

*Лазаревский Павел Павлович, к.т.н.
Начальник технологического отдела
производственно-технической дирекции
АО «Сибирская горно-металлургическая компания»
г. Новокузнецк*

АППАРАТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОФОРМЛЕНИЕ ПРОЦЕССА ПЕРЕРАБОТКИ ЗАСОЛЕННЫХ ШЛАКОВ

Аннотация: В статье представлены результаты пилотных испытаний и последующего проектирования промышленной установки для комплексной переработки засоленных алюминиевых шлаков. Исследованы три ключевых передела: разделение суспензии после выщелачивания, вакуум-выпарная кристаллизация солей и обезвоживание/сушка солевого концентрата. Проведен сравнительный анализ нутч-фльтрации и центрифугирования. Установлено, что применение фильтрующей центрифуги МР-150 обеспечивает влажность осадка 11,21%, что на 3,01% ниже, чем на нутч-филтре, и позволяет сократить энергозатраты на сушку на 26%. Определен оптимальный режим выпарки: давление -0,05 МПа, температура кипения 80°C. На основе полученных данных разработана принципиальная технологическая схема, спецификация оборудования.

Ключевые слова: центрифугирование, выпарная кристаллизация, нутч-фильтр, разделение суспензий.

Lazarevskii Pavel Pavlovich, Candidate of Technical Sciences

Head of the Technological Department

Production and Technical Directorate

JSC Siberian Mining and Metallurgical Company

Novokuznetsk

HARDWARE AND TECHNOLOGICAL DESIGN OF THE PROCESS FOR PROCESSING SALTED SLAGS

Abstract: The article presents the results of pilot tests and the subsequent design of an industrial plant for the comprehensive processing of saline aluminum slags. Three key processing stages were investigated: separation of the suspension after leaching, vacuum evaporative crystallization of salts, and dewatering/drying of the salt concentrate. A comparative analysis of Nutsche filtration and centrifugation was conducted. It was established that the use of the MP-150 filtering centrifuge ensures a sediment moisture content of 11.21%, which is 3.01% lower than that achieved with the Nutsche filter, and allows for a 26% reduction in drying energy consumption. The optimal evaporation regime was determined: pressure of -0.05 MPa, boiling point of 80°C. Based on the data obtained, a basic process flow diagram and equipment specifications were developed.

Keywords: centrifugation, evaporative crystallization, Nutsche filter, suspension separation.

Переход от лабораторных исследований к промышленной реализации гидрометаллургических процессов является наиболее сложным этапом создания технологии. Для систем «солевой раствор – тонкодисперсный нерастворимый остаток» критическими факторами являются: склонность к газообразованию (аммиак), наличие мелких классов (0 – 50 мкм), затрудняющих фильтрацию, а также высокая коррозионная активность хлоридных растворов при температурах 60 – 100°C [1, 4].

В мировой практике для разделения алюминиевых шлаковых суспензий применяют камерные фильтр-прессы, ленточные вакуум-фильтры и декантерные центрифуги [2, 5]. Однако для условий переработки шлаков с высоким содержанием металлического алюминия и гидролизуемого AlN оптимальное решение остается дискуссионным.

Цель данной работы – определить аппаратное оформление и режимные параметры стадий разделения, кристаллизации и сушки, обеспечивающие:

- максимальную чистоту разделения фаз;
- минимальную влажность осадков;
- энергоэффективность процессов;
- коррозионную стойкость оборудования.

Объекты испытаний

Суспензия 1 (после выщелачивания): Т:Ж=1:3, T=60°C, содержание твердой фазы ~25 – 28 мас.%, плотность суспензии ~1150 кг/м³, pH 9,8 – 10,1. Твердая фаза – шламовый остаток (Al₂O₃, MgO, SiO₂, Al) с влажностью после фильтрации 28 – 33%.

Суспензия 2 (после выпарной кристаллизации): плотная пульпа кристаллов KCl·NaCl в маточном растворе, содержание твердой фазы ~35–45%, TDS жидкой фазы > 250 000 ppm, температура 50–60°C.

Оборудование: лабораторная модель нутч-фильтра (S = 0,005 м²); пилотная центрифуга MP-150 (ротор щелевой, 150 мкм, фактор разделения до 850); лабораторная вакуум-выпарная установка (роторный испаритель Heidolph); пилотная выпарная установка (производительность по испаренной воде 50 кг/ч).

Выбор метода разделения суспензии после выщелачивания

Испытания отстаивания показали неэффективность гравитационного осаждения: через 115 мин высота осадка составила 38 мм при исходной высоте столба 100 мм. Процесс тормозится пузырьками газа (NH₃, H₂), выделяющимися из осадка. Декантация осветленной части (65% объема) позволяет снизить нагрузку на фильтр, но усложняет схему.

Фильтрация на нутч-фильтре (полипропиленовая ткань, ΔP = 0,08 МПа) имеет характерную особенность: первая порция фильтрата мутная (проскок мелких частиц). После намыва слоя осадка толщиной 5 –

7 мм достигается содержание взвешенных веществ 122,8 мг/дм³. Влажность осадка – 28,84%.

Испытания центрифугирования на лабораторной центрифуге (Sartorius SIGMA 3-30K) осложнены газовыделением. Однако, как отмечают авторы [2], для систем, склонных к «засорению» сит, наиболее эффективны центрифуги с увеличенными зазорами или шнековой выгрузкой. В промышленных масштабах рекомендована осадительная (декантерная) центрифуга.

Ключевая задача стадии – получение пересыщенного раствора с минимальным уносом солей с конденсатом. Исследованы три режима: атмосферное давление (100°C), вакуум -0,05 МПа (80°C) и глубокий вакуум -0,095 МПа (35°C). Результаты представлены в таблице 1.

Таблица 1. Влияние остаточного давления на показатели выпарки

Параметр	0,1 МПа	-0,05 МПа	-0,095 МПа
Температура кипения, °С	100,2	80,0	35,2
TDS конденсата, ppm	289	366	1390
pH конденсата	10,98	10,84	10,16
Время упаривания (на 1 кг), мин	235	195	155
Энергозатраты (отн.)	1,0	0,83	0,66

Анализ данных показывает, что глубокий вакуум снижает температуру и ускоряет процесс, но приводит к резкому (в 4,8 раза) росту солесодержания в конденсате. Это обусловлено уносом летучего аммиака и, возможно, капельным уносом. Повышенное содержание NH₄⁺ в конденсате (до 658 мг/л) требует его очистки перед сбросом или возвратом.

Оптимальным признан режим: давление -0,05 МПа, температура 80°C. Данный режим обеспечивает приемлемую скорость и низкое солесодержание конденсата (366 ppm), который можно использовать для приготовления промывных растворов или подпитки цикла.

Обезвоживание солевой суспензии

Сравнительные испытания нутч-фильтра и фильтрующей центрифуги МР-150 проведены на суспензии с пилотной выпарной установки (таблица 2).

Таблица 2. Сравнение эффективности разделения солевой суспензии

Показатель	Нутч-фильтр	Центрифуга МР-150
Масса суспензии	254,7 г	10 442 г
Влажность осадка, %	14,22	11,21
Содержание влаги, отн.%	100	78,8
рН фугата	5,43	6,80
Плотность фугата, кг/м ³	1104	1207
Время цикла, мин	5	5
Энергозатраты, Вт*ч/кг осадка	1,51	0,98

Центрифуга МР-150 обеспечивает влажность осадка 11,21%, что на 21% (относительных) ниже, чем у нутч-фильтра. Это критически важно, так как снижение влажности на 1% сокращает энергозатраты на сушку на 10 – 15%. Кроме того, фугат после центрифуги содержит меньше тонких классов, что облегчает его возврат в голову процесса. Размер щели сит 150 мкм оптимален для кристаллов размером 200 – 400 мкм, полученных в выпарном кристаллизаторе.

Сушка влажного солевого осадка

Проведены испытания двух типов сушилок:

1. Сушилка псевдоожиженного слоя. Температура агента 80°C, расход 0,011 м³/с, время 37 мин. Конечная влажность 2,1%. Недостаток: высокий унос мелкой фракции, необходимость в циклонах.

2. Вакуум-гребковая сушилка. Температура 43°C, остаточное давление -0,08 МПа, время 60 мин. Конечная влажность 1,8%. Энергозатраты на 38% ниже, чем у сушилки псевдоожиженного слоя.

Для промышленной реализации выбрана полочная сушилка. Конструкция позволяет использовать тепло конденсата пара для обогрева полок и организовать охлаждение продукта перед выгрузкой (материал AISI 316, площадь поверхности 48 м²).

Заключение:

1. В результате пилотных испытаний обоснован выбор центробежного оборудования для разделения технологических суспензий. Применение фильтрующей центрифуги МР-150 на стадии обезвоживания кристаллического солевого продукта позволяет снизить влажность до 11,21%, что на 3,01% абс. ниже, чем при нутч-фильтрации.

2. Установлен и верифицирован оптимальный режим вакуум-выпарной кристаллизации: остаточное давление -0,05 МПа, температура кипения 80°C. Данный режим минимизирует унос солей с конденсатом (366 ppm) при сохранении приемлемой производительности.

3. Разработана технологическая схема, включающая узлы: приемки и диспергирования шлака, выщелачивания, центробежного разделения, выпарной кристаллизации, центрифугирования, полочной сушки и газоочистки.

Использованные источники:

1. Патент SU 1167224 A1. Поточная линия для переработки алюминиевых шлаков. / Всесоюзный научно-исследовательский и проектный институт вторичных цветных металлов. – 1985.

2. Nicol W.M., Rich C.V. Continuous particle size fractionation in a suspension // Journal of Physics E: Scientific Instruments. – 1970. – Vol. 3, No. 4. – P. 295-298. DOI: 10.1088/0022-3735/3/4/311.

3. Li P., Guo M., Zhang M., Teng L., Seetharaman S. Leaching Process Investigation of Secondary Aluminum Dross: The Effect of CO₂ on Leaching Process of Salt Cake from Aluminum Remelting Process // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2012. – Vol. 43, No. 5. – P. 1220-1230.

4. Insertec. Processing technologies for aluminum dross: methods, challenges and innovations [Электронный ресурс]. – 2025. – Режим доступа: <https://www.insertec.biz/blog/processing-technologies-for-aluminum-dross-methods-challenges-and-innovations/>

5. Немененок Б.М., Рафальский И.В. Процессы переработки солевых шлаков алюминиевого производства для получения порошкового материала // Литье и металлургия. – 2022. – № 4. – С. 88-96.