

## К КОНЦЕПЦИИ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ В ДЕЗИНТЕГРАТОРАХ

Голик В.И.<sup>1</sup>, Дмитрак Ю.В.<sup>1</sup>, Тарасов М.А.<sup>2</sup>, Вернигор В.В.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Северо-Кавказский горно-металлургический институт  
(государственный технологический университет), Владикавказ, Россия;

<sup>2</sup> АО «ЦПТИ» (Госкорпорация «Росатом»), Москва, Россия

**Аннотация:** Экономически и экологически приемлемой утилизацией запасов хвостов переработки металлических руд может быть только в том случае, если из хвостов предварительно извлекаются металлы. Это объясняет актуальность новой концепции выщелачивания металлов в активаторах. Целью исследований указанного направления горного дела является обоснование технической возможности и экономической целесообразности использования металлосодержащего сырья отходов в качестве сырья для изготовления товарной продукции. Изучается возможность извлечения металлов до безопасного уровня механическим или иным воздействием для использования вторичных хвостов. Приведены данные о выщелачивании хвостов обогащения в дезинтеграторе. Дана справка о химическом составе хвостов обогащения полиметаллических руд. Описан регламент исследования. Обобщены результаты вариантов выщелачивания хвостов обогащения в дезинтеграторе. Представлены графики взаимосвязки параметров выщелачивания металлов. Даны комментарии полученных экспериментально зависимостей. Выщелачивание в дезинтеграторе, по сравнению с агитационным выщелачиванием, увеличивает извлечение металлов и сокращает продолжительность переработки. Увеличению полезного использования эффекта механохимической активации способствует модернизация конструкции дезинтегратора.

**Ключевые слова:** металлические руды, хвосты переработки, выщелачивание металлов в дезинтеграторе, извлечение металлов, механохимическая активация, конструкция дезинтегратора.

**Для цитирования:** Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Тарасов М.А., Вернигор В.В. К концепции выщелачивания металлов в дезинтеграторах // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 11-1. – С. 94–105. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-94-105.

### Concept of metal leaching in disintegrators

V.I. Golik<sup>1</sup>, Yu.V. Dmitrak<sup>1</sup>, M.A. Tarasov<sup>2</sup>, V.V. Vernigor<sup>1</sup>

<sup>1</sup> North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University),  
Vladikavkaz, Russia;

<sup>2</sup> General Director, TISC JSC (State Atomic Energy Corporation "Rosatom"), Moscow, Russia

**Abstract:** Disposal of stocks of tailings from metal ore processing has become one of the main problems of mining. It brought to life the problem of extracting metals from utilized tailings, without which recycling is both economically and environmentally unacceptable. This explains

the relevance of the new concept of leaching of metals in activators. The aim of the research of this direction of mining is to justify the technical feasibility and economic feasibility of using metal-containing raw materials for waste as raw materials for the manufacture of commercial products. Investigate the possibility of extracting metals to a safe level by mechanical or other effects for the use of secondary tails. The data on the leaching of tailings in the disintegrator are presented. A reference is given on the chemical composition of tailings for the processing of polymetallic ores. The study regulations are described. The results of leaching of tailings in the disintegrator are summarized. The graphs of the interlinking of the parameters of leaching of metals are presented. Comments are given on experimental dependencies. The leaching in the disintegrator compared with agitation leaching increases the recovery of metals and reduces the processing time. The usefulness of the effect of mechanochemical activation is enhanced by the modernization of the design of the disintegrator.

**Key words:** metal ores, processing tailings, tailings processing, leaching, disintegrator, binder, extraction, parameters.

**For citation:** Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Tarasov M.A., Vernigor V.V. Concept of metal leaching in disintegrators. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(11-1):94-105. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-111-0-94-105.

---

## Введение

Проблема рационального и комплексного использования природных ресурсов становится все более актуальной в силу развития демографических и экономических процессов в недрах человеческой цивилизации.

Технологии с заполнением выработанного пространства твердеющими смесями увеличили полноту использования недр, но породили проблему обеспечения горного производства сырьем для приготовления смесей. Добыча компонентов твердеющих смесей теми же горными работами приносит ущерб экосистемам окружающей среды. Изготовление твердеющих смесей на основе хвостов обогащения руд не может быть удачным решением, поскольку увеличивает невосполнимые потери металлов, которые по суммарной ценности могут превышать ценность уже извлеченных металлов.

Традиционные технологии обогащения не обеспечивают извлечения металлов до уровня санитарных требований, что подтверждает накопление запасов хвостохранилищ в добывающих странах.

Сведений о новых технологиях безотходного извлечения металлов из некондиционного сырья мало, поэтому становятся актуальными такие технологии, как механохимическое выщелачивание металлов в активаторах. Концепция выщелачивания металлов из хвостов обогащения включает в себя позитивные результаты экспериментальных исследований, которые могут быть использованы при совершенствовании горного производства.

Целью исследований данного направления является детализация и развитие концепции природо- и ресурсосбережения при подземной разработке рудных месторождений путем повышения извлечения металлов методами механохимического выщелачивания в дезинтеграторе. Также необходимо обоснование технической возможности и экономической целесообразности использования металлосодержащих отходов обогащения в качестве сырья для производства металлов.

Анализируется практика экспериментального извлечения металлов до безопасного уровня комбинирован-

ным химическим и механическим воздействием.

Формулируются и интерпретируются графически зависимости между переменными факторами процесса извлечения.

На основании выполненного анализа разрабатываются предложения по оптимизации конструкции дезинтеграторов.

### Полученные результаты

При выборе технологии выщелачивания металлов из минерального сырья сравниваются варианты [1–2]:

- с механической активацией в перколяторе;
- с механической активацией в дезинтеграторе и последующим выщелачиванием вне дезинтегратора;
- с выщелачиванием в дезинтеграторе.

Выщелачивание минералов с механической активацией в перколяторе заключается в растворении металлов инфильтрационным потоком раствора реагента при механическом перемешивании выщелачиваемой массы, что способствует раскрытию рабочих поверхностей и препятствует закупориванию пространства между кусками минералов.

Эксперименты осуществлены с использованием математического планирования по плану Венкена–Бокса.

Извлечение металлов из руд исследуется в сериях 1, 2, 3, а извлечение из хвостов — в сериях 4, 5, 6. Результаты извлечения металлов в раствор по сериям приведены в табл. 1.

Полученные результаты позволяют утверждать:

1. Выщелачивание металлов после активации сырья в дезинтеграторе увеличивает извлечение:

- из хвостов обогащения: по свинцу — в 1,4 раза, по цинку — в 1,1 раза;
- из руды: по свинцу — в 1,6 раза, по цинку — в 2,1 раза;

Таблица 1

### Результаты извлечения металлов в раствор

Table 1

### The results of extraction of metals into solution

| Серия                    | Свинец, % | Цинк, % |
|--------------------------|-----------|---------|
| <i>Руда</i>              |           |         |
| 1-я                      | 24,8      | 39,18   |
| 2-я                      | 33,89     | 44,42   |
| 3-я                      | 35,71     | 46,10   |
| <i>Хвосты обогащения</i> |           |         |
| 4-я                      | 13,19     | 10,32   |
| 5-я                      | 21,53     | 21,6    |
| 6-я                      | 21,56     | 21,88   |

– выщелачивание металлов в дезинтеграторе обеспечивает примерно такое же извлечение.

2. Сравнимое извлечение металлов при выщелачивании в дезинтеграторе достигается в течение первых секунд, в то время как продолжительность раздельного выщелачивания изменяется от 15 до 60 минут, т. е. на 2 порядка больше.

3. Извлечение металлов повышается с увеличением циклов переработки сырья в рабочем органе дезинтегратора.

Вариант выщелачивания определяется из числа возможных:

- агитационное выщелачивание,
- выщелачивание активированного в дезинтеграторе в сухом виде сырья;
- выщелачивание в дезинтеграторе;
- довыщелачивание сырья после выщелачивания в дезинтеграторе;
- выщелачивание сырья в дезинтеграторе в течение нескольких циклов.

Переменные факторы осуществления экспериментов:

1. Содержание серной кислоты и хлорида натрия,  $X_1$ ,  $X_2$ , ( $X_1 - 1 - 2$ ,  $0 - 6$  и  $1 - 10$  г/л,  $X_2 - 1 - 20$ ,  $0 - 90$  и  $1 - 160$  г/л).

2. Соотношение твердого и жидкого Ж : Т,  $X_3$ , ( $X_3 - 1 - 4$ ,  $0 - 7$  и  $1 - 10$ ).

3. Время выщелачивания,  $X_4$ , ( $X_4 - 1 - 0,25$ ,  $0 - 0,5$ ,  $1 - 1$  час.),

4. Скорость вращения роторов дезинтегратора,  $X_5$ , ( $X_5 - 1 - 50$ ,  $0 - 125$ ,  $1 - 200$  Гц).

5. Количество циклов выщелачивания в дезинтеграторе,  $X_6$ , ( $X_6 - 1 - 3$ ,  $0 - 5$ ,  $1 - 7$ ).

Идентичность техники экспериментального выщелачивания:

- количество сырья в единичном эксперименте – 50 граммов;

- масса сырья увеличивается с учетом уноса;

- промежуток времени между активацией в дезинтеграторе и выщелачиванием минимизируется для сохранения эффекта активации;

- продукционные растворы выщелачивания направляются на исследование немедленно;

- отфильтрованный раствор направляется на анализ содержания свинца и цинка не позже 24 часов после получения.

При определении параметров выщелачивания руд к исходным данным относятся: химический состав сырья и извлечение металла в раствор [3–4].

Химический состав Садонских руд, %:  $Al_2O_3 - 20,8$ ;  $Si - 50,29$ ;  $S - 4,9$ ;  $Cl - 0,06$ ;  $Ag - 0,1$ ;  $K_2O - 5,4$ ;  $CO - 2,5$ ;  $TiO_2 - 0,79$ ;  $Mn - 0,26$ ;  $Fe - 7,5$ ;  $Cu - 0,2$ ;  $Zn - 3,9$ ;  $Pb - 1,6$ .

Базовым вариантом для сравнения совокупности параметров выщелачивания служат показатели агитационного выщелачивания руд в перколяторе (табл. 2).

Химический состав хвостов обогатительной фабрики, %:  $SiO_2 - 31,4$ ;  $Fe - 4,4$ ;  $CaO - 1,96$ ;  $S - 1,88$ ;  $Ag - 0,015$ ;  $Cu - 0,18$ ;  $Mn - 0,015$ ;  $K_2O - 3,5$ ;  $Al_2O_3 - 0,8$ ;  $TiO_2 - 0,03$ ;  $Zn - 0,95$ ;  $Pb - 0,84$ .

Результаты выщелачивания руд в дезинтеграторе сведены в табл. 3.

Результаты выщелачивания хвостов обогащения в дезинтеграторе сведены в табл. 4.

Таблица 2

**Результаты выщелачивания руд**

Table 2

**The results of leaching ore**

| № п/п | Уровень независимых факторов |    |    |    | Значение величин           |                      |               |            | Извлечение Me в раствор, % |        |
|-------|------------------------------|----|----|----|----------------------------|----------------------|---------------|------------|----------------------------|--------|
|       | X1                           | X2 | X3 | X4 | содержание $H_2SO_4$ , г/л | содержание NaCl, г/л | отношение Ж÷Т | время, час | цинк                       | свинец |
| 1     | -1                           | -1 | -1 | -1 | 2                          | 20                   | 4             | 0,25       | 8,5                        | 0,75   |
| 1.    | 1                            | -1 | -1 | -1 | 10                         | 20                   | 4             | 0,25       | 78,45                      | 0,54   |
| 2.    | -1                           | 1  | -1 | -1 | 2                          | 160                  | 4             | 0,25       | 25,08                      | 41,57  |
| 3.    | 1                            | 1  | -1 | -1 | 10                         | 160                  | 4             | 0,25       | 32,88                      | 43,05  |
| 4.    | -1                           | -1 | 1  | -1 | 2                          | 20                   | 10            | 0,25       | 66,34                      | 4,03   |
| 5.    | 1                            | -1 | 1  | -1 | 10                         | 20                   | 10            | 0,25       | 89,9                       | 5,38   |
| 6.    | -1                           | 1  | 1  | -1 | 2                          | 160                  | 10            | 0,25       | 17,30                      | 34,97  |
| 7.    | 1                            | 1  | 1  | -1 | 10                         | 160                  | 10            | 0,25       | 24,51                      | 40,35  |
| 8.    | -1                           | -1 | -1 | 1  | 2                          | 20                   | 4             | 1,0        | 25,96                      | 19,37  |

Окончание табл. 2

| №<br>п/п | Уровень независимых факторов |    |    |    | Значение величин   |                                 |                       |               | Извлечение<br>Me в раствор,<br>% |        |
|----------|------------------------------|----|----|----|--|---------------------------------|-----------------------|---------------|----------------------------------|--------|
|          | X1                           | X2 | X3 | X4 | содер-<br>жание<br>H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ,<br>г/л | содер-<br>жание<br>NaCl,<br>г/л | отно-<br>шение<br>Ж÷Т | время,<br>час | цинк                             | свинец |
| 9.       | 1                            | -1 | -1 | 1  | 10   | 20                              | 4                     | 1,0           | 95,17                            | 1,62   |
| 10.      | -1                           | 1  | -1 | 1  | 2  | 160                             | 4                     | 1,0           | 15,00                            | 27,98  |
| 11.      | 1                            | 1  | -1 | 1  | 10   | 160                             | 4                     | 1,0           | 38,65                            | 41,97  |
| 12.      | -1                           | -1 | 1  | 1  | 2  | 20                              | 10                    | 1,0           | 67,77                            | 74,03  |
| 13.      | 1                            | -1 | 1  | 1  | 10   | 20                              | 10                    | 1,0           | 69,23                            | 2,02   |
| 14.      | -1                           | 1  | 1  | 1  | 2  | 160                             | 10                    | 1,0           | 21,53                            | 52,47  |
| 15.      | 1                            | 1  | 1  | 1  | 10   | 160                             | 10                    | 1,0           | 4,69                             | 20,0   |
| 16.      | -1                           | 0  | 0  | 0  | 2  | 90                              | 7                     | 0,625         | 29,28                            | 40,49  |
| 17.      | 1                            | 0  | 0  | 0  | 10   | 90                              | 7                     | 0,625         | 47,44                            | 47,09  |
| 18.      | 0                            | -1 | 0  | 0  | 6  | 20                              | 7                     | 0,625         | 93,86                            | 1,89   |
| 19.      | 0                            | 1  | 0  | 0  | 6  | 160                             | 7                     | 0,625         | 35,33                            | 50,85  |
| 20.      | 0                            | 0  | -1 | 0  | 6  | 90                              | 4                     | 0,625         | 55,95                            | 27,45  |
| 21.      | 0                            | 0  | 1  | 0  | 6  | 90                              | 10                    | 0,625         | 50,47                            | 6,91   |
| 22.      | 0                            | 0  | 0  | -1 | 6  | 90                              | 7                     | 0,25          | 55,53                            | 55,56  |
| 23.      | 0                            | 0  | 0  | 1  | 6  | 90                              | 7                     | 1,0           | 58,55                            | 46,14  |

Таблица 3

**Результаты активации в дезинтеграторе**

Table 3

**Activation results in the disintegrator**

| №<br>п/п | Уровень независимых факто-<br>ров |    |    |    | Значение величин   |                                 |                         |               | Извлечение<br>в раствор, % |        |
|----------|-----------------------------------|----|----|----|--|---------------------------------|-------------------------|---------------|----------------------------|--------|
|          | X1                                | X2 | X3 | X4 | содер-<br>жание<br>H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ,<br>г/л | содер-<br>жание<br>NaCl,<br>г/л | отно-<br>шение<br>Ж ÷ Т | время,<br>час | цинк                       | свинец |
| 1.       | -1                                | -1 | -1 | -1 | 2  | 20                              | 4                       | 50            | 26,95                      | 13,39  |
| 2.       | 1                                 | -1 | -1 | -1 | 10   | 20                              | 4                       | 50            | 82,45                      | 0,57   |
| 3.       | -1                                | 1  | -1 | -1 | 2  | 160                             | 4                       | 50            | 26,37                      | 43,41  |
| 4.       | 1                                 | 1  | -1 | -1 | 10   | 160                             | 4                       | 50            | 34,56                      | 44,96  |
| 5.       | -1                                | -1 | 1  | -1 | 2  | 20                              | 10                      | 50            | 69,72                      | 4,31   |
| 6.       | 1                                 | -1 | 1  | -1 | 10   | 20                              | 10                      | 50            | 97,84                      | 5,62   |
| 7.       | -1                                | 1  | 1  | -1 | 2  | 160                             | 10                      | 50            | 18,19                      | 36,52  |
| 8.       | 1                                 | 1  | 1  | -1 | 10   | 160                             | 10                      | 50            | 25,76                      | 42,14  |
| 9.       | -1                                | -1 | -1 | 1  | 2  | 20                              | 4                       | 200           | 27,29                      | 20,23  |
| 10.      | 1                                 | -1 | -1 | 1  | 10   | 20                              | 4                       | 200           | 96,89                      | 1,69   |
| 11.      | -1                                | 1  | -1 | 1  | 2  | 160                             | 4                       | 200           | 15,77                      | 29,22  |
| 12.      | 1                                 | 1  | -1 | 1  | 10   | 160                             | 4                       | 200           | 40,62                      | 43,83  |

Окончание табл. 3

| № п/п | Уровень независимых факторов |    |    |    | Значение величин                                |                      |                 |            | Извлечение в раствор, % |        |
|-------|------------------------------|----|----|----|---|----------------------|-----------------|------------|-------------------------|--------|
|       | X1                           | X2 | X3 | X4 | содержание H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , г/л | содержание NaCl, г/л | отношение Ж ÷ Т | время, час | цинк                    | свинец |
| 13.   | -1                           | -1 | 1  | 1  | 2   | 20                   | 10              | 200        | 71,24                   | 4,31   |
| 14.   | 1                            | -1 | 1  | 1  | 10  | 20                   | 10              | 200        | 72,76                   | 2,11   |
| 15.   | -1                           | 1  | 1  | 1  | 2   | 160                  | 10              | 200        | 22,74                   | 54,79  |
| 16.   | 1                            | 1  | 1  | 1  | 10  | 160                  | 10              | 200        | 65,26                   | 2,38   |
| 17.   | -1                           | 0  | 0  | 0  | 2   | 90                   | 7               | 125        | 30,77                   | 42,28  |
| 18.   | 1                            | 0  | 0  | 0  | 10  | 90                   | 7               | 125        | 49,87                   | 49,17  |
| 19.   | 0                            | -1 | 0  | 0  | 6   | 20                   | 7               | 125        | 98,65                   | 1,97   |
| 20.   | 0                            | 1  | 0  | 0  | 6   | 160                  | 7               | 125        | 37,14                   | 53,1   |
| 21.   | 0                            | 0  | -1 | 0  | 6   | 90                   | 4               | 125        | 58,81                   | 28,66  |
| 22.   | 0                            | 0  | 1  | 0  | 6   | 90                   | 10              | 125        | 53,05                   | 68,83  |
| 23.   | 0                            | 0  | 0  | -1 | 6   | 90                   | 7               | 50         | 58,36                   | 58,02  |
| 24.   | 0                            | 0  | 0  | 1  | 6   | 90                   | 7               | 200        | 61,55                   | 48,18  |

Таблица 4

Результаты выщелачивания

Table 4

Leaching results

| № п/п | Уровень независимых факторов |                |                |                | Значение величин                                |                      |                 |          | Извлечение в раствор, % |        |
|-------|------------------------------|----------------|----------------|----------------|---|----------------------|-----------------|----------|-------------------------|--------|
|       | X <sub>1</sub>               | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | X <sub>4</sub> | содержание H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , г/л | содержание NaCl, г/л | отношение Ж ÷ Т | время, ч | цинк                    | свинец |
| 1.    | -1                           | -1             | -1             | -1             | 2   | 20                   | 4               | 50       | 10,88                   | 0,35   |
| 2.    | 1                            | -1             | -1             | -1             | 10  | 20                   | 4               | 50       | 18,80                   | 0,10   |
| 3.    | -1                           | 1              | -1             | -1             | 2   | 160                  | 4               | 50       | 26,10                   | 7,41   |
| 4.    | 1                            | 1              | -1             | -1             | 10  | 160                  | 4               | 50       | 8,34                    | 7,68   |
| 5.    | -1                           | -1             | 1              | -1             | 2   | 20                   | 10              | 50       | 10,94                   | 0,72   |
| 6.    | 1                            | -1             | 1              | -1             | 10  | 20                   | 10              | 50       | 72,07                   | 0,96   |
| 7.    | -1                           | 1              | 1              | -1             | 2   | 160                  | 10              | 50       | 46,54                   | 6,23   |
| 8.    | 1                            | 1              | 1              | -1             | 10  | 160                  | 10              | 50       | 5,75                    | 7,20   |
| 9.    | -1                           | -1             | -1             | 1              | 2   | 20                   | 4               | 200      | 24,62                   | 0,93   |
| 10.   | 1                            | -1             | -1             | 1              | 10  | 20                   | 4               | 200      | 51,63                   | 0,29   |
| 11.   | -1                           | 1              | -1             | 1              | 2   | 160                  | 4               | 200      | 2,00                    | 4,99   |
| 12.   | 1                            | 1              | -1             | 1              | 10  | 160                  | 4               | 200      | 12,86                   | 7,48   |
| 13.   | -1                           | -1             | 1              | 1              | 2   | 20                   | 10              | 200      | 22,55                   | 0,72   |
| 14.   | 1                            | -1             | 1              | 1              | 10  | 20                   | 10              | 200      | 23,03                   | 0,36   |
| 15.   | -1                           | 1              | 1              | 1              | 2   | 160                  | 10              | 200      | 7,2                     | 9,35   |
| 16.   | 1                            | 1              | 1              | 1              | 10  | 160                  | 10              | 200      | 21,56                   | 1,25   |

| №<br>п/п | Уровень независимых факторов |                |                |                | Значение величин                                |                      |               |          | Извлечение в раствор, % |        |
|----------|------------------------------|----------------|----------------|----------------|---|----------------------|---------------|----------|-------------------------|--------|
|          | X <sub>1</sub>               | X <sub>2</sub> | X <sub>3</sub> | X <sub>4</sub> | содержание H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> , г/л | содержание NaCl, г/л | отношение Ж÷Т | время, ч | цинк                    | свинец |
| 17.      | -1                           | 0              | 0              | 0              | 2   | 90                   | 7             | 125      | 9,74                    | 8,84   |
| 18.      | 1                            | 0              | 0              | 0              | 10  | 90                   | 7             | 125      | 15,78                   | 7,22   |
| 19.      | 0                            | -1             | 0              | 0              | 6   | 20                   | 7             | 125      | 31,24                   | 8,40   |
| 20.      | 0                            | 1              | 0              | 0              | 6   | 160                  | 7             | 125      | 11,76                   | 0,34   |
| 21.      | 0                            | 0              | -1             | 0              | 6   | 90                   | 4             | 125      | 18,62                   | 9,07   |
| 22.      | 0                            | 0              | 1              | 0              | 6   | 90                   | 10            | 125      | 16,80                   | 490    |
| 23.      | 0                            | 0              | 0              | -1             | 6   | 90                   | 7             | 50       | 18,47                   | 11,75  |
| 24.      | 0                            | 0              | 0              | 1              | 6   | 90                   | 7             | 200      | 19,48                   | 9,91   |

Извлечение металла зависит от 4–5 независимых параметров. Ввиду невозможности построения в шестимерном пространстве графика зависимости от 5 переменных применен метод линейного множественного регрессионного анализа. Переменным является один параметр, а остальным параметрам придают средние значения.

Для исследуемых Садонских руд:

- содержание H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, 6 г/дм<sup>3</sup>;
- содержание NaCl, 90 г/дм<sup>3</sup>;
- соотношение жидкого и твердого, 7;
- время выщелачивания, 0,625 час;
- скорость вращения роторов, 125 Гц.

Извлечение металлов в раствор в зависимости от концентрации серной кислоты интерпретируется графиком (рис. 1).

Очевидно резкое различие извлечения в раствор свинца 25–28 % и цинка 25–80 % при равной концентрации кислоты.

Параметры извлечения металлов хлоридом натрия интерпретируются графиком на рис. 2.

Извлечение свинца и цинка в раствор хлоридом натрия характеризуется ассиметрией графиков с пересечением в области значений 120 г/дм<sup>3</sup>.

Параметры извлечения металлов в зависимости от соотношения жидкого и твердого вещества интерпретируются графиком на рис. 3.

Соотношение жидкого и твердого вещества по разному влияет на извлечение металлов в раствор (рис. 4).

Если для свинца интенсивность извлечения со временем увеличивается, то для цинка она уменьшается. Графики извлечения по направленности совпадают, но характеризуются ассиметрией.

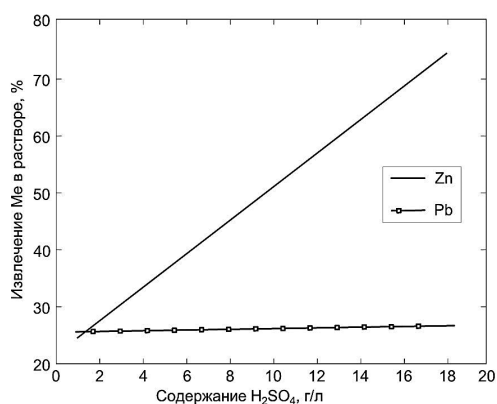


Рис. 1. Параметры извлечения металлов серной кислотой

Fig. 1. Parameters of extraction of metals with sulfuric acid

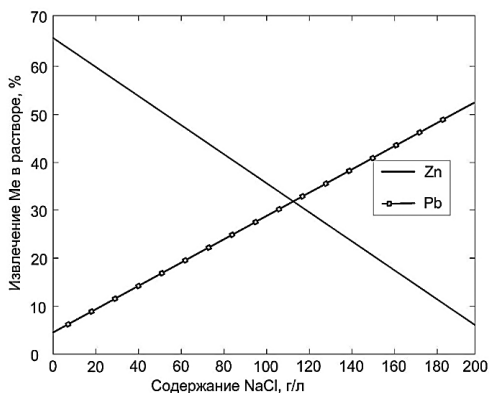


Рис. 2. Параметры извлечения металлов хлоридом натрия

Fig. 2. Parameters of metal extraction by sodium chloride

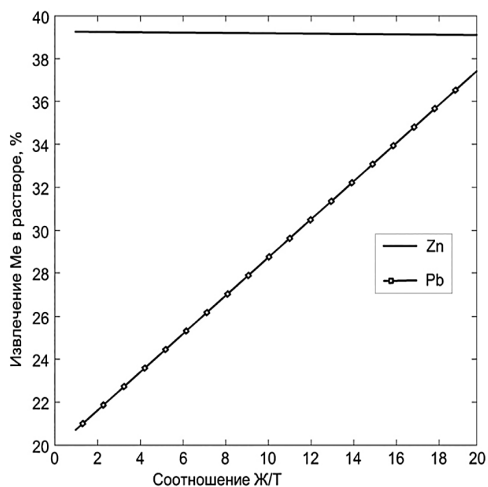


Рис. 3. Параметры извлечения металлов в зависимости от соотношения жидкого и твердого вещества

Fig. 3. parameters of metal extraction depending on the ratio of liquid and solid substances

Укрупненный анализ содержания цинка и свинца в продуктивных растворах свидетельствует о том, что наибольшее влияние на процесс оказывает продолжительность выщелачивания — металл не успевает раствориться в течение цикла, поэтому для совершенствования процесса целесообразна

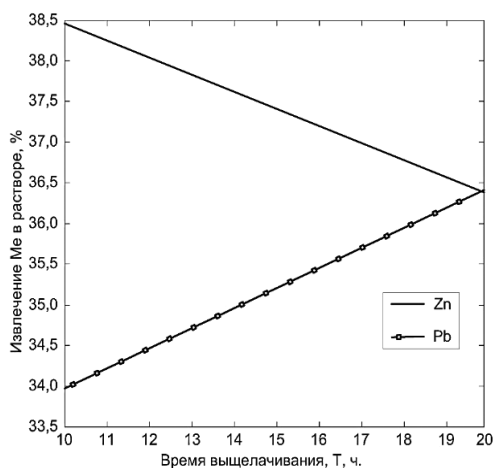


Рис. 4. Параметры извлечения металлов в зависимости от времени

Fig. 4. Parameters of metal extraction as a function of time

модернизация конструкции дезинтегратора для получения более полного эффекта увеличения продолжительности активации [5–6].

Укрупненный анализ содержания цинка и свинца в продуктивных растворах свидетельствует о том, что наибольшее влияние на процесс оказывает продолжительность выщелачивания — металл не успевает раствориться в течение цикла, поэтому для совершенствования процесса целесообразна модернизация конструкции дезинтегратора для получения более полного эффекта увеличения продолжительности активации [5–6].

Совершенствование конструкции дезинтегратора заключается в усилении слагающих его механохимических компонент (табл. 5) [7–9].

#### **Механическое воздействие.**

На сырье дополнительно воздействуют вибрацией в горизонтальной плоскости с колебаниями от 30 до 1500 Гц при амплитуде горизонтальных колебаний от 2 до 50 мм и амплитуде вертикальных подбрасываний до 30 мм.



Таблица 5

**Направления совершенствования конструкции**

Table 5

**Design improvement directions**

| Природа воздействия | Цель совершенствования   | Способ осуществления                               |
|---------------------|--|--|
| Механическое        | Увеличение поверхности реагирования и профилактика слипания частиц | Варианты сотрясения рабочего органа дезинтегратора |
| Химическое          | Изменение мобильности металлов переводом в раствор                 | Предварительная обработка реагентами               |
| Тепловое            | Ускорение процесса наружного и внутреннего взаимодействия частиц   | Повышение температуры                              |
| Комбинированное     | Объединение целей воздействия                                      | Объединение методов воздействия                    |

**Химическое воздействие.** Перед подачей сырья в дезинтегратор его обрабатывают растворами реагентов. Так, хвосты обогащения измельчают в смеси с элементарной серой в количестве 12 % до крупности 100 % фракции 0,01 мм. Обработку пульпы смесью кислот осуществляют с дальнейшим его повышением. В выщелачиваемой массе образуются окислители, которые переводят упорные минералы в легко вскрываемые формы.

**Тепловое воздействие.** В рабочую камеру подается тепло, являющееся катализатором происходящих в рабочем органе физических и химических реакций. Задачей оптимизации способов изготовления смесей является использование известных физических и химических свойств в такой последовательности, которая усиливает качественные характеристики приготовленной закладочной смеси. Наиболее прогрессивна технология, при которой в процессе измельчения и смешения осуществляют активацию компонентов смеси на грохоте, затем

в дезинтеграторе, а воду перед смешиванием компонентов активируют путем осаждения солей и примесей, изменяя энергетическое состояние растворов при взаимодействии с продуктами анодной и катодной реакции и диффузии через мембраны.

Еще больший эффект достигается тем, что закладочную смесь при транспортировке подвергают вибрации вплоть до закладочного объекта. Активацию смеси продолжают в закладочном трубопроводе во время ее транспортирования от закладочного комплекса до погашаемых пустот на расстояние в первые километры.

Результаты исследования корреспондируют с результатами исследований отечественных и зарубежных специалистов данного направления горного дела [10–13].

**Выводы**

Выщелачивание в дезинтеграторе по сравнению с агитационным выщелачиванием увеличивает извлечение металлов в раствор в 1,13–2,09 и сокращает продолжительность пере-

работки до уровня санитарных требований на 2 порядка.

Увеличение полезного использования эффекта механохимической

активации в дезинтеграторе возможно при модернизации существующей конструкции дезинтегратора.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голик В.И., Максимов Р.Н., Игнатов В.Н., Ляшенко Ю.М. Глубокая утилизация хвостов обогащения по механохимической технологии // Горный информационно-аналитический бюллетень. Специальный выпуск. — 2018. — № 6. — С. 58–64.

2. Голик В.И., Комащенко В.И., Страданченко С.Г., Масленников С.А. Повышение полноты использования недр путем глубокой утилизации отходов обогащения угля // Горный журнал. — 2012. — № 9. — С. 91–95.

3. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap Leaching Technology — Current State, Innovations, and Future Directions: A review // Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 2016, vol. 37, № 2, pp. 73–119.

4. Клюев Р.В., Босиков И.И., Егорова Е.В., Гаврина О.А. Оценка горно-геологических и горнотехнических условий карьера «Северный» с помощью математических моделей // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. — № 3. — С. 418–427..

5. De Oliveira D.M., Sobral L.G. S., Olson G.J., Olson S.B. Acid leaching of a copper ore by sulphur-oxidizing microorganisms // Hydrometallurgy. 2014, vol. 147–148, pp. 223–227.

6. Галачиева С.В., Соколов А.А., Соколова О.А., Махашева С.А. Система оценки устойчивого развития региональных народнохозяйственных комплексов горных территорий // Устойчивое развитие горных территорий. — 2018. — №3. — С. 329–335.

7. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects // Hydrometallurgy. 2015, Т. 157, pp. 306–324.

8. Дмитрак Ю.В., Шишканов К.А. Разработка вероятностной кинематической модели мелющих тел в помольной камере вибрационной мельницы // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2010. — № 12. — С. 302–308.

9. Golik V.I., Gabaraev O.Z., Maslennikov S.A., Khasheva Z.M., Shulgaty L.P. The provision of development conversion perspectives into underground one for Russian iron ore deposits development // The Social Sciences (Pakistan). 2016, Т. 11, № 18. С. 4348–435.

10. Клюев Р.В., Босиков И.И., Майер А.В., Гаврина О.А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы // Устойчивое развитие горных территорий. 2020. — №2. — С. 283–290.

11. Дмитрак Ю.В., Выхребенец А.С., Тарасов М.А. Определение энергетических параметров рабочего органа выемочной машины при комбинированном способе разрушения массива горной породы // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). — 2018. — № 4 (специальный выпуск 12). — С. 12–17.

12. Пухова В.П., Воропанова Л.А. Очистка сточных вод горно-перерабатывающих предприятий путем использования природных продуктов // Устойчивое развитие горных территорий. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 134–141.

13. Дмитрак Ю.В., Камнев Е.Н. АО «Ведущий проектно-изыскательский и научно-исследовательский институт промышленной технологии» — путь длиной в 65 лет // Горный журнал. — 2016. — № 3. — С. 6–12. **ГИАБ**

## REFERENCES

1. Golik V.I., Maksimov R.N., Ignatov V.N., Lyashenko Yu. M. Deep utilization of tailings according to mechanochemical technology. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 6, pp. 58–64. [In Russ].
2. Golik V.I., Komashchenko V.I., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Improving the completeness of the use of mineral resources through the deep utilization of coal enrichment waste. *Gornyj Journal.* 2012, no. 9, pp. 91–95.
3. Ghorbani Y., Franzidis J.-P., Petersen J. Heap Leaching Technology Current State, Innovations, and Future Directions: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review.* 2016, vol. 37, no. 2, pp. 73–119.
4. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Egorova E.V., Gavrina O.A. Assessment of mining-geological and mining technical conditions of the Severny pit with the use of mathematical models. *Sustainable Development of Mountain Territories.* 2020, № 3, pp. 418–427. [In Russ]
5. De Oliveira D.M., Sobral L.G. S., Olson G.J., Olson S.B. Acid leaching of a copper ore by sulphur-oxidizing microorganisms. *Hydrometallurgy.* 2014, vol. 147–148, pp. 223–227.
6. Galachieva S.G., Sokolov A. An., Makhosheva S. Al., Sokolova, O.A. Estimation system of sustainable development of regional national-economic complexes of mountain territories. *Sustainable Development of Mountain Territories.* 2018, no. 3, pp. 329–335 [In Russ].
7. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy.* 2015, v. 157, pp. 306–324.
8. Dmitrak Yu. V., Shishkanov K.A. Development of a probabilistic kinematic model of grinding media in the grinding chamber of a vibration mill. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* . 2010, no. 2. pp. 302–308. [In Russ].
9. Golik V.I., Gabaraev O.Z., Maslennikov S.A., Khasheva Z.M., Shulgaty L.P. The provision of development conversion perspectives into underground one for Russian iron ore deposits development. *The Social Sciences (Pakistan).* 2016, T. 11, no. 18, C. 4348–4351.
10. Klyuev R.V., Bosikov I.I., Mayer A.V., Gavrina O.A. Comprehensive analysis of the effective technologies application to increase sustainable development of the natural-technical system. *Sustainable Development of Mountain Territories.* 2020, №2, pp. 283–290. [In Russ].
11. Dmitrak Yu. V., Vyskrebenets A.S., Tarasov M.A. Determination of the energy parameters of the working body of a mining machine with a combined method of destruction of a rock mass. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2018, no. 4 (special issue 12), pp. 12–17. [In Russ].
12. Pukhova V.P., Voropanova L.A. Wastewater treatment of mining and processing plants using the natural products. *Sustainable Development of Mountain Territories.* 2019, no. 2, pp. 134–141. [In Russ].
13. Dmitrak Yu.V., Kamnev E.N. JSC «Leading Design, Survey and Research Institute of Industrial Technology» – a 65-year-long path. *Gornyj zhurnal.* 2016, no. 3, pp. 6–12. [In Russ].

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Голык Владимир Иванович<sup>1</sup> – докт. техн. наук, профессор, профессор кафедры «Горное дело», v.i.golik@mail.ru;

Дмитрак Юрий Витальевич<sup>1</sup> – докт. техн. наук, профессор, ректор, dmitrak@yandex.ru;

*Тарасов Михаил Анатольевич*<sup>2</sup> — генеральный директор;

*Вернигор Владимир Владимирович*<sup>1</sup> — аспирант.

<sup>1</sup> Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет), Владикавказ, Россия, 362021, г. Владикавказ;

<sup>2</sup> АО «ЦПТИ» (Госкорпорация «Росатом»), Россия, г. Москва.

**Для контактов:** Голик В.И., v.i.golik@mail.ru

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Golik V.I.*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of Department of Mining, v.i.golik@mail.ru;

*Dmitrak Yu.V.*<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Rector, dmitrak@yandex.ru;

*Tarasov M.A.*<sup>2</sup>, general director;

*Vernigor V.V.*<sup>1</sup>, graduate student.

<sup>1</sup> North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Russia;

<sup>2</sup> General Director, TISC JSC (State Atomic Energy Corporation “Rosatom”), Moscow, Russia.

Получена редакцией 26.05.2020; получена после рецензии 09.06.2020; принята к печати 10.10.2020.

Received by the editors 26.05.2020; received after the review 09.06.2020; accepted for printing 10.10.2020.

