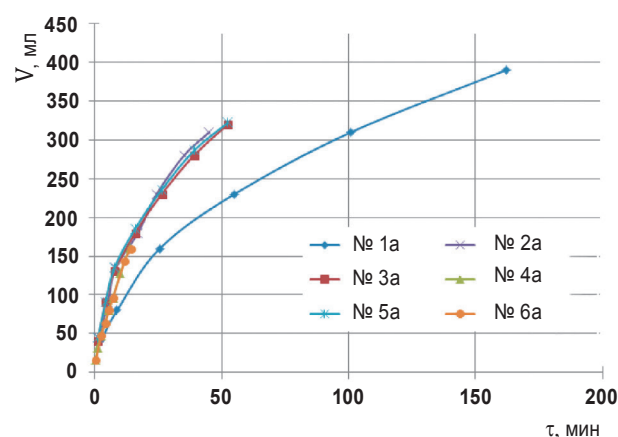


Рис. 5. Протекание процесса фильтрования во времени

Fig. 5. Filtering progression over time

Эксперименты № 4а и 6а были выполнены на ячейке с глубиной 10 мм с промывкой



осадка. Во избежание растрескивания осадка во время промывки он был поджат мембраной давлением 300 кПа. По окончании промывки осадок был отжат мембраной давлением 800 кПа с последующей просушкой сжатым воздухом давлением 400 кПа (эксперимент № 4а) и 800 кПа (эксперимент № 6а). Влажность осадков составила 54,5 и 54,2%. Скорость фильтрования в момент окончания заполнения ячейки достигла 56 л/м<sup>2</sup>·ч и почти в два раза превысила аналогичный показатель при использовании ячейки глубиной 20 мм.

В эксперименте № 4а промывка осадка осуществлялась двумя объемами воды по отношению к массе влажного осадка, а в эксперименте № 6а промывка осадка выполнялась одним объемом воды. Остаточное содержание MgCl<sub>2</sub> в сухом осадке составило 0,48% масс. (эксперимент № 4а) и 0,82% масс. (эксперимент № 6а), при этом общая производительность (с учетом промывки) составила 0,0059 и 0,0099 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч, что на 30% больше, чем в экспериментах с ячейкой глубиной 20 мм.

Закономерность в отношении оптимального количества промывной воды равного одному объему от массы влажного осадка, установленная при анализе данных экспериментов № 3а и 5а, подтвердилась в экспериментах № 4а и 6а (рис. 6).

Установлено, что электропроводность промывных вод, определенная с помощью кондуктометра, прямо пропорционально зависит от концентрации MgCl<sub>2</sub>, что может быть использовано при проектировании системы автоматического контроля процесса промывки осадка.

Анализ экспериментальных данных свидетельствует о том, что первую порцию промывных вод (1/5 часть от объема промывной воды) следует объединять с фильтратом. Данное наблюдение согласуется с выводами, полученными при разделении суспензии с использованием вакуум-фильтра в первой серии экспериментов.

В ходе проведенных исследований установлено, что расход воздуха при просушке составляет 180–200 л/м<sup>2</sup>·мин (относится к поверхности, на которую подается воздух, т.е. к половине поверхности фильтрования).

Использование мембран во время операций «промывка» и «просушка» уплотняет осадок, не давая ему растрескаться, что создает

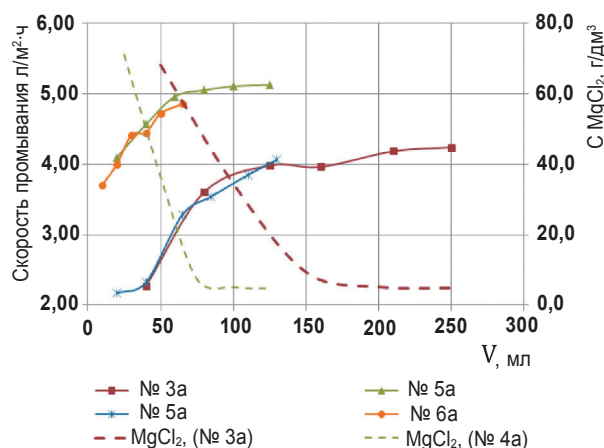


Рис. 6. Зависимость скорости промывки и содержания MgCl<sub>2</sub> в равных порциях промывной воды от объема отработанной промывной воды

Fig. 6. Dependence of the washing rate and MgCl<sub>2</sub> content in equal portions of wash water on the waste wash water volume

более стабильные условия при выполнении этих операций, а также снижает расход воды и воздуха. Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что для подпрессовки осадка во время указанных операций достаточно давления 800 кПа.

Первые порции фильтрата (~2–3% всего объема) грязные, последующие – прозрачные. При необходимости можно предусмотреть отдельный отвод первых порций фильтрата.

Целесообразно применение мембранных плит с суммарной глубиной фильтровальных камер 10 мм (толщина осадка – 10 мм). Максимальное давление, подаваемое на мембраны – 800 кПа.

Ориентировочная циклограмма работы фильтр-пресса представлена в табл. 2.

Таблица 2. Ориентировочная циклограмма работы фильтр-пресса

Table 2. Approximate cyclogram of filter press operation

Наименование операции	т, мин	Р, кПа
Фильтрование	15	500
Промывка	70	400
Прессование	3	800
Просушка	2	600
Вспомогательные операции	15	–
ИТОГО цикл	105	–

Расчетная удельная производительность по фильтрату составляет 0,0069 м<sup>3</sup>/м<sup>2</sup>·ч.

При мощности в 100000 т/год очищенного раствора хлорида магния из серпентинита образуется 8000 т/год влажного полиметалли-

ческого шлама, при выщелачивании которого получается 16010 т/год или 1,9 т/ч фильтрата. Для получения 1,9 т/ч фильтрата потребуется 255 м<sup>2</sup> поверхности фильтрования, что с запасом может быть обеспечено одной стандартной машиной с поверхностью фильтрования 500 м<sup>2</sup> (Shanghai Junyi Filtration Equipment Co., Ltd, Китай).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разделение пульпы гидрометаллургической переработки полиметаллического шлама с использованием модели камерно мембранного фильтр-пресса с вертикальным расположением плит позволяет минимизировать объем промывных вод, вернуть захваченный осадком маточный раствор в технологию и получить качественный промытый осадок с минимальным содержанием остаточных солей, пригодный для производства железоксидного пигмента.

2. Установлено, что фильтрование пульпы после гидрометаллургической переработки полиметаллического шлама следует осуществлять с использованием фильтровальных салфеток, изготовленных из 100%-го полипропилена, с удельным весом ткани 540 г/м<sup>2</sup> ± 10%, воздухопроницаемостью при 200 Па 6 л/дм<sup>2</sup> в мин ± 30% и максимальной рабочей температурой не менее 90°C. Фильтровальные плиты следует изготовить из полипропилена.

3. Оптимальная температура пульпы, поступающей на фильтрование, соответствует 80°C, температура воды для промывки – 60°C. Лимитирующей стадией процесса разделения пульпы является промывка осадка. Промывка осадка осуществима методом вытеснения при условии использования подкисленной воды с pH 1,5, при соотношении Т:Ж=1:1.

4. Разработана методика оценки влажности осадков, пригодная как для гидрометаллургической переработки полиметаллического шлама, так и для железосодержащего концентрата, которая позволяет объединить противоречивые данные по влажности полиметаллического шлама, приведенные в разных специализированных источниках.

5. Определены критерии для проектирования системы автоматического контроля и управления процессами разделения суспензии, а также промывки осадка с применением фильтр-пресса, оснащенного эластичными мембранами.

6. Выполнен расчет удельной производительности фильтр-пресса. Установлено, что стандартная машина с поверхностью фильтрования 500 м<sup>2</sup>, с вертикальным расположением плит, обладающих глубиной фильтровальной камеры 5 мм (суммарно две плиты 10 мм), с запасом обеспечит разделение пульпы, полученной при глубокой переработке 8000 т/год влажного полиметаллического шлама.

## Список источников

1. Devisilov V., Sharay E., Myagkov I. Filtering of high solids concentration media using complex powerful to the flow // *Safety in Technosphere*. 2020. Vol. 9. Iss. 2. P. 49–53. <https://doi.org/10.12737/1998-071X-2021-9-2-49-53>. EDN: CDTGBA.
2. Соковнин О.М., Загоскина Н.В., Загоскин С.Н. Исследование процесса объемного фильтрования суспензии золых частиц // *Теоретические основы химической технологии*. 2015. Т. 49. № 5. С. 595. <https://doi.org/10.7868/s0040357115040156>. EDN: UGESXD.
3. Балмаев Б.Г., Киров С.С., Иванов М.А., Пак В.И. Моделирование процесса фильтрования алюминийсодержащей солянокислой пульпы // *Цветные металлы*. 2017. № 10. С. 63–68. <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.10.07>. EDN: ZXAMSL.
4. Толкачев В.А., Майников Д.В., Пасхин Н.П., Мешков Е.Ю. Исследование процессов сгущения и фильтрования пульпы «желтого кека» (полиураната аммония), образующегося на предприятиях подземного выщелачивания урана // *Цветные металлы*. 2023. № 1. С. 16–20. <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.01.02>.
5. Дзюбо В.В. Влияние характеристик фильтрующих материалов на технологические параметры процесса фильтрования при водоподготовке // *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. 2019. Т. 134. № 2. С. 44–50. EDN: YVCRJJ.
6. Дзюбо В.В. Технологические параметры фильтрования природных вод в режиме нестационарных скоростей // *Экология и промышленность России*. 2007. № 11. С. 16–18. EDN: JWMHFT.
7. Таран Ю.А., Козлов А.В. Математическое описание процесса фильтрования с закупориванием пор фильтровальной перегородки // *Математические методы в технике и технологиях*. 2020. Т. 2. С. 99–102. EDN: WDIREE.
8. Ульрих Е.В., Баркова А.С. Параметры флокуляции сточных вод с последующим фильтрованием на пресс-фильтрах // *Известия КГТУ*. 2022. № 66. С. 53–64. <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2022-66-53-64>. EDN: IPERXG.

9. Ajao V., Bruning H., Rijnaarts H., Temmink H. Natural flocculants from fresh and saline wastewater: comparative properties and flocculation performances // *Chemical Engineering Journal*. 2018. Vol. 349. P. 622–632. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.05.123>.
10. Гонтарж Э.А. Эффективное решение задачи фильтрования в процессе разделения промышленных суспензий // *Металлург*. 2010. № 11. С. 27–28. EDN: NCHNNH.
11. Орешкина М.В. К вопросу фильтрования суспензии в динамическом фильтре-прессе // *Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева*. 2019. № 1. С. 129–133. EDN: ZTOVLV.
12. Loan M., Newman O.M.G., Cooper R.M.G., Farrow J.B., Parkinson G.M. Defining the paragoethite process for iron removal in zinc hydrometallurgy // *Hydrometallurgy*. 2006. Vol. 81. Iss. 2. P. 104–129. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.11.002>.
13. Неизвестных Н.Н., Богданов А.В., Мячин А.В., Федотов К.В. Исследование процессов сгущения пульп руд золото-серебрянных месторождений «Биркачан» и «Цоколь» // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2013. № 6. С. 147–151. EDN: QCRBZD.
14. Владимиров А.С., Катышев С.Ф., Теслюк Л.М. Совершенствование процесса промывки аморфного диоксида кремния, полученного при солянокислотном выщелачивании серпентинита // *Химическая технология*. 2015. Т. 16. № 3. С. 139–141. EDN: TKVKJP.
15. Hedin R. Recovery of marketable iron oxide from mine drainage in the USA // *Journal of Land Contamination and Reclamation*. 2003. Vol. 11. Iss. 3. P. 93–97. <https://doi.org/10.2462/09670513.802>.
16. Майников Д.В., Толкачев В.А., Смирнов К.М. Применение колонных аппаратов с пульсационным перемешиванием для классификации, выделения и промывки песков в гидрометаллургии // *Химическая технология*. 2018. Т. 19. № 2. С. 88–92. EDN: YOKBEE.
17. Мохирева Н.Л., Миролюбов В.Р., Низов В.А. Комплексное использование отхода производства оксида магния с получением модифицированного железооксидного пигмента и никелевого концентрата // *Химическая технология*. 2020. Т. 21. № 4. С. 156–162. <https://doi.org/10.31044/1684-5811-2020-21-4-156-162>. EDN: GXCQJT.
18. Мохирева Н.Л., Миролюбов В.Р., Низов В.А. Перспективы применения пигментов, полученных из железосодержащих шламов, в составе строительных и лакокрасочных композиций // *Экология и промышленность России*. 2020. Т. 24. № 5. С. 14–20. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-5-14-20>. EDN: WMOIKQ.
19. Фрейдлина Р.Г., Пастухова Т.Я., Сабуров Л.Н., Овчинникова Н.Б., Дудина М.В. Очистка хлормagneйевых растворов от примесей нейтрализацией и фильтрованием // *Цветная металлургия*. 2006. № 9. С. 23–25.
20. Жужиков В.А. Фильтрование: теория и практика разделения суспензий. М.: Химия, 1971. 440 с.

## References

1. Devisilov V., Sharay E., Myagkov I. Filtering of high solids concentration media using complex powerful to the flow. *Safety in Technosphere*. 2020;9(2):49-53. <https://doi.org/10.12737/1998-071X-2021-9-2-49-53>. EDN: CDTGBA.
2. Sokovnin O.M., Zagorskina N.V., Zagoskin S.N. A study of the deep-bed filtration of a suspension of ash particles. *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii = Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2015;49(5):595. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0040357115040156>. EDN: UGESXD.
3. Balmaev B.G., Kirov S.S., Ivanov M.A., Pak V.I. Filtration process modeling for aluminium-bearing hydrochloric acid pulp. *Tsvetnye Metally*. 2017;10:63-68. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2017.10.07>. EDN: ZXAMSL.
4. Tolkahev V.A., Maynikov D.V., Pashin N.P., Meshkov E.Yu. Understanding the processes of thickening and filtration of yellow cake slurry (ammonium polyuranate) generated by in-situ uranium leaching sites. *Tsvetnye Metally*. 2023;1:16-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.17580/tsm.2023.01.02>.
5. Dzjubo V.V. Influence of characteristics of the filtering materials on technological parameters of process of filtering at water treatment. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*. 2019;2:44-50. (In Russ.). EDN: YVCRJJ.
6. Dzjubo V.V. Technological parameters of natural water filtering in a non-stationary speed mode. *Ekologiya i promyshlennost Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2007;11:16-18. (In Russ.). EDN: JWMHFT.
7. Taran Y.A., Kozlov A.V. Mathematical description of the filtration process with clogging of the filter partition pores. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyah*. 2020;2:99-102. (In Russ.). EDN: WDIREE.
8. Ul'rikh E.V., Barkova A.S. Parameters of wastewater flocculation with subsequent filtration on press filters. *Izvestiya KGTU*. 2022;66:53-64. (In Russ.). <https://doi.org/10.46845/1997-3071-2022-66-53-64>. EDN: IPERXG.
9. Ajao V., Bruning H., Rijnaarts H., Temmink H. Natural flocculants from fresh and saline wastewater: comparative properties and flocculation performances. *Chemical Engineering Journal*. 2018;349:622-632. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.05.123>.
10. Gontarzh E.A. An effective solution of filtration problem when separating industrial suspensions. *Metallurg*. 2010;11:27-28. (In Russ.). EDN: NCHNNH.
11. Oreshkina M.V. To the question of filtering suspensions in a dynamic filter press. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo agrotekhnologicheskogo universiteta im. P.A. Kostycheva*. 2019;1:129-133. (In Russ.). EDN: ZTOVLV.
12. Loan M., Newman O.M.G., Cooper R.M.G., Farrow J.B., Parkinson G.M. Defining the paragoethite process for iron removal in zinc hydrometallurgy. *Hydrometallurgy*. 2006;81(2):104-129. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2005.11.002>.
13. Neizvestnykh N.N., Bogdanov A.V., Myachin A.V., Fedotov K.V. Studying ore pulp thickening of “Birkachan” and “Tsokol” gold-silver deposits. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2013;6:147-151. (In Russ.). EDN: QCRBZD.



14. Vladimirov A.S., Katyshev S.F., Teslyuk L.M. Improving washing of amorphous silicon dioxide obtained by serpentinite leaching with hydrochloric acid. *Himicheskaya tekhnologiya = Journal of Chemical Technology*. 2015; 3 (16):139–141. (In Russ.). EDN: TKVKJP.
15. Hedin R. Recovery of marketable iron oxide from mine drainage in the USA. *Journal of Land Contamination and Reclamation*. 2003;11(3):93-97. <https://doi.org/10.2462/09670513.802>.
16. Maynikov D.V., Tolkachyov V.A., Smirnov K.M. Application column apparatus with pulsating stirring for classification, separation and washing sands in hydrometallurgy. *Himicheskaya tekhnologiya = Journal of Chemical Technology*. 2018;2:88-92. (In Russ.). EDN: YOKBEE.
17. Mokhireva N.L., Mirolubov V.R., Nizov V.A. Complex use of magnesium oxide manufacture waste with production of modified iron oxide pigment and nickel concentrate. *Himicheskaya tekhnologiya = Journal of Chemical Technology*. 2020;4:156-162. (In Russ.). <https://doi.org/10.31044/1684-5811-2020-21-4-156-162>. EDN: GXCQJT.
18. Mokhireva N.L., Mirolubov V.R., Nizov V.A. Prospects for the use of pigments obtained from iron-containing sludge in the composition of construction and paint compositions. *Ekologiya i promyshlennost Rossii = Ecology and Industry of Russia*. 2020;24 (5):14-20. (In Russ.). <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-5-14-20>. EDN: WMOIKQ.
19. Freidlina R.G., Pastukhova T.Y., Saburov L.N., Ovchinnikova N.B., Dudina M.V. Purification of magnesium chloride solutions from impurities by neutralization and filtration. *Tsvetnaya Metallurgiya = Nonferrous metallurgy*. 2006;9:23-25. (In Russ.).
20. Zhuzhikov V.A. *Filtering: theory and practice of suspension separation*. Moscow: Khimiya; 1971, 440 p. (In Russ.).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Мохирева Наталья Леонидовна**,  
заместитель директора по развитию  
по научно-исследовательской работе и технологии,  
ООО «Бергауф Строительные Технологии»,  
620014, г. Екатеринбург, ул. Шейнкмана, 75, Россия  
✉ khohlun@mail.ru

**Логинова Ирина Викторовна**,  
д.т.н., профессор,  
профессор кафедры металлургии цветных металлов,  
Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия  
i.v.loginova@urfu.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-1627-4634>

**Миролюбов Виталий Романович**,  
к.х.н., доцент,  
доцент кафедры технологии  
электрохимических производств,  
Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия  
v.r.mirolyubov@urfu.ru

**Шопперт Андрей Андреевич**,  
д.т.н., доцент,  
доцент кафедры металлургии цветных металлов,  
Уральский федеральный университет имени  
первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, Россия  
a.a.shoppert@urfu.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-9684-9628>

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Natalya L. Mokhireva**,  
Deputy Director for Development, Research  
and Technology,  
LLC "Bergauf Construction Technologies",  
75 Sheikman St., Ekaterinburg 620014, Russia  
✉ khohlun@mail.ru

**Irina V. Loginova**,  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Professor of the Department of Non-Ferrous Metals  
Metallurgy,  
Ural Federal University named after the first President  
of Russia B.N. Yeltsin,  
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia  
i.v.loginova@urfu.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-1627-4634>

**Vitaly R. Mirolubov**,  
Cand. Sci. (Chem.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Electrochemical  
Production Technology,  
Ural Federal University named after the first President  
of Russia B.N. Yeltsin,  
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia  
v.r.mirolyubov@urfu.ru

**Andrey A. Shoppert**,  
Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of Non-Ferrous  
Metals Metallurgy,  
Ural Federal University named after the first President  
of Russia B.N. Yeltsin,  
19 Mira St., Ekaterinburg 620002, Russia  
a.a.shoppert@urfu.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-9684-9628>

## Вклад авторов

Авторы выполнили аналитическую работу, на основании полученных результатов провели обобщение, подготовили рукопись к печати.

## Contribution of the authors

The author performed a comprehensive analysis, made a generalization on the basis of the results obtained and prepared the copyright for publication.



**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests.

*The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.*

**Информация о статье**

Статья поступила в редакцию 15.01.2024 г.; одобрена после рецензирования 20.02.2024 г.; принята к публикации 25.02.2024 г.

**Information about the article**

The article was submitted 15.01.2024; approved after reviewing 20.02.2024; accepted for publication 25.02.2024.