



**А. Г. МНУХИН,**  
доктор техн. наук  
(Запорожская государственная  
инженерная академия)



**Н. А. МНУХИНА,**  
канд. техн. наук  
(Запорожская государственная  
инженерная академия)



**А. А. ГИТУЛЯР,**  
аспирант  
(Запорожская государственная  
инженерная академия)



**И. П. ГОРОШКО,**  
инж.  
(Запорожская государственная  
инженерная академия)

УДК 622. 17:504.064.4

# К вопросу извлечения редкоземельных металлов из породных отвалов угольных шахт

Рассмотрены и проанализированы известные способы получения германия. Показан новый способ повышения концентрации германия в исходном сырье путем его электромагнитной сепарации из породных отвалов с помощью железоотделителя, т. е. магнитного поля электромагнита.

**Ключевые слова:** германий, железоотделитель, магнитная сепарация, напряженность.

**Контактная информация:** [anatoly.mnukhin@gmail.com](mailto:anatoly.mnukhin@gmail.com)

**Постановка проблемы.** Содержание германия в земной коре составляет  $7 \cdot 10^{-4}$  % ее массы, что больше, чем содержание, например серебра, но германий – элемент более рассеянный в исходном сырье, поэтому его сложнее извлекать. Производственные затраты на получение концентрата германия и его последующее извлечение достаточно велики при любой технологии, а стоимость – традиционно одна из самых высоких для рассеянных металлов и сохраняется даже в периоды кризисов [1].

Из сульфидных, цинковых или свинцовых руд, а также из низкоэнергетических углей, где германий содержится в пределах от тысячных до десятых долей процента, последовательно получают: германиевый концентрат (содержание германия от 5 до 30 %), тетрахлорид германия ( $\text{GeCl}_4$ ), оксид германия ( $\text{GeO}_2$ ), поли- и монокристаллы германия.

Почти все мировое производство германия базируется на попутном извлечении его из сульфидных, цинковых, свинцово-цинковых и реже медно-цинковых руд. При гидрометаллургическом способе производства цинка германий остается в остаточных кеках, возникающих в процессе выщелачивания цинковых огарков. Из ныне добываемых цинковых руд добыча германия составляет 300 т в год [2].

Для попутной добычи германия из руд в нашем регионе пытались использовать надсмольные воды коксохимических заводов (исходное содержание германия в них не более 3 г/т), поэтому применение сырья из породных отвалов с содержанием германия до 55 г/т – весьма перспективно экономически.

Извлекать германий из содержащего его сырья можно одним из трех способов. *Первый* состоит в переводе сырья в раствор с последующим использованием дубового концентрата (танинового комплекса). Однако проверка этого способа, выполнен-

ная на коксохимическом заводе, имеющем многолетний опыт использования подобной технологии применительно к данному процессу, не дала возможности получить достаточно существенное повышение концентрации германия в обрабатываемом продукте.

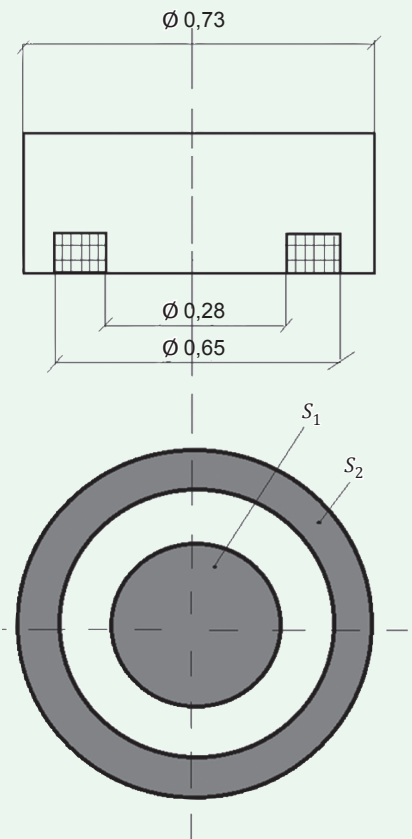
Второй способ, обеспечивающий одновременно выделение, кроме германия, других редкоземельных элементов, – применение электростатической сепарации, разработанной украинскими специалистами. Его реализовали на спецпредприятии (Днепропетровская область). На этом производстве извлекается не менее шести редкоземельных элементов. Однако наиболее перспективен и прост в реализации и стоимости новый способ переработки горной массы, разработанный в настоящее время МакНИИ и НПП «Электрогидравлика» на базе новых электровзрывных технологий. Новый способ обеспечивает низкую себестоимость и экологическую чистоту выделенных добываемых продуктов. Для реализации указанного способа создана электрогидравлическая дробилка (сепаратор), конструкция которой в настоящее время находится на стадии патентования [3].

Окончательный выбор технологического процесса можно осуществить на основе корректного технико-экономического сопоставления вариантов.

Известно, что традиционно германий – материал для изготовления линз и других специфических элементов окон инфракрасных оптических систем двойного назначения, используемых для обнаружения объектов по их собственному излучению в диапазоне 2–16 мкм. Известно его применение в системе безопасности при плохой видимости для автомобилей, для пожарных в условиях задымленности и пр. Ожидается, что к 2020 г. мировой рынок германиевых линз для приборов двойного применения достигнет 700 тыс., для чего потребуется 1,7 млн заготовок [4].

В промышленности для указанных целей обычно применяют железоотделители ЖБ 1-40-100м с напряженностью электромагнитного поля  $H_m = 150...190$  кА/м, или 1948–2388 Э. Более мощные железоотделители П100м – П160м имеют соответственно напряженность электромагнитного поля 276–315 кА/м, или 3468–3958 Э. Поэтому для предварительной отработки методов извлечения редкоземельных

элементов из отходов горного производства в лаборатории применяли магнитную сепарацию материалов, содержащихся в отвалах шахты «Илловойская», для чего в качестве рабочего инструмента использовали электромагнит типа М-23 общепромышленного исполнения грузоподъемностью 5 т (220 В/160А) с электрической обмоткой размерами, приведенными на рис. 1. Параметры материала, подлежащего сепарации, даны в таблице.



**Рис. 1.** Схема компоновки электромагнита.

| Показатель                       | Проба породы |       |       |       |
|----------------------------------|--------------|-------|-------|-------|
|                                  | № 1          | № 2   | № 3   | № 4   |
| Массовая доля золы, %            | 72,00        | 65,00 | 54,10 | 72,50 |
| Выход летучих веществ, %         | 21,50        | 18,40 | 17,10 | 21,20 |
| Массовая доля серы, %            | 1,09         | 0,67  | 1,75  | 2,07  |
| Содержание германия, г/т         | 40,00        | 20,00 | 30,00 | 55,00 |
| Массовая доля оксидов в золе, %: |              |       |       |       |
| SiO <sub>2</sub>                 | 47,00        | 47,00 | 47,00 | 47,00 |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 20,65        | 20,65 | 20,65 | 20,65 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | 14,90        | 14,90 | 14,90 | 14,90 |
| CaO                              | 3,40         | 3,40  | 3,40  | 3,40  |
| MnO                              | 0,14         | 0,14  | 0,14  | 0,14  |
| MgO                              | 1,45         | 1,45  | 1,45  | 1,45  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>    | 0,28         | 0,28  | 0,28  | 0,28  |
| FeO                              | 0,32         | 0,32  | 0,32  | 0,32  |

При сепарации использовали материал из пробы №4 с максимальным содержанием германия (выданный из шахты около 40 лет назад). Из таблицы следует, что исходное сырье содержит свыше 20 % оксидов железа в разных соединениях. Наиболее просто их выделять с помощью магнитных сепараторов типа ПС160м, напряженность магнитного поля которого достигает 304,8 кА/м.

В целях практической проверки возможности электромагнитной сепарации исходное сырье разделяли при напряженности поля 69,3 кА/м. Размеры извлекаемых кусков достигали 31,4 мм, а масса – 19 г. Одновременно наблюдалось повышение концентрации германия в исходном продукте. Таким образом, имея запас по напряженности поля в 3,9 раза, можно считать, что в производстве каких-либо особых проблем нет [5, 6].

Общая масса материала, подлежащего сепарации, составляла 285 г, из которой было изъято 41 г железосодержащих, или 14,4 %, т. е. всего было изъято до 68,5 % всех компонентов железа. Дальнейший химический анализ показал, что содержание германия в железосодержащих отсепарированных породах составило 5 г/т, остальные 50 г остались в общем массиве. В результате в 14,4 % общей массы осталось лишь 9 % германия, или в 85,6 % остался 91 % германия [7].

Расчет напряженности магнитного поля электромагнита можно выполнить следующим образом [8, 9]:

$$H = B / (\mu \cdot \mu_0); \quad (1)$$

$$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,256 \cdot 10^{-3} \text{ с}/(\text{А}\cdot\text{м}); \quad (2)$$

$$S_1 = \pi \cdot 0,28^2 / 4 = 0,062 \text{ м}^2;$$

$$S_2 = \pi(0,73^2 \cdot 0,65^2) / 4 = 0,087 \text{ м}^2;$$

$$S = 0,1490 \text{ м}^2 = 1490 \text{ см}^2;$$

$$K = B^2 S / (2\mu_0), \quad (3)$$

где  $H$  – напряженность магнитного поля;

$B$  – магнитная индукция;

$\mu$  – относительная магнитная проницаемость;

$S$  – рабочая поверхность электромагнита (см. рис. 1), равная сумме ее составляющих  $S_1 + S_2$ ;

$K$  – сила притяжения электромагнита.

$$B = \sqrt{500 \cdot 2 \cdot 1,256 \cdot 10^{-8} / (10^{-6} \cdot 1490)} = 0,9181 \text{ Тл}; \quad (4)$$

$$H = 0,9181 / (1,256 \cdot 10^{-8} \cdot 1000) = 73097 \text{ А/м}. \quad (5)$$

**Выводы.** Анализ способов получения редкоземельных элементов, в частности германия, показывает, что известные технологии попутного извлечения этих элементов из вспомогательного сырья (надсмольных вод) большей частью низкоэффективны и малопроизводительны.

Наиболее перспективный как по простоте реализации и низкой себестоимости, а также экологической чистоте новый способ переработки горной массы, разработанный в Украине на базе новых электровзрывных технологий. При этом обеспечивается как дешевизна, так и экологическая чистота выделенных искоемых продуктов.

Химический анализ показывает, что содержание германия в железосодержащих отсепарированных породах составляет 5 г/т, остальные 50 г остаются в общем массиве (низкая совместимость соединения германия с железом). В результате в 14,4 % общей массы остается лишь в 85,6 %, что указывает на эффективность выполненной сепарации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Николин В. И.* Охрана окружающей среды в горной промышленности / В. И. Николин, Е. С. Матлак. – К.: Донецк: Вища шк. Голов. изд-во, 1987. – 192 с.
2. *Мнухин А. Г.* Породные отвалы – сырье будущего / А. Г. Мнухин // Уголь Украины. – 2009. – № 5. – С. 28–32.
3. *Мнухин А. Г.* Технологии XXI века / А. Г. Мнухин, А. М. Брюханов, И. В. Иорданов [и др.] // Новые технологии в горной и других отраслях промышленности. – Макеевка–Донецк: ВИК, 2014. – Т. 2. – 274 с.
4. *Лоренс Д.* Оптимизация процесса закрытия шахт / Д. Лоренс // Журн. для чистого производства. – 2006. – № 14. – С. 285–298.
5. *Меркулов В. А.* Охрана природы на угольных шахтах. – М.: Недра, 1981. – 182 с.
6. *Зубова Л. Г.* Терриконники угольных шахт – источники сырья для получения галлия, германия, висмута // Уголь Украины. – 2004. – № 1. – С. 41–42.
7. *Круг К. А.* Основы электротехники. Физические основы электротехники. – М.: ГосЭнергИздат, 1936. – 858 с.
8. *Яворский Б. М.* Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – М.: Наука, 1974. – 944 с.