

Одностадийная и двухстадийная биогидрометаллургическая переработка печатных плат и хвостов обогащения медно-цинковых руд

Колосов А.В.¹, Булаев А.Г.¹

Научный руководитель – кандидат биологических наук, Булаев А.Г.¹

¹ФИЦ Биотехнологии РАН, Москва
alexander_thechemist_kolosoff@mail.ru

Работа выполнена в рамках государственного задания ФИЦ Биотехнологии РАН

Введение

Техногенные отходы флотационного обогащения полезных ископаемых (хвосты) представляют собой существенную проблему для горнодобывающей отрасли. Основным способом снижения воздействия хвостов на окружающую среду является их складирование в подземных шахтах или на специальных полигонах — хвостохранилищах [1]. Переработка данных отходов с целью добычи цветных или благородных металлов, обычно, не представляет экономического интереса [2]. С другой стороны, электронные отходы, в частности, печатные компьютерные платы выступают в роли перспективного вторичного источника цветных металлов [3]. Среди развивающихся технологий переработки печатных плат отмечается биогидрометаллургическая переработка с использованием ацидофильных микроорганизмов. Однако, существует ряд вызовов, которые существенно ограничивают развитие данной технологии, в числе которых особо предстает токсичность материалов печатных плат, угнетающая скорость роста и активность ацидофильных микроорганизмов [4]. Совместная переработка хвостов флотации и печатных плат, потенциально, может стать решением сразу двух проблем: повысить экономическую привлекательность переработки хвостов и снизить негативный эффект плат на микроорганизмы.

Основная часть

В ходе экспериментов были исследованы процессы совместной переработки лежалых хвостов флотации (ГОК «Учалинский»), содержащих 49% пирита, и измельченных печатных плат, которые содержали следующие элементы: Fe (8%), Cu (2,6%), Al (2,0%), Pb (1,7%), Zn (1,0%), Ni (0,5%), Sn (0,5%), Cd (0,04%) и Ag (0,026%). Эксперименты проводили в периодическом режиме в лабораторных реакторах с мешалкой с рабочим объемом 1 л.

В ходе одностадийного процесса исследовали динамику выщелачивания цветных металлов из печатных плат, а также окисления пирита в двух параллельно запущенных реакторах: в оба реактора вносили инокулят и пульпу хвостов флотации с плотностью пульпы (Т : Ж) 5%, в экспериментальный реактор дополнительно вносили 5 г/л измельченных печатных плат. Исследовали динамику в трех последовательных запусках реакторов с использованием культуры микроорганизмов, полученной в ходе предыдущего запуска, в качестве посевного материала.

В ходе двухстадийного процесса переработку разделили на два этапа: химическое выщелачивание и биоокисление. В ходе химического процесса выщелачивали 50 г/л печатных плат, которые по окончании выщелачивания отделяли от раствора посредством фильтрации. Полученный раствор направляли в биореакторы. В одном из биореакторов постепенно уменьшали плотность пульпы хвостов пирита за счет разбавления раствором выщелачивания, а во втором твердую фазу возвращали обратно в реактор, используя пиритные хвосты как биозагрузку.

В одностадийном процессе выщелачивания наблюдали постепенную адаптацию культуры ацидофильных микроорганизмов к печатным платам, которая сопровождалась как изменением состава сообщества, так и приближением динамики изменения параметров культивирования к контрольным. Перестройка сообщества в присутствии печатных плат отражалась в виде резкого снижения доли архей рода *Ferroplasma* с 74,5% в инокуляте до 0–0,62% в сообществе экспериментального реактора, в котором доминировали хемолитотрофные железоокисляющие бактерии *Leptospirillum* spp (~90% сообщества). Одновременно от цикла к циклу в экспериментальном реакторе сокращалась лаг-фаза и период окисления Fe²⁺. Данное изменение можно объяснить чувствительностью *Ferroplasma* spp. к ионам металлов и органическим веществам, которые содержатся в материалах печатных плат. В контрольном реакторе доля *Ferroplasma* spp. постепенно снижалась, замещаясь миксотрофными бактериями рода *Sulfobacillus*. Динамика извлечения Cu и Ni в раствор не имела ярко выраженной зависимости от активности микроорганизмов, составляя, в среднем, 69,3±4,0% и 44,5±1,1% соответственно на двенадцатые сутки от начала эксперимента.

В ходе химического выщелачивания в рамках двухстадийного процесса показана динамика извлечения таких металлов, как Cu, Ni и Zn, с использованием свежеприготовленного раствора сульфата железа III и серной кислоты и биологически окисленного раствора предыдущего химического выщелачивания. При использовании свежего раствора извлечение Cu, Ni и Zn составило 77,7±5,1%, 29,3±4,3%, 49,8±3,2%, соответственно. При повторном использовании биологически окисленного раствора извлечение Cu, Ni и Zn составило 89,2±5,1%, 35,7±3,9%, 54,0±3,5%, соответственно. Увеличение эффективности выщелачивания объясняется более высоким ОВП, который характерен для растворов биовыщелачивания. Была показана динамика параметров выщелачивания при окислении двухвалентного железа, образовавшегося при химическом выщелачивании печатных плат. Полное окисление железа в обоих реакторах при окислении свежеприготовленного раствора сульфата железа III занимало 8 суток, а при окислении повторно использованного раствора 11–13 суток. Снижение скорости окисления железа связано с уменьшением наблюдаемой численности клеток в биореакторах, которая ступенчато снижалась на протяжении эксперимента.

Выводы

Проведенные эксперименты продемонстрировали принципиальную возможность функционирования обоих подходов переработки пиритных хвостов и печатных плат. В дальнейшем планируется дополнение результатов с использованием других образцов сырья.

Литература

1. Cotrina-Teatino M. A. et al. Flotation of mine tailings: A bibliometric analysis and systematic literature review //Journal of Environmental Chemical Engineering. 2025. Vol. 13, no. 2. P. 116136. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.116136>
2. Drobe M. et al. Processing tests, adjusted cost models and the economies of reprocessing copper mine tailings in Chile //Metals. 2021. Vol. 11, no. 1. P. 103. <https://doi.org/10.3390/met11010103>
3. Oke E. A., Potgieter H. Discarded e-waste/printed circuit boards: a review of their recent methods of disassembly, sorting and environmental implications //Journal of Material Cycles and Waste Management. 2024. Vol. 26. no. 3. P. 1277-1293. <https://doi.org/10.1007/s10163-024-01917-7>
4. Potysz A. et al. Bioleaching and toxicity of metallurgical wastes //Journal of Environmental Chemical Engineering. 2020. Vol. 8. no. 6. P. 104450. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104450>