

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ  
ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ ХЛОРИДНЫХ  
СОЛЕЙ ИЗ ЗАСОЛЕННЫХ ШЛАКОВ АЛЮМИНИЕВОГО  
ПРОИЗВОДСТВА**

*Аннотация: Актуальность исследования обусловлена необходимостью переработки токсичных солевых шлаков вторичной алюминиевой промышленности, содержащих до 25–30% водорастворимых хлоридов калия и натрия. В работе представлены результаты экспериментальной оптимизации процесса водного выщелачивания шлака производства вторичного алюминия. Установлено, что ключевыми факторами, определяющими технико-экономическую эффективность, являются гидромодуль и температура. Показано, что снижение соотношения Т:Ж с 1:5 до 1:3 приводит к незначительному уменьшению извлечения солей (с 325,5 до 293,8 г/кг шлака), но позволяет сократить объем фильтрата на 40%, что критически снижает энергозатраты на стадии выпарки. Определено оптимальное время обработки (20 мин) и доказано отсутствие значимого влияния рН в диапазоне 4–10 и тонины помола (0,3–5,5 мм).*

*Ключевые слова: вторичный алюминий, солевой шлак, водное выщелачивание, хлорид калия, хлорид натрия, гидролиз нитрида алюминия, оптимизация параметров.*

*Lazarevskii Pavel Pavlovich, Candidate of Technical Sciences  
Head of the Technological Department  
Production and Technical Directorate*

**INVESTIGATION AND OPTIMIZATION OF  
HYDROMETALLURGICAL RECOVERY OF CHLORIDE SALTS  
FROM SALINE ALUMINUM PRODUCTION SLAGS**

*Abstract: The relevance of this study is driven by the need to process toxic salt slags from the secondary aluminum industry, which contain up to 25–30% water-soluble potassium and sodium chlorides. This paper presents the results of experimental optimization of the water leaching process for secondary aluminum production slag. It has been established that the key factors determining technical and economic efficiency are the liquid-to-solid ratio and temperature. It is shown that reducing the S:L ratio from 1:5 to 1:3 leads to a slight decrease in salt recovery (from 325.5 to 293.8 g/kg of slag) but allows for a 40% reduction in the filtrate volume, which critically reduces energy consumption at the evaporation stage. The optimal processing time (20 minutes) was determined, and no significant influence of pH in the range of 4–10 or grinding fineness (0.3–5.5 mm) was proven.*

*Keywords: secondary aluminum, salt slag, water leaching, potassium chloride, sodium chloride, aluminum nitride hydrolysis, parameter optimization.*

Образование солевых шлаков является неизбежным следствием переплава алюминиевого лома под слоем флюсов, содержащих эквимолярную смесь NaCl и KCl [1, 3]. В мировой практике на 1 тонну производимого вторичного алюминия приходится от 200 до 500 кг солевого шлака [4]. Данный отход относится к III–IV классу опасности и при складировании на полигонах взаимодействует с атмосферной влагой, что сопровождается эмиссией аммиака, метана и фосфина вследствие гидролиза нитрида алюминия (AlN), карбида (Al<sub>4</sub>C<sub>3</sub>) и фосфида (AlP) [3].

Согласно данным авторов [3], реакция гидролиза AlN (AlN + 3H<sub>2</sub>O → Al(OH)<sub>3</sub> + NH<sub>3</sub>↑) интенсифицируется в щелочной среде, которая

формируется в процессе растворения солей. рН фильтрата в экспериментах достигает значений 9,5 – 10,3, что создает риск дальнейшего взаимодействия металлического алюминия с водой с выделением водорода. Таким образом, технология переработки должна не только обеспечивать максимальный выход солей, но и минимизировать нежелательные побочные реакции.

Целью данной работы является определение оптимальных параметров (гидромодуль, температура, продолжительность, рН, гранулометрический состав), обеспечивающих экономически целесообразное извлечение солей при одновременном подавлении газообразования.

Объектом исследования являлся шлак производства вторичного алюминия. Согласно протоколам входного контроля, шлак представлен двумя фракциями: 0 – 5 мм и 5,1 – 20 мм. Химический состав шлаковой части (рентгенофлуоресцентный анализ, спектрометр SPECTRO XEPOS) приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав минеральной (шлаковой) части

Компонент	Содержание (фр. 0 – 5 мм), мас.%	Содержание (фр. 5 – 20 мм), мас.%
Na <sub>2</sub> O	13,13	13,03
K <sub>2</sub> O	12,41	13,09
MgO	6,23	6,62
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	40,19	36,56
SiO <sub>2</sub>	4,55	5,67
Cl	18,63	19,03
CaO	1,57	2,11
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (общ.)	1,66	2,36
TiO <sub>2</sub> , V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , MnO, ZnO	Σ ~ 1,3	Σ ~ 1,4

Важной характеристикой является содержание металлического алюминия (Al мет. активный): 11,30% для фракции 0 – 5 мм и 12,47% для фракции 5 – 20 мм. Высокое содержание хлоридов (18 – 19% в пересчете на Cl) и оксидов щелочных металлов подтверждает целесообразность гидрометаллургической переработки.

Эксперименты проводили в стеклянном реакторе объемом 2 л, оснащенном верхнеприводной мешалкой ИКА Eurostar 20 (скорость вращения 300 – 500 об/мин). Навеску шлака загружали в дистиллированную воду с заданной температурой (20 – 90°C). После завершения процесса суспензию фильтровали под вакуумом на воронке Бюхнера с использованием бумажного фильтра «синяя лента». Фильтрат анализировали методами:

- ионная хроматография (K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>);
- атомно-абсорбционная спектрометрия (Al, Ca, Mg, Fe, Zn, Pb);
- кондуктометрия (удельная электропроводность, TDS);
- пикнометрический метод (плотность).

Степень извлечения компонента рассчитывали по формуле:

$$E = (C \times V) / (m \times w) \times 100\%^*,$$

где C – концентрация в фильтрате, г/л; V – объем фильтрата, л; m – масса исходного шлака, г; w – массовая доля компонента в исходном шлаке (принималась по данным рентгенофлуоресцентного анализа).

#### *Оптимизация соотношения твердой и жидкой фаз (Т:Ж)*

Определение минимально достаточного расхода воды является ключевой задачей, так как объем фильтрата прямо пропорционален энергозатратам на его последующее упаривание. Проведены эксперименты при соотношениях Т:Ж = 1:1, 1:5, 1:3 и 1:60 (последнее – для оценки предельного извлечения). Результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2. Влияние гидромодуля на показатели процесса (t=20°C, τ=20 мин)

Показатель	1:1	1:5	1:3*	1:60**
TDS фильтрата, ppm	200 060	67 760	110 250	7 392
Na <sup>+</sup> , мг/л	97 375	13 170	18 188	1 755
K <sup>+</sup> , мг/л	62 188	16 250	30 500	878
Cl <sup>-</sup> , мг/л	195 860	37 710	65 140	5 710
pH фильтрата	8,63	9,23	9,88	9,51
Масса извлеченных солей, г/кг шлака	152,5	306,3	293,8	429,0
Относительное извлечение, %***	35,5	71,3	68,5	100,0

Примечание: \* – эксперимент при 60°C; \*\* – эксперимент при 60°C, соотношение 1:60 принято за условный эталон полного извлечения; \*\*\* – относительно эксперимента 1:60.\*

При соотношении 1:1 фильтрат представляет собой высококонцентрированный рассол (TDS 200 г/л), однако выход фильтрата мал (38,3 г из 50 г шлака), что свидетельствует о недостаточном смачивании и капсулировании солей внутри агломератов. Осадок после сушки спекается в монолит. Соотношение 1:5 обеспечивает более полный контакт фаз и степень извлечения 71,3%.

Ключевое решение: в ходе работ решение о выборе соотношения 1:3 при 60°C. Несмотря на снижение извлечения на 10,78% (12,5 г/кг) относительно варианта 1:5, объем упариваемой жидкости сокращается с 500 л до 300 л на 100 кг шлака. Снижение энергозатрат на выпарку перекрывает потери солевого продукта.

#### *Температурный режим и кинетика*

Исследования при 20, 60 и 90°C (соотношение 1:5) показали, что повышение температуры с 20 до 60°C увеличивает извлечение солей с 30,63 до 32,55 г/100 г шлака (+6,3%). Дальнейший нагрев до 90°C не приводит к росту TDS (68 320 ppm против 68 320 ppm), но возрастает масса сухого остатка после выщелачивания (82,83 г против 79,54 г на 100 г шлака), что связано с интенсификацией гидролиза AlN и переходом алюминия в гидроксид.

Анализ результатов исследований показывает, что за первые 10 минут извлекается 86,6% от достижимого за 60 минут. Увеличение времени до 20 минут добавляет еще 13,4%, дальнейшая выдержка (до 60 мин) дает прирост всего 2%. Таким образом, оптимальное время – 20 минут, что хорошо согласуется с данными. [3], показавшими, что основная масса хлоридов переходит в раствор в первые 15–20 мин контакта.

#### *Исследование влияния pH и гранулометрии*

Вопреки распространенной практике подкисления пульпы для подавления гидролиза AlN (рекомендации pH 5 – 8 [3]), эксперименты с корректировкой pH до 4 (HCl) и до 10 (NaOH) не выявили значимого прироста извлечения хлоридов (таблица 3).

Таблица 3. Влияние pH исходной воды на извлечение (Т:Ж=1:5, 60°C)

Ион	Степень извлечения, % (pH 4)	Степень извлечения, % (pH 6)	Степень извлечения, % (pH 10)
Na <sup>+</sup>	5,18	5,06	5,24
K <sup>+</sup>	8,64	9,67	7,97
Cl <sup>-</sup>	18,58	17,95	16,40

Снижение pH до 4 увеличивает извлечение Cl<sup>-</sup> на 0,63%, что находится в пределах погрешности. При этом использование кислоты создает коррозионные риски и требует нейтрализации фильтрата. Отказ от корректировки pH признан экономически обоснованным.

Испытания фракций 5,0 – 5,5 мм и <0,3 мм при идентичных условиях (1:3, 60°C, 20 мин) показали, что TDS фильтрата составляет 109 550 ppm и 110 460 ppm соответственно. Разница менее 1% свидетельствует о незначительном влиянии крупности. Это позволяет исключить из технологической схемы дорогостоящие операции тонкого измельчения, ограничившись дроблением до –5 мм.

#### *Двухстадийное выщелачивание и баланс распределения*

Для оценки предельно достижимого извлечения проведен опыт двухступенчатой противоточной промывки (Т:Ж=1:5 на каждой стадии, 60°C). Результаты:

- I стадия: TDS 68 320 ppm (32,55 г солей/100 г шлака);
- II стадия: TDS 9 177 ppm (4,28 г солей/100 г шлака);
- Суммарное извлечение: 36,83 г/100 г шлака.
- Остаточное содержание солей в осадке (по TDS): не более 1,5%.

Таким образом, одностадийная обработка при Т:Ж=1:3 позволяет извлечь 293,8 г/кг, что составляет ~80% от максимально доступного (368,3

г/кг при двустадийной промывке). Учитывая капитальные затраты на вторую ступень фильтрации, одностадийная схема признана оптимальной.

**Заключение:**

1. Экспериментально определены и научно обоснованы параметры процесса выщелачивания солевого шлака вторичного алюминия: соотношение Т:Ж = 1:3, температура  $60\pm 5^\circ\text{C}$ , продолжительность 20 мин, рН исходной воды – без корректировки (5,8 – 6,8), крупность – до 5 мм.

2. Доказано, что предлагаемый режим обеспечивает извлечение 293,8 г водорастворимых солей с 1 кг шлака при содержании хлоридов в фильтрате 65 140 мг/л (по  $\text{Cl}^-$ ). Концентрат пригоден для выделения товарных солей  $\text{KCl}$  и  $\text{NaCl}$  методом вакуум-выпарной кристаллизации.

3. Установлено, что лимитирующей стадией процесса является не диффузия в порах частиц, а внешняя диффузия и доступ воды к поверхности солей. Гидролиз  $\text{AlN}$  происходит параллельно, но при  $60^\circ\text{C}$  и времени 20 мин не оказывает критического влияния на потери алюминия.

#### **Использованные источники:**

1. Патент РФ № 2753809 С1. Способ комплексной переработки алюмосодержащих солевых шлаков. / Зарипов З.И., Колесникова М.П., Хайруллина Р.Т. и др. – 2021. – Бюл. № 25.

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

3. Li P., Guo M., Zhang M., Teng L., Seetharaman S. Leaching Process Investigation of Secondary Aluminum Dross: The Effect of  $\text{CO}_2$  on Leaching Process of Salt Cake from Aluminum Remelting Process // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2012. – Vol. 43, No. 5. – P. 1220-1230. DOI: 10.1007/s11663-012-9678-7.

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. Liu F., Zuo Z., Zhan L., et al. Removal Process and Kinetics of Nitrogen and Chlorine from Black Aluminum Dross during Water Leaching // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2021. – Vol. 7. – P. 1805-1818.