

УДК 622.7

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ ОБОГАЩЕНИЕ СВИНЦОВО-МЕДНО-ЦИНКОВОЙ РУДЫ
МЕСТОРОЖДЕНИЯ “РУДНИК” ГРАВИТАЦИОННЫМ МЕТОДОМ**

П. Лазич, М. Костович, Д. Никшич

Белградский университет,

E-mail: predrag.lazic@rgf.bg.ac.rs, ул. Джюшина, 7, 11000, г. Белград, Сербия

Рассмотрена возможность применения гравитационного предварительного обогащения свинцово-медно-цинковой руды существующего производства в тяжелых средах. Испытания проведены на трех пробах руды месторождения “Рудник” в Сербии. При использовании рассматриваемого метода реализуется ряд преимуществ на этапе измельчения руды: сокращается удельный расход на тонну перерабатываемой руды в результате экономии электроэнергии; снижается количество флотореагентов. Изучен вопрос предварительного обогащения забалансовой руды. Потенциальное применение процедуры предобогащения позволит увеличить запасы руды при сохранении флотационной мощности на достигнутом уровне. Качество получаемого предконцентрата останется на уровне исходной руды, и загрузка флотационной фабрики сохранится.

Предварительное обогащение, тяжелая среда, предконцентрат

DOI: 10.15372/FTPRPI20250113

EDN: PMGQNI

Гравитационная концентрация, или разделение, — процесс обогащения, основанный на разнице в плотности минералов и размере частиц. Одним из методов гравитационной концентрации является концентрация в тяжелых суспензиях. Суть метода заключается в том, что минералы меньшей плотности, чем среда, всплывают, а более тяжелые — тонут.

Гравитационная концентрация в тяжелой среде представляет собой специфическую процедуру, требующую выполнения следующих основных операций:

- 1) подготовка минерального сырья путем грохочения и отсева на определенные классы крупности, при этом на этапе просеивания необходимо удалить пыль или шлам, так как их присутствие меняет плотность тяжелой среды, нарушая процесс;
- 2) концентрация в тяжелой среде: происходит расслоение минералов на всплывшую и оседающую фракции, т. е. на ΔL и ΔT продукты соответственно;
- 3) удаление суспензии из полученных продуктов: плотность обезвоженной суспензии аналогична находящейся в устройстве, поэтому суспензия непосредственно возвращается в технологический процесс;

4) отмывка суспензии с поверхности полученных фракций. Данная операция проводится водяной струей под давлением. Полученный продукт — разбавленная суспензия — подается на утилизацию тяжелых среднетвердых минералов;

5) утилизация тяжелых среднетвердых минералов: отделение суспензии от воды и шлама и подготовка к ее повторному использованию в процессе обогащения.

Посредством гравитационной концентрации в тяжелой среде выделяются крупнозернистые хвосты, которые по массе должны составлять около 40 % [1]. Потери металлов в пустой породе не должны превышать потерь в основном процессе (например, в хвостах флотации).

Оценка возможностей применения гравитационного разделения осуществляется на основании результатов экспериментов “всплывает – тонет” (В – Т). В лабораторных и полупромышленных условиях выделяются крупнозернистые хвосты при различных плотностях, проводится химический анализ и определяется баланс предварительного обогащения [2].

В настоящей статье для определения возможности применения предварительного обогащения в тяжелой среде проведены лабораторные и полупромышленные исследования трех проб руды месторождения “Рудник”. Окончательное решение о применении процедуры предварительного обогащения в суспензии будет принято по результатам экономической оценки и в зависимости от коммерческой целесообразности [3]. Процедурой предварительного обогащения достигается более качественный гранулометрический состав предконцентрата по сравнению с рядовой рудой. Предварительным обогащением удаляется твердая пустая порода с целью обеспечения эффективного извлечения ценного компонента и экономии энергии при измельчении [4].

Помимо гравитационного существуют и другие методы предварительного обогащения (рентгеновские, оптические и пр.) [5]. Однако гравитационная концентрация является основным методом обогащения, который применяется на протяжении более 100 лет [6].

Гравитационное концентрирование в тяжелой среде — стабильный метод разделения, при котором возможно обогащать куски крупностью 0.5–300 мм с условием освобождения зерен от взаимных связей [7]. Среди машин и аппаратов, применяемых в рамках данного метода концентрации, разработан и успешно используется биконический гидроциклон для разделения суспензий [8].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ЛАБОРАТОРНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Выполнен В – Т анализ на трех пробах дробленой руды в растворе бромоформа (CHBr_3) с увеличением его плотности. Проба 1 — бедная руда, характеризующаяся низким качеством и содержанием металлов около 1.3 % Pb, 1.4 % Zn и 0.25 % Cu. Проба 2 — богатая руда с содержанием ценных компонентов примерно 1.8 % Pb, 2.16 % Zn и 0.26 % Cu. Проба 3 — руда месторождения Z, находящегося в настоящее время на этапе подготовки к эксплуатации, с низким содержанием свинца и цинка (около 1 % Pb и 1 % Zn) и высоким содержанием меди (0.9 % Cu). Цель данных испытаний — определение в лабораторных условиях перспективности выделения крупнозернистых отходов с максимально возможной массовой долей и минимальными потерями металла.

Процедура проведения экспериментов в рамках лабораторных испытаний одинакова для всех трех образцов. На начальном этапе выполнялось мокрое просеивание — промывка пробы на сите с отверстиями 2.362 мм. Для класса –2.362 мм (мелкозернистый) осуществлялась фильтрация, сушка, взвешивание и химический анализ. Данный класс не изучался с помощью В – Т анализа. Класс крупности +2.362 мм (крупнозернистый) погружался в раствор бромоформа с повышением плотности. Таким образом отделяли фракции с индивидуальной плотностью, которые проходили сушку, взвешивание и химанализ. На основании полученных результатов составлялись таблицы массовых долей, содержания и распределения металлов по классам крупности (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Массовая доля крупнозернистого и мелкозернистого классов, содержание и распределение металлов в них, %

Руда	Массовая доля	Содержание			Распределение		
		Pb	Zn	Cu	Pb	Zn	Cu
Проба 1							
Всего	100.00	1.26	1.32	0.24	100.00	100.00	100.00
крупнозернистая (+ 2.362 мм)	80.30	1.27	1.32	0.22	80.94	80.30	73.61
мелкозернистая (− 2.362 + 0 мм)	19.70	1.22	1.32	0.32	19.06	19.70	26.39
Проба 2							
Всего	100.00	1.68	2.08	0.29	100.00	100.00	100.00
крупнозернистая (+ 2.362 мм)	70.02	1.55	1.88	0.23	64.48	63.47	54.98
мелкозернистая (− 2.362 + 0 мм)	29.98	1.99	2.53	0.44	35.52	36.53	45.02
Проба 3							
Всего	100.00	1.05	1.03	0.89	100.00	100.00	100.00
крупнозернистая (+ 2.362 мм)	80.83	0.97	0.94	0.87	74.41	73.82	78.58
мелкозернистая (− 2.362 + 0 мм)	19.17	1.40	1.40	1.00	25.59	26.18	21.42

По итогам В–Т анализа в табл. 2 приведена массовая доля, содержание металлов для каждой испытываемой плотности расслоения и потери металлов в крупнозернистых хвостах в расчете на рядовую руду.

ТАБЛИЦА 2. Массовая доля крупнозернистых хвостов, содержание и распределение металлов в зависимости от плотности, %

Плотность, г/см³	Массовая доля крупнозернистых хвостов	Содержание			Распределение		
		Pb	Zn	Cu	Pb	Zn	Cu
Проба 1							
2.686	3.82	0.03	0.03	0.04	0.091	0.087	0.639
2.750	6.37	0.034	0.038	0.04	0.171	0.184	1.066
2.800	8.20	0.035	0.041	0.042	0.229	0.253	1.449
2.890	15.07	0.120	0.210	0.130	1.430	2.450	8.07
Проба 2							
2.686	5.81	0.05	0.04	0.04	0.173	0.112	0.794
2.750	8.91	0.074	0.085	0.047	0.394	0.365	1.427
2.800	9.87	0.082	0.096	0.049	0.48	0.458	1.657
2.890	22.00	0.163	0.358	0.077	2.141	3.789	5.798
Проба 3							
2.686	6.03	0.250	0.120	0.190	1.437	0.706	1.280
2.750	10.87	0.272	0.200	0.292	2.822	2.123	3.552
2.800	12.46	0.273	0.181	0.295	3.247	2.200	4.103
2.890	21.55	0.457	0.210	0.348	9.401	4.417	8.368

Исследования пробы 3 (руда месторождения Z) проводились по той же процедуре, что и для предыдущих двух, при этом получено распределение ценных компонентов по классам крупности. Исходя из результатов испытаний крупного класса рассчитывалась массовая доля той части руды, которая после предварительного обогащения будет забракована в качестве крупнозернистых хвостов.

На завершающем этапе лабораторных исследований на основании расчетов разработан баланс предварительного обогащения для каждой пробы при плотности расслоения 2.89 т/м^3 (табл. 3). Кроме того, ставилась задача определения оптимальной плотности суспензии для полупромышленных испытаний.

ТАБЛИЦА 3. Результаты лабораторных испытаний проб при плотности $\gamma = 2.89 \text{ т/м}^3$, %

Продукты переработки руды	Массовая доля	Содержание			Распределение		
		Pb	Zn	Cu	Pb	Zn	Cu
Проба 1							
Вход (−30+0 мм)	100.00	1.26	1.32	0.24	100.00	100.00	100.00
Предконцентрат ΔT	65.23	1.54	1.57	0.24	79.5	77.85	65.54
Мелкозернистый (−2.362+0 мм)	19.7	1.22	1.32	0.32	19.07	19.70	26.39
Хвосты (крупнозернистые) ΔL	15.07	0.12	0.21	0.13	1.43	2.45	8.07
Проба 2							
Вход (−30+0 мм)	100.00	1.680	2.08	0.290	100.000	100.000	100.000
Предконцентрат ΔT	48.02	2.180	2.580	0.300	62.340	59.680	49.180
Мелкозернистый (−2.362+0 мм)	29.98	1.990	2.530	0.440	35.520	36.530	45.020
Хвосты (крупнозернистые) ΔL	22.00	0.163	0.358	0.077	2.141	3.789	5.798
Проба 3							
Вход (−30+0 мм)	100.00	1.050	1.03	0.890	100.000	100.000	100.000
Предконцентрат ΔT	59.28	1.150	1.20	1.060	65.010	69.400	70.210
Мелкозернистый (−2.362+0 мм)	19.17	1.400	1.40	1.000	25.590	26.180	21.420
Хвосты (крупнозернистые) ΔL	21.55	0.457	0.21	0.348	9.401	4.4170	8.368

Одной из целей данных испытаний являлось моделирование условий эксплуатации промышленного устройства, поэтому погружение выполнялось не по классам крупности, а исследовался класс $+2.362 \text{ мм}$.

РЕЗУЛЬТАТЫ В–Т АНАЛИЗА

Массовая доля мелкого материала ($-2.362+0 \text{ мм}$) в испытываемых пробах составила 19–30 % с увеличенным содержанием металлов. Распределение металлов в данном классе составляет: 20–35 % свинца и цинка, а также 20–45 % меди. Крупный класс $-25(30)+2.362 \text{ мм}$, подаваемый в предварительное обогащение, включает 81–70 % массы входной руды. Распределение металлов положительное, так как в результате мокрого просева в класс -2.362 мм уходит значительная часть металлов, которые напрямую подаются в процесс измельчения. Такое распределение обеспечивает сокращение потери металлов в крупнозернистых хвостах.

Погружением проб 1 и 2 в раствор бромформа (CHBr_3) при плотности 2.686 т/м^3 выделяется 3.82–5.81 % по массе крупнозернистых хвостов. Содержание металлов в хвостах составляет: 0.03–0.05 % Pb, 0.03–0.04 % Zn и 0.04 % Cu; потери металлов — 0.09–0.17 % Pb, 0.087–0.11 % Zn и 0.6–0.8 % Cu.

Определены массовая доля крупнозернистых хвостов при плотности 2.686 т/м^3 для пробы Z — около 6 %; содержание свинца в пробе — около 0.25 %, цинка — около 0.12 %, меди 0.19 %. Потери металлов для пробы Z немного выше, чем для образцов 1 и 2, а именно: 1.43 % Pb, 0.7 % Zn, 1.28 % Cu. С увеличением плотности расслоения до 2.89 т/м^3 повышается массовая доля крупнозернистых хвостов до 15–22 % с содержанием металлов: 0.12–0.46 % Pb, 0.21–0.35 % Zn, 0.08–0.35 % Cu. При этом потери составляют: 1.4–9.4 % Pb, 2.4–4.4 % Zn и 5.8–8.4 % Cu.

При расслоении дробленой руды месторождения “Рудник” при $\gamma = 2.9 \text{ т/м}^3$ можно получить предконцентрат, или ΔT фракцию, с массовой долей около 80 % и крупнозернистыми хвостами около 20 % по массе. Подобные результаты представлены в [9–10]. Содержание ценных ком-

понентов в предконцентрате на 20–25 % выше, чем в входной руде. Содержание металлов в крупнозернистых хвостах (ΔL фракция) составляет: 0.12–0.46 % Pb, 0.2–0.35 % Zn, 0.08–0.35 % Cu; потери металлов: 1.5–9.5 % Pb, 2.4–4.4 % Zn и 5.8–8.4 % Cu.

На основании полученных данных можно констатировать, что высокая массовая доля крупнозернистых хвостов маловероятна, но учитывая процедуру предварительного обогащения в суспензии галенита (концентрат Pb месторождения “Рудник”) без отдельного восстановления суспензии (восстановление будет осуществляться в процессе обогащения руды), выделение около 20 % по массе крупнозернистых хвостов можно оценить как значительное.

По итогам лабораторных В–Т анализов для полупромышленных исследований утверждена плотность расслоения 2.9 т/м³.

ПОЛУПРОМЫШЛЕННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

Полупромышленные испытания рассматриваемых проб проводились в лаборатории обогащения полезных ископаемых в Белграде. Цель данных испытаний — проверка результатов В–Т анализа, полученных в стационарных условиях путем погружения проб в раствор бромформа.

Процедура проведения полупромышленных испытаний следующая. На первом этапе выделялись пробы массой около 50 кг — бедная, богатая и руда месторождения Z. Каждая проба проходила мокрый просев на сите с отверстиями 2.362 мм. Просев крупностью –2.362 мм (мелкий материал) не подвергался гравитационной концентрации. Отсев крупности –30+2.362 мм обрабатывался в суспензии галенита на полупромышленной установке: моделировались условия, ожидаемые в промышленном процессе. На следующем этапе испытаний изготавливалась суспензия плотностью 2.9 т/м³, которая лабораторными исследованиями определена как самая выгодная. После изготовления суспензии и установления циркуляционного течения в системе приступали к добавлению пробы. Полупромышленная установка включала барабан Wemco, вибрационное сито, шламовый насос, работающий в нормальном режиме.

Полученные и выделенные продукты, предконцентрат (ΔT) и крупнозернистые хвосты (ΔL) прошли промывку от суспензии, просушку, взвешивание и анализ каждой пробы отдельно. Результаты полупромышленных испытаний приведены в табл. 4.

ТАБЛИЦА 4. Результаты полупромышленных испытаний, %

Продукты переработки руды	Массовая доля	Содержание			Распределение		
		Pb	Zn	Cu	Pb	Zn	Cu
Проба 1 — бедная руда							
Вход (– 30 + 0 мм)	100.00	1.31	1.40	0.25	100.00	100.00	100.00
Предконцентрат ΔT (+ 2.362 мм)	59.12	1.62	1.62	0.26	72.87	68.55	61.29
Мелкозернистый (– 2.362 мм)	15.33	1.76	1.80	0.40	20.52	19.75	24.45
Хвосты ΔL	25.55	0.34	0.64	0.14	6.61	11.70	14.26
Проба 2 — богатая руда							
Вход (– 30 + 0 мм)	100.00	1.72	2.16	0.26	100.00	100.00	100.00
Предконцентрат ΔT (+ 2.362 мм)	52.99	1.69	2.51	0.27	52.12	61.66	55.82
Мелкозернистый (– 2.362 мм)	26.49	2.95	2.85	0.35	45.49	35.01	36.18
Хвосты ΔL	20.52	0.20	0.35	0.10	2.39	3.33	8.01
Проба 3 — руда месторождения Z							
Вход (– 30 + 0 мм)	100.00	1.05	1.00	0.89	100.00	100.00	100.00
Предконцентрат ΔT (+ 2.362 мм)	58.02	1.10	1.18	1.07	60.93	68.27	69.74
Мелкозернистый (– 2.362 мм)	17.75	1.76	1.52	1.04	29.82	26.90	20.73
Хвосты ΔL	24.23	0.40	0.20	0.35	9.25	4.83	9.53

На основании результатов полупромышленных испытаний, а также лабораторных исследований можно утверждать, что при плотности расслоения около 2.9 т/м^3 на всех трех испытываемых пробах достигается выделение около 20–25 % по массе крупнозернистых хвостов (ΔL).

Содержание свинца в крупнозернистых хвостах предварительного обогащения составило: 0.2 % для пробы 2, 0.34 % для пробы 1 и 0.4 % для пробы 3. Установлено содержание цинка в выделенных хвостах: 0.2 % для пробы 3, 0.35 % для пробы 2 и 0.64 % для пробы 1. Медь в хвостах составила 0.1 % для пробы 2, 0.14 % для пробы 1 и 0.35 % для пробы 3.

Определены потери свинца в крупнозернистой пустой породе: от 2.4 % в пробе 2 до 9.25 % в пробе 3; потери цинка — в пределах 3–11 %, меди 8–14 %.

Посредством применения предварительного обогащения можно выделить 20 % по массе крупнозернистых хвостов. Потери металлов в них весьма низкие: свинца около 2.4 %, цинка около 3 %, меди около 8 %.

Полученный предконцентрат содержит приблизительно на 20 % больше металлов, чем исходная руда. С помощью дальнейших исследований можно определить и другие преимущества предконцентрата по сравнению с рудой.

ВЫВОДЫ

В условиях месторождения “Рудник” рассмотрена возможность применения процедуры предварительного обогащения на дробленой руде крупностью – $30 + 0 \text{ мм}$.

При плотности расслоения 2.9 т/м^3 можно выделить 20–25 % по массе крупнозернистых хвостов с размером частиц – $30 + 2.362 \text{ мм}$, не подаваемых на последующих этапах для измельчения и обогащения. Потери металла в крупнозернистых хвостах составляют: 2.5–9.25 % Pb; 3–11 % Zn; 8–14 % Cu.

Руда, полученная после предварительного обогащения, отличается несколькими преимуществами по сравнению с исходной:

- более высокое содержание металлов;
- целесообразный гранулометрический состав и твердость, оказывающие положительное влияние на последующее измельчение в процессе обогащения;
- предпочтительные условия для обогащения.

Окончательное решение о применении процедуры предварительного обогащения в суспензии галенита будет принято по результатам экономического анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Čalić N. Terijski osnovi pripreme mineralnih sirovina, RGF Beograd, 1990.
2. Deušić S. and Lazić P. Mašine i uređaji u pripremi mineralnih sirovina, RGF Beograd, 2013.
3. Dardis K. A. The design and operation of heavy medium recovery circuits for reduced ferrosilicon consumption, 2nd Samancor Symposium on DM Separation, 1985.
4. Motovilov I. Yu., Telkov Sh. A., Barmenshinova M. B., and Nurmanova A. N. Examination of the preliminary gravity dressing influence on the Shalkiya deposit complex ore, Non-ferrous Metals, 2019, No. 2. — P. 3–8.
5. Kolacz J. Advanced separation technologies for pre-concentration of metal ores and the additional process control, E3S Web of Conf., MEC, 2017. — 01001.
6. Elahe Karami, Ahad Aghlmandi Harzanagh, Davood Moradkhani and Ezatollah Mozaffari. Simulation-aided studies of heavy-media separation in Angouran lead and zinc ore, Separation Sci. Technol., 2019.

7. **Erin Legault-Seguin, Curtis Mohns, and Mike Rylatt.** Dense medium separation — an effective and robust pre-concentration technology, 48th Annual Canadian Mineral Processors Operators Conference, Ottawa, Ontario, January 2016. — P. 381–400.
8. **Sheng Jian, Wei Sun, and Yong-Xing Zheng.** Application of a biconical dense medium cyclone to pre-treat a lowgrade Pb–Zn sulfide ore, *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, 2019, Vol. 55, No. 4. — P. 981–990.
9. **Telkov S. A., Motovilov I. Y., Barmenshinova M. B., Medyanik N. L., and Daruesh G. S.** Substantiation of gravity concentration to the Shalkiya deposit Lead–Zinc ore, *J. Min. Sci.*, 2019, Vol. 55. — P. 430–436.
10. **Муканова А. К.** Особенности обогащения полиметаллических руд // Материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. “Современные тенденции и инновации в науке и производстве”. — Междуреченск, 2020.

Поступила в редакцию 23/X 2024

После доработки 29/XI 2024

Принята к публикации 23/I 2025