

These recommendations were taken into account when calculating the stability factor of benches and bench groups along the V-shaped trench line under construction considering the seismic impact of mass blasting (see table 1, option 2).

The obtained results showed the stability degree the mine workings correspond to standard indices (the calculated value of the stability factor (SF) is within 1,31-2,34).

Conclusions. Thus, the proposed method for calculating the stability of open pits, considering the seismic impact of mass blasting, allows to determine numerical values of drilling and blasting parameters, the use of which when designing the spiral extended V-shaped trench in the eastern wall area of the "YuGOK" open pit allowed the construction of the trench in conditions of the limited working area and secured long-term and safe operation.

References

1. **Fisenko G.L.** Ustoichivost bortov karyerov i otvalov. Stability of Pit Walls and Dumps. - M. : Nedra, 1965. -375 p.
2. Metodichni vказivky z vyznachennya optimalnykh kutiv bortiv, ukosiv ustupiv i vidvaliv zalizorudnih ta flyusovykh karyeriv // Methodological guidelines on determining optimal slope angles of walls, slopes, benches and dumps at iron ore and flux open pits. // edited by prof. A.G. Shapar. K.: - 2009. – 201 p.
3. Normy tehnologichnogo proektuvannya girnychodobuvnykh pidpnyemstv iz vidkrytym sposobom rozrobky rodovyshch kornyshykh copalyn. Norms of technological design of open pit mining enterprises. K. 2007.
4. **Nesmashnyi Ie.A.** Calculating and rationalizing the relativity norms for determining the slopes of quarry flanks // Soviet mining journal, -1987, vol. 1, num. 3, Oksonian Press, India.
5. Vybory parametrov ustupov i bortov karyera na prdelnom konture n otsenka yego vliyaniya na podzemnye vody. Parameter selection for open pit benches and walls on the limiting contours and estimation of its impact on underground waters // Research report // Sci. supervisor prof. **Yu.M. Nikolashin** // Novotek -2 / Kharkiv, 2008
6. Vvedeniye v mehaniku skalnykh porod. Introduction to Rock Mechanics // Ed. by H. Bock . -M.: Mir, 1983 . - 271 p.
7. **Nesmashnyi Ie.A., Fedin K.A.** Otsenka seismicheskoy opasnosti massovykh vzryvov v raione vostochnogo borta karyera OAO "YuGOK". Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost. Seismic hazard assessment of mass blasting in the eastern wall of the "YuGOK." open pit. Metallurgical and Mining Industry. Dnepropetrovsk, № 4, 2013, p. 72-75
8. **Nesmashnyi Ie.O., Fedin K.A.** Vyznachennya seysmabezpechnykh parametrov masovykh vybuhiv pry budivnytstvi transheyi glybokogo vvodu na karyeri "YuGOK". V zb. "Visnyk Krivorizkogo natsionalnogo universytetu". Determining seismosafe parameters of mass blasting when constructing an extended trench at a "YuGOK" open pit. In: Kryvyi Rih National University Bulletin. Kryvyi Rih, KNU Publishing House, № 35, -2013,-C. 14-19
9. **V.D. Sydorenko, Ie.O. Nesmashnyi, V.M. Zdeshchits.** Monitoring seysmichnykh kolyvan pry masovykh pidryvnyakh sverdlovnykh zaryadiv v karyeri YuGOK. Seismic vibrations monitoring at mass blasting of blasthole charges in a Yu-GOK open pit. // Kryvyi Rih National University Bulletin, Kryvyi Rih, KNU Publishing House, № 1, 2003, p. 7 - 9.
10. Vyznachennya parametrov burovykh i vybuhovykh robit pry vykonanni budivnytstva transheyi. Determining blasting and drilling parameters when constructing a trench// Research Report// Sci. supervisor prof. **Ie.O. Nesmashnyi** // Zvit about PDR // Nauk. ker. prof. Nesmashnyi Ie.O. // - Kryvyi Rih, KTU, 2009.

A manuscript entered release 15.03.17

УДК 504.55.054: 662 (470.6)

В.И. ГОЛИК, д-р техн. наук, проф., ВНИИ РАН и Северо-Кавказский горно-металлургический институт, г. Владикавказ, Россия. Ю.И. РАЗОРЕНОВ, д-р техн. наук, проф., Северо-Кавказский горно-металлургический институт, г. Владикавказ, Россия, В.С. МОРКУН, д-р техн. наук, проф., Криворожский национальный университет, г. Кривой Рог, Украина
М.Ф. МИЦИК, канд. техн. наук, доц., Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) ДГТУ, г Шахты

МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ МЕХАНОХИМИЧЕСКОГО ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ

Цель исследования. Разработка универсальной математической модели комбинированной технологией с сочетанием методов химического обогащения и механической активации в дезинтеграторе.

Методы. Анализ концепции извлечения металлов из некондиционных отходов добычи и переработки металло-содержащего минерального сырья, обобщение и математическое осмысление экспериментального выщелачивания свинца и цинка из хвостов обогащения Садонских месторождений осуществлено в лабораторном дезинтеграторе.

Научная новизна. Эксперимент по химическому обогащению и механической активации в дезинтеграторе осуществлен впервые в мировой практике. Также впервые для эксперимента в качестве исходного сырья использовано некондиционное металлосодержащее минеральное сырье.

Практическая значимость. Возможность радикальной утилизации отходов добычи и переработки металлосо-державшего минерального сырья с использованием накопленной техногенной базы и получением комплексного экономического, экологического и социального эффекта. Обоснована методическая основа механизации расчетов параметров механохимических технологий.

Результаты. Дана краткая историческая справка по теме использования основных компонентов технологии и получению права гражданства новым компонентом - механической активацией вещества приложением большой механической энергии. Разработана методика постановки эксперимента по обоснованию нового процесса переработки минералов. Получены регрессионные уравнения вариантов выщелачивания, которые позволили сформулировать универсальную математическую модель, учитывающая особенности выщелачивания металлов из минерального сырья на различных этапах процесса комбинированного выщелачивания. Выполнены расчеты регрессионных моделей в среде Maple 9.5 с получением уравнений регрессий, рассчитанных на основе экспериментальных данных, из общей модели при соответствующих значениях переменных. Получены осредненные по некоторым параметрам зависимости, характеризующие остальные не осредненные параметры извлечения металлов. Приведена математическая модель определения прибыли от переработки хвостов обогащения.

Ключевые слова: химическое обогащение, механическая активация, дезинтегратор, металл, некондиционные отходы, добыча, математическое осмысление, эксперимент, модель.

Введение. Человечество использовало три основных компонента технологии задолго до того, как они стали объектами технологии. Так, высокие температуры использовались много тысяч лет назад при изготовлении кирпича, извести, различных металлов. Высокие давления столетия используются в военном деле. Диспергирование используется с первых шагов человека при изготовлении муки из зерна.

Со середины прошлого века в технологии формируется новый компонент - механическая активация вещества большой механической энергией. Было замечено, что при обработке вещества быстро следующими друг за другом ударами со скоростью 250 м/с вещества приобретают новые технологические свойства.

Диспергирование широко распространено в природе. Так, птицы, пережевывая пищу зубами, воспроизводят работу дробилок. Диспергирование использует механические силы для разрушения структуры твердых тел. Качество помола оценивают по увеличению поверхности вещества. Оно тем выше, чем меньше расход энергии на создание новой поверхности и ниже эксплуатационные затраты. Независимо от конструкции помольного агрегата, если вещество разрушается, каждая новая открывающаяся поверхность активна.

Механохимией называют разложение карбонатов, хлоридов и других веществ при помоле в мельницах, образование веществ, например, сернистых соединений и силикатов, растворимость веществ, ускорение химических реакций, усиление каталитических свойств, улучшение физико-технических свойств и понижение реагирования [1-4].

Дезинтегратор или машина для переработки минералов состоит из двух вращающихся в противоположные стороны роторов, насаженных на отдельные соосные валы и заключённых в кожух. На дисках роторов по концентрическим окружностям расположены пальцы или била так, что ряд одного ротора проходит между двумя рядами другого.

Материал подаётся в рабочую корзину и, перемещаясь к периферии, подвергается многократным ударам пальцев, вращающихся во встречных направлениях со скоростью до 1000 об/мин.

Особенность дезинтегратора - хорошее перемешивание измельчаемого материала, что иногда используется в технологических целях, например, приготовление угольной шихты перед коксованием, обработка полезных ископаемых, продуктов химической промышленности, древесины и др.

При дезинтеграции аккумулируется дополнительная энергия, величина которой достигает 30% от всей затраченной на обработку энергии. Так, при обработке кокса вместе с марганцевой рудой, кокс самовоспламеняется. Такое же явление возникает при активации титана, железного порошка, ферросплавов и др.

Механическую активацию правомерно рассматривать как изменение структуры материала посредством воздействия механических сил. Диапазон изменения вещества или степень механической активации зависит, как от структуры самого материала, так и от величины и вида воздействующих на него механических сил. Механическая активация характеризуется количеством дефектов структуры материалов.

Возникающие при дезинтегрировании вещества скорости удара на порядок больше, чем в вибро- и шаровых мельницах, а ускорение достигают миллионов ускорений свободного паде-

ния. Феномен механической активации веществ может быть подтвержден экспериментально при использовании научной аппаратуры.

Дезинтеграторы осуществляют не только механическую активацию. При обработке поликристаллического сырья оно измельчается по границе разделов фаз, поэтому процессы сепарирования фаз из многофазных веществ упрощаются, а выход целевого продукта увеличивается.

При одновременной обработке нескольких компонентов в дезинтеграторе независимо от количественного их соотношения и различий удельного веса и влажности образуется гомогенная смесь.

Дезинтеграторы развивают скорость удара частиц обрабатываемого вещества до 450 м/с. В минеральном сырье накапливается энергия деформации, которая реализуется в последующих химических процессах.

Влияние механической активации материала на его физико-химическую активность не остается постоянным после прекращения механической обработки, а убывает во времени вследствие релаксации.

Изменение эффекта механической активации материала после прекращения ударной обработки исследовано в процессе переработки колчедана, фосфорной муки и известняка. Материал обрабатывали в дезинтеграторе при скорости от 70 до 154 м/с в течение от 50 до 480 с.

В течение механической обработки регистрировали потребляемую двигателем мощность и длительность обработки.

Полученный при различных скоростях и длительности продукт исследовали на дисперсность и химическую активность. После ударной обработки колчедан сжигали, известняк подвергали термической диссоциации, муку разлагали фосфорной кислотой.

Оказалось, что скорость химической обработки навески материала, выдержанного после ударного воздействия свыше 3000 с, практически равна скорости химической реакции для не активированного материала той же крупности.

Чем больше число ударов, получаемых частицами вещества и меньше интервал между ударами, тем больше его активность.

На феномен активации влияют электрические и электромагнитные поля.

Необходимость обеспечения промышленности металлами при уменьшении запасов удобных для разработки месторождений заставляют искать альтернативные источники получения металлов. Одним из направлений решения этой глобальной проблемы является вовлечение в производство отходов добычи и переработки руд [5-8].

Традиционные обогатительные процессы не обеспечивают полного раскрытия минералов, хотя и позволяют выделять из хвостов часть товарных продуктов.

Перспективным направлением считают извлечение металлов из хвостов добычи и переработки выщелачиванием, но эти процессы требуют много времени и недостаточно контролируются, поэтому широкого применения не находят.

Получают развитие методы переработки некондиционного сырья комбинированными технологиями, сочетающими методы химического обогащения и механической активации в дезинтеграторе [9-12].

Материалы и методы. Выщелачивание свинца и цинка из хвостов обогащения Садонских месторождений осуществлено в дезинтеграторе.

В ходе экспериментов получены регрессионные уравнения вариантов выщелачивания (табл. 1-10), которые позволили сформулировать универсальную математическую модель.

Таблица 1

Регрессионный анализ данных агитационного выщелачивания руды

Уравнение регрессии	Показатели значимости
$\varepsilon_{Zn} = 39,02 + 5,51X_1 - 11,09X_2 + 5,6X_3 + 1,43X_4 + 3,58X_1^2 + 6,48X_2^2 - 9,39X_3^2 - 9,38X_4^2 - 2,61X_1X_2 - 0,62X_1X_3 - 1,86X_1X_4 - 3,0X_2X_3 - 1,48X_2X_4 + 1,41X_3X_4$	$R^2 = 0,8873; S_{ad} = 62,01; F = 31,96$
$\varepsilon_{Pb} = 15,73 + 0,58X_1 + 6,3X_2 + 1,42X_3 - 2,17X_1^2 - 2,79X_2^2 - 2,73X_3^2 - 1,51X_4^2 + 0,75X_1X_2 - 0,89X_1X_3 + 0,45X_2X_3 - 0,23X_3X_4$	$R^2 = 0,9023; S_{ad} = 9,37; F = 25,89$

Таблица 2

Регрессионный анализ данных агитационного выщелачивания хвостов

Уравнение регрессии	Показатели значимости
$\varepsilon_{Zn} = 39,35 + 6,76X_1 - 18,88X_2 - 0,62X_4 - 11,6X_1^2 + 7,19X_2^2 + 2,03X_4^2 - 2,84X_1X_2 - 1,39X_1X_3 - 0,89X_1X_4 - 2,04X_2X_3 + 1,00X_2X_4 - 2,45X_3X_4$	$R^2 = 0,9393; S_{ad} = 46,93; F = 68,59$
$\varepsilon_{Pb} = 42,43 + 16,8X_2 + 2,68X_3 + 0,93X_4 - 3,89X_1^2 - 19,31X_2^2 + 2,36X_4^2 + 2,12X_1X_2 - 0,9X_1X_4 + 1,73X_2X_3 + 1,04X_3X_4$	$R^2 = 0,8888; S_{ad} = 71,17; F = 30,19$

Таблица 3

Регрессионный анализ данных выщелачивания активированной руды

Уравнение регрессии	Показатели значимости
$\varepsilon_{Zn} = 26,82 + 2,8X_1 - 7,21X_2 + 4,81X_3 + 2,34X_4 - 6,99X_1^2 + 3,29X_2^2 - 1,74X_4^2 - 0,45X_1X_2 + 2,93X_1X_4 - 2,98X_2X_3 - 1,41X_2X_4 - 1,12X_3X_4$	$R^2 = 0,8582; S_{ad} = 31,92; F = 35,03$
$\varepsilon_{Pb} = 11,16 + 1,51X_1 + 4,68X_2 + 0,53X_3 - 0,81X_4 + 0,50X_1^2 - 4,50X_2^2 - 0,72X_3^2 - 0,94X_1X_3 + 0,60X_2X_3 + 0,24X_2X_4 + 0,81X_3X_4$	$R^2 = 0,8754; S_{ad} = 6,87; F = 23,92$

Таблица 4

Регрессионный анализ данных выщелачивания активированных хвостов

Уравнение регрессии	Показатели значимости
$\varepsilon_{Zn} = 36,37 + 9,96X_1 - 11,56X_2 + 1,07X_3 - 6,53X_1^2 + 5,63X_2^2 - 1,00X_3^2 - 3,95X_4^2 - 1,21X_1X_2 - 5,79X_1X_3 - 4,16X_2X_3 - 0,74X_2X_4 - 1,15X_3X_4$	$R^2 = 0,9688; S_{ad} = 24,88; F = 102,17$
$\varepsilon_{Pb} = 29,91 + 1,1X_1 + 10,63X_2 + 6,15X_3 + 2,09X_4 - 2,41X_1^2 - 26,29X_2^2 + 3,84X_3^2 + 9,25X_4^2 + 1,21X_1X_2 - 0,72X_1X_3 + 3,21X_1X_4 + 4,81X_2X_3 + 1,08X_2X_4 - 1,00X_3X_4$	$R^2 = 0,8789; S_{ad} = 86,00; F = 10,52$

Таблица 5

Регрессионный анализ данных выщелачивания руды в дезинтеграторе

Уравнение регрессии	Показатели значимости
$\varepsilon_{Zn} = 20,40 + 4,92X_1 - 8,82X_2 + 2,55X_3 + 1,71X_4 + 1,03X_1^2 + 6,57X_2^2 - 3,84X_4^2 + 2,02X_2^4 - 2,19X_1X_2 - 2,77X_1X_3 - 2,53X_2X_3 - 1,02X_2X_4 - 0,61X_3X_4$	$R^2 = 0,9348; S_{ad} = 17,71; F = 69,49$
$\varepsilon_{Pb} = 11,10 + 0,35X_1 + 3,46X_2 + 1,35X_4 - 0,79X_1^2 - 5,061X_2^2 - 0,82X_3^2 + 0,64X_1X_2 - 0,55X_1X_3 + 0,16X_1X_4 - 1,06X_2X_3 + 1,45X_2X_4 + 1,24X_3X_4$	$R^2 = 0,9254; S_{ad} = 3,69; F = 29,06$

Таблица 6

Регрессионный анализ данных выщелачивания хвостов в дезинтеграторе

Уравнение регрессии	Показатели значимости
$\varepsilon_{Zn} = 32,15 + 11,4X_1 - 14,04X_2 + 0,68X_3 + 1,85X_4 - 2,90X_1^2 + 9,25X_2^2 - 2,53X_4^2 - 0,39X_1X_2 - 1,95X_1X_3 + 1,32X_1X_4 + 1,47X_2X_3 + 4,84X_2X_4 + 3,61X_3X_4$	$R^2 = 0,8277; S_{ad} = 143,62; F = 18,06$
$\varepsilon_{Pb} = 39,44 - 1,17X_1 + 16,76X_2 + 1,28X_3 - 0,55X_4 - 5,64X_1^2 - 14,81X_2^2 - 0,86X_3^2 - 4,09X_1X_3 - 1,42X_1X_4 - 0,42X_2X_3 - 1,00X_2X_4 - 0,82X_3X_4$	$R^2 = 0,9483; S_{ad} = 35,09; F = 44,58$

Таблица 7

Регрессионный анализ данных выщелачивания руды после дезинтеграции

Уравнение регрессии	Показатели значимости
$\varepsilon_{Zn} = 29,66 + 6,94X_1 - 8,41X_2 + 3,6X_3 + 1,65X_4 - 11,17X_1^2 - 3,29X_2^2 + 1,78X_3^2 - 3,43X_1X_2 - 1,65X_1X_3 - 1,58X_1X_4 - 0,75X_2X_3 - 1,08X_3X_4$	$R^2 = 0,8254; S_{ad} = 65,40; F = 28,84$
$\varepsilon_{Pb} = 15,40 + 1,64X_1 + 7,47X_2 + 2,28X_3 + 1,78X_4 - 1,66X_1^2 - 6,80X_2^2 + 1,50X_3^2 + 1,63X_1X_2 - 1,60X_1X_3 + 0,23X_1X_4 + 1,08X_2X_3 + 1,9X_2X_4 + 0,66X_3X_4$	$R^2 = 0,9321; S_{ad} = 11,62; F = 25,08$

Таблица 8

Регрессионный анализ данных выщелачивания хвостов после дезинтеграции

Уравнение регрессии	Показатели значимости
$\varepsilon_{Zn} = 37,54 + 8,39X_1 - 20,02X_2 + 3,33X_3 - 6,72X_1^2 - 6,54X_2^2 - 1,93X_4^2 - 0,95X_1X_3 - 1,34X_1X_4 - 4,79X_2X_3 + 1,66X_2X_4 + 1,05X_3X_4$	$R^2 = 0,9484; S_{ad} = 56,50; F = 47,63$
$\varepsilon_{Pb} = 32,93 + 3,63X_1 + 17,87X_2 + 3,58X_3 - 4,81X_1^2 - 7,32X_2^2 - 1,49X_3^2 + 4,77X_1X_2 - 1,45X_1X_3 - 1,3X_1X_4 + 1,33X_2X_3 - 0,73X_3X_4$	$R^2 = 0,9535; S_{ad} = 29,69; F = 55,26$

Таблица 9

Регрессионный анализ данных неоднократной активации руды	
Уравнение регрессии	Показатели значимости
$\varepsilon_{zn} = 33,52 + 5,04X_1 - 3,42X_2 + 3,15X_3 - 10,55X_1^2 + 15,37X_2^2 - 4,08X_3^2 - 2,39X_4^2 - 2,01X_1X_2 - 2,67X_1X_3 + 3,63X_2X_3 + 6,90X_2X_4 + 3,05X_3X_4$	$R^2 = 0,8000; S_{ad} = 65,74; F = 32,66$
$\varepsilon_{pb} = 15,28 + 0,47X_1 + 3,75X_2 + 3,91X_3 + 1,43X_4 - 3,14X_1^2 - 3,46X_2^2 + 1,03X_3^2 - 1,41X_4^2 + 0,54X_1X_2 - 0,52X_1X_3 - 0,29X_1X_4 - 1,73X_2X_4 + 3,46X_3X_4$	$R^2 = 0,9795; S_{ad} = 2,08; F = 117,40$

Таблица 10

Регрессионный анализ экспериментальных данных неоднократной активации хвостов	
Уравнение регрессии	Показатели значимости
$-\varepsilon_{zn} = 38,15 + 10,66X_1 - 15,17X_2 + 2,42X_3 - 1,37X_4 - 6,10X_1^2 + 3,92X_2^2 - 2,99X_3^2 - 1,68X_4^2 - 4,85X_1X_2 - 4,62X_1X_3 + 2,1X_1X_4 - 3,56X_2X_3 + 1,95X_2X_4 + 1,6X_3X_4$	$R^2 = 0,9206; S_{ad} = 73,40; F = 30,72$
$\varepsilon_{pb} = 40,94 + 16,12X_2 + 4,13X_3 + 0,66X_4 - 6,36X_1^2 - 17,44X_2^2 + 3,58X_3^2 - 1,36X_4^2 + 4,04X_1X_2 - 1,32X_1X_3 + 2,47X_2X_3 - 2,00X_2X_4 - 0,72X_3X_4$	$R^2 = 0,9535; S_{ad} = 29,69; F = 55,26$

Активация сырья в дезинтеграторе одновременно с выщелачиванием по сравнению с вариантом отдельной активации и выщелачивания увеличивает извлечение на величину в первые проценты в течение на 2 порядка меньшего времени.

На основании полученных регрессионных уравнений разработана универсальная модель извлечения металла из руд, учитывающая особенности выщелачивания металлов из минерального сырья на различных этапах [13-16].

Учет этапов выщелачивания металлов выполняется с помощью переменной «n»:

значению $n=1$ соответствует этап агитационного выщелачивания в перколяторе;

значению $n=2$ соответствует агитационное выщелачивание в перколяторе предварительно активированных в сухом состоянии в дезинтеграторе минералов;

значению $n=3$ соответствует выщелачивание минералов реагентами в дезинтеграторе;

$n=4$ соответствует агитационное выщелачивание активированных в рабочей камере дезинтегратора минералов реагентами в одну стадию;

$n=5$ соответствует выщелачивание активированных в рабочей камере дезинтегратора минералов реагентами в несколько стадий.

Учет вариантов выщелачивания металлов описывается с помощью переменной «m»:

значению $m=1$ соответствует модель выщелачивания цинка из руды;

значению $m=2$ соответствует модель выщелачивания свинца из руды;

значению $m=3$ соответствует модель выщелачивания цинка из хвостов;

значению $m=4$ соответствует модель выщелачивания свинца из хвостов.

Расчеты регрессионных моделей проведены в среде Maple 9.5, причем уравнения регрессий, рассчитанные на основе экспериментальных данных, получаются из общей модели при соответствующих значениях «m» и «n».

I. Используя регрессионные модели выщелачивания из руды цинка ($m=1$), объединим все пять этапов выщелачивания в единую модель. В одну модель объединяются уравнения регрессий по цинку, рассчитанные на основе экспериментальных данных ($n=1$)-($n=5$).

На каждом из этапов регрессионные модели имеют вид

$$\varepsilon_{zn} = \varepsilon(n;1) = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3 + a_4 \cdot X_4 + a_5 \cdot X_1^2 + a_6 \cdot X_2^2 + a_7 \cdot X_3^2 + a_8 \cdot X_4^2 + a_9 \cdot X_1X_2 + a_{10} \cdot X_1X_3 + a_{11} \cdot X_1X_4 + a_{12} \cdot X_2X_3 + a_{13} \cdot X_2X_4 + a_{14} \cdot X_3X_4, \quad (1)$$

где $a_k = a_k(n;1)$; $k=0,1,\dots,14$; $n=1,2,\dots,5$ конкретные числа из таблиц при заданных значениях k и n . Например, для первой модели выщелачивания из руды цинка ($m=1$) при $k=0$ и $n=1$ коэффициент $a_0 = a_0(1;1) = 39,02$ (равен свободному члену из табл. 1), аналогично $a_1 = a_1(1;1) = 5,51$ - это коэффициент при X_1 , и т.д.

Значение a_k - это k -й коэффициент в уравнении регрессии, $k=1,2,\dots,14$.

Значение n указывает на номер этапа исследований, например, при $n=1$ рассматривается этап агитационного выщелачивания в перколяторе, и т.д.

Значение m означает номер модели выщелачивания цинка или свинца, из руды, или хвостов. При $m=1$ рассматривается модель выщелачивания цинка из руды и т. д. Рассуждения в последующих моделях ($m=2, 3, 4$) повторяются по той же схеме.

Значения $a_k = a_k(m;n)$; $k=0,1,\dots,14$; $n=1,2,\dots,5$; $m=1,2,\dots,4$ описывают все коэффициенты регрессий рассматриваемой общей модели.

Так как модель (1) является линейной относительно параметров a_k то для нахождения единой модели достаточно найти значения коэффициентов a_k . Формулы для коэффициентов a_k строятся с помощью интерполяционного полинома Лагранжа:

$$a_k(n;1) = \frac{(n-2)(n-3)(n-4)(n-5)}{4!} a_k(n;1) - \frac{(n-1)(n-3)(n-4)(n-5)}{3!} a_k(2;1) + \frac{(n-1)(n-2)(n-4)(n-5)}{2! \cdot 2!} a_k(3;1) - \frac{(n-1)(n-2)(n-3)(n-5)}{3!} a_k(4;1) + \frac{(n-1)(n-2)(n-3)(n-4)}{4!} a_k(5;1), \quad (2)$$

где $4!$ - четыре факториал- сокращенная запись произведения чисел од единицы до четырех.

Коэффициенты $a_k(1;1), \dots, a_k(5;1)$, $k=0,1, \dots, 14$ определяются из уравнений регрессии, рассчитанных для эксперимента.

Рассчитанное в Maple регрессионное уравнение определяет процент выщелачивания из руды цинка ($m=1$) и имеет вид (1), где коэффициенты $a_k = a_k(n;1)$; $k=0,1, \dots, 14$ определяются по формулам

- 1) $a_0(n;1) = 14,37 + 65,24 \cdot n - 54,34 \cdot n^2 + 15,087 \cdot n^3 - 1,335 \cdot n^4$;
- 2) $a_1(n;1) = 19,09 - 21,31 \cdot n + 8,964 \cdot n^2 - 1,284 \cdot n^3 + 0,046 \cdot n^4$;
- 3) $a_2(n;1) = -32,42 + 35,221 \cdot n - 16,861 \cdot n^2 + 3,164 \cdot n^3 - 0,194 \cdot n^4$;
- 4) $a_3(n;1) = -9,45 + 30,158 \cdot n - 19,5 \cdot n^2 + 4,793 \cdot n^3 - 0,4 \cdot n^4$;
- 5) $a_4(n;1) = -7,4 + 15,984 \cdot n - 9,107 \cdot n^2 + 2,131 \cdot n^3 - 0,178 \cdot n^4$;
- 6) $a_5(n;1) = 145,1 - 262,609 \cdot n + 154,969 \cdot n^2 - 36,916 \cdot n^3 + 3,036 \cdot n^4$;
- 7) $a_6(n;1) = 93,72 - 170,058 \cdot n + 108,155 \cdot n^2 - 27,808 \cdot n^3 + 2,47 \cdot n^4$;
- 8) $a_7(n;1) = -96,63 + 158,414 \cdot n - 90,85 \cdot n^2 + 21,451 \cdot n^3 - 1,775 \cdot n^4$;
- 9) $a_8(n;1) = -9,99 - 8,568 \cdot n + 12,703 \cdot n^2 - 3,873 \cdot n^3 + 0,347 \cdot n^4$;
- 10) $a_9(n;1) = -15,31 + 20,743 \cdot n - 9,617 \cdot n^2 + 1,667 \cdot n^3 - 0,093 \cdot n^4$;
- 11) $a_{10}(n;1) = -25,22 + 46,781 \cdot n - 28,385 \cdot n^2 + 6,759 \cdot n^3 - 0,555 \cdot n^4$;
- 12) $a_{11}(n;1) = -30 + 46,758 \cdot n - 22,66 \cdot n^2 + 4,327 \cdot n^3 - 0,285 \cdot n^4$;
- 13) $a_{12}(n;1) = -3,12 + 0,254 \cdot n - 0,145 \cdot n^2 - 0,004 \cdot n^3 + 0,015 \cdot n^4$;
- 14) $a_{13}(n;1) = 3,4 - 10,133 \cdot n + 7,054 \cdot n^2 - 2,007 \cdot n^3 + 0,206 \cdot n^4$;
- 15) $a_{14}(n;1) = 20,6 - 34,46 \cdot n + 19,54 \cdot n^2 - 4,67 \cdot n^3 + 0,4 \cdot n^4$.

II. Аналогично, используя регрессионные модели выщелачивания свинца из руды ($m=2$), объединим все пять этапов выщелачивания в единую модель. В одну модель объединяются уравнения регрессий по свинцу, рассчитанные на основе данных эксперимента ($n=1$), ($n=2$), ($n=3$), ($n=4$), ($n=5$).

На каждом из этапов регрессионные модели имеют вид

$$\varepsilon_{pb} = \varepsilon(n;2) = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3 + a_4 \cdot X_4 + a_5 \cdot X_1^2 + a_6 \cdot X_2^2 + a_7 \cdot X_3^2 + a_8 \cdot X_4^2 + a_9 \cdot X_1 X_2 + a_{10} \cdot X_1 X_3 + a_{11} \cdot X_1 X_4 + a_{12} \cdot X_2 X_3 + a_{13} \cdot X_2 X_4 + a_{14} \cdot X_3 X_4, \quad (4)$$

где $a_k = a_k(n;2)$; $k=0,1, \dots, 14$, $n=1,2, \dots, 5$.

Так как модель (4) является линейной относительно параметров a_k то для нахождения единой модели достаточно найти значения коэффициентов a_k . Формулы для коэффициентов a_k строятся с помощью интерполяционного полинома Лагранжа [1]

$$\begin{aligned}
a_k(n;2) = & \frac{(n-2)(n-3)(n-4)(n-5)}{4!} a_k(1;2) - \frac{(n-1)(n-3)(n-4)(n-5)}{3!} a_k(2;2) + \\
& + \frac{(n-1)(n-2)(n-4)(n-5)}{2! \cdot 2!} a_k(3;2) - \frac{(n-1)(n-2)(n-3)(n-5)}{3!} a_k(4;2) + \\
& + \frac{(n-1)(n-2)(n-3)(n-4)}{4!} a_k(5;2).
\end{aligned} \tag{5}$$

Коэффициенты $a_k(1;2), \dots, a_k(5;2)$, $k=0,1,\dots,14$ определяются из уравнений регрессии, рассчитанных для экспериментальных данных.

Рассчитанное в Maple регрессионное уравнение, определяющее процент выщелачивания из руды свинца ($m=2$) имеет вид (4), где коэффициенты $a_k=a_k(n;2)$; $k=0,1,\dots,14$ определяются по формулам

- 1) $a_0(n;2) = 16,23 + 6,573 \cdot n - 10,317 \cdot n^2 + 3,608 \cdot n^3 - 0,363 \cdot n^4$;
- 2) $a_1(n;2) = -16,43 + 32,076 \cdot n - 19,366 \cdot n^2 + 4,694 \cdot n^3 - 0,394 \cdot n^4$;
- 3) $a_2(n;2) = -14,3 + 43,698 \cdot n - 30,574 \cdot n^2 + 8,218 \cdot n^3 - 0,741 \cdot n^4$;
- 4) $a_3(n;2) = -5,69 + 15,374 \cdot n - 10,889 \cdot n^2 + 2,871 \cdot n^3 - 0,246 \cdot n^4$;
- 5) $a_4(n;2) = 14,13 - 25,653 \cdot n + 14,425 \cdot n^2 - 3,138 \cdot n^3 + 0,235 \cdot n^4$;
- 6) $a_5(n;2) = -18,74 + 28,216 \cdot n - 14,454 \cdot n^2 + 3,039 \cdot n^3 - 0,23 \cdot n^4$;
- 7) $a_6(n;2) = 10,88 - 25,38 \cdot n + 15,283 \cdot n^2 - 3,928 \cdot n^3 + 0,354 \cdot n^4$;
- 8) $a_7(n;2) = -21,22 + 33,975 \cdot n - 19,926 \cdot n^2 + 4,85 \cdot n^3 - 0,409 \cdot n^4$;
- 9) $a_8(n;2) = -8,46 + 11,61 \cdot n - 5,84 \cdot n^2 + 1,285 \cdot n^3 - 0,105 \cdot n^4$;
- 10) $a_9(n;2) = 2,54 - 1,846 \cdot n - 0,292 \cdot n^2 + 0,406 \cdot n^3 - 0,058 \cdot n^4$;
- 11) $a_{10}(n;2) = 6,93 - 15,511 \cdot n + 10,048 \cdot n^2 - 2,584 \cdot n^3 + 0,227 \cdot n^4$;
- 12) $a_{11}(n;2) = 0,16 - 0,178 \cdot n - 0,035 \cdot n^2 + 0,063 \cdot n^3 - 0,01 \cdot n^4$;
- 13) $a_{12}(n;2) = -19,75 + 39,463 \cdot n - 24,934 \cdot n^2 + 6,198 \cdot n^3 - 0,526 \cdot n^4$;
- 14) $a_{13}(n;2) = 0,87 - 1,074 \cdot n - 0,104 \cdot n^2 + 0,374 \cdot n^3 - 0,066 \cdot n^4$;
- 15) $a_{14}(n;2) = 3,31 - 8,758 \cdot n + 7,08 \cdot n^2 - 2,063 \cdot n^3 + 0,2 \cdot n^4$.

III. Результаты. Результирующую модель извлечения цинка из хвостов ($m=3$) получаем, объединив все пять этапов выщелачивания в единую модель. При этом в одну модель объединяются уравнения регрессий по цинку, рассчитанные на основе экспериментальных данных ($n=1$), ($n=2$), ($n=3$), ($n=4$), ($n=5$).

На каждом из этапов регрессионные модели имеют вид

$$\begin{aligned}
\varepsilon_{Zn} = \varepsilon(n;3) = & a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3 + a_4 \cdot X_4 + a_5 \cdot X_1^2 + a_6 \cdot X_2^2 + a_7 \cdot X_3^2 + \\
& + a_8 \cdot X_4^2 + a_9 \cdot X_1 X_2 + a_{10} \cdot X_1 X_3 + a_{11} \cdot X_1 X_4 + a_{12} \cdot X_2 X_3 + a_{13} \cdot X_2 X_4 + a_{14} \cdot X_3 X_4,
\end{aligned} \tag{7}$$

где $a_k=a_k(n;3)$; $k=0,1,\dots,14$; $n=1,2,\dots,5$.

Формулы для коэффициентов a_k из (7) строятся с помощью интерполяционного полинома Лагранжа

$$\begin{aligned}
a_k(n;3) = & \frac{(n-2)(n-3)(n-4)(n-5)}{4!} a_k(1;3) - \frac{(n-1)(n-3)(n-4)(n-5)}{3!} a_k(2;3) + \\
& + \frac{(n-1)(n-2)(n-4)(n-5)}{2! \cdot 2!} a_k(3;3) - \frac{(n-1)(n-2)(n-3)(n-5)}{3!} a_k(4;3) + \\
& + \frac{(n-1)(n-2)(n-3)(n-4)}{4!} a_k.
\end{aligned} \tag{8}$$

Коэффициенты $a_k(1;3), \dots, a_k(5;3)$, $k=0,1,\dots,14$ определяются из уравнений регрессии, рассчитанных по данным эксперимента.

Рассчитанное в Maple регрессионное уравнение, определяющее процент выщелачивания из хвостов цинка ($m=3$) имеет вид (7), где коэффициенты $a_k=a_k(n;3)$; $k=0,1,\dots,14$

- 1) $a_0(n;3) = 5 + 71,355 \cdot n - 48,278 \cdot n^2 + 12,325 \cdot n^3 - 1,052 \cdot n^4$;
- 2) $a_1(n;3) = 16,91 - 24,967 \cdot n + 19,923 \cdot n^2 - 5,623 \cdot n^3 + 0,518 \cdot n^4$;
- 3) $a_2(n;3) = -34,27 + 16,841 \cdot n + 0,51 \cdot n^2 - 2,296 \cdot n^3 + 0,335 \cdot n^4$;
- 4) $a_3(n;3) = -18,13 + 34,635 \cdot n - 21,418 \cdot n^2 + 5,375 \cdot n^3 - 0,463 \cdot n^4$;
- 5) $a_4(n;3) = 14,03 - 29,243 \cdot n + 18,83 \cdot n^2 - 4,618 \cdot n^3 + 0,38 \cdot n^4$;
- 6) $a_5(n;3) = 5,8 - 41,08 \cdot n + 31,394 \cdot n^2 - 8,46 \cdot n^3 + 0,746 \cdot n^4$;
- 7) $a_6(n;3) = 108,77 - 200,766 \cdot n + 129,628 \cdot n^2 - 33,369 \cdot n^3 + 2,927 \cdot n^4$;
- 8) $a_7(n;3) = 7,01 - 11,604 \cdot n + 5,473 \cdot n^2 - 0,921 \cdot n^3 + 0,042 \cdot n^4$;
- 9) $a_8(n;3) = 32,32 - 50,254 \cdot n + 24,593 \cdot n^2 - 4,991 \cdot n^3 + 0,362 \cdot n^4$;
- 10) $a_9(n;3) = -10,85 + 14,354 \cdot n - 8,354 \cdot n^2 + 2,226 \cdot n^3 - 0,216 \cdot n^4$;
- 11) $a_{10}(n;3) = 31,58 - 56,344 \cdot n + 28,69 \cdot n^2 - 5,701 \cdot n^3 + 0,385 \cdot n^4$;
- 12) $a_{11}(n;3) = 17,55 - 38,028 \cdot n + 25,756 \cdot n^2 - 6,773 \cdot n^3 + 0,604 \cdot n^4$;
- 13) $a_{12}(n;3) = 66,49 - 131,043 \cdot n + 80,419 \cdot n^2 - 19,532 \cdot n^3 + 1,626 \cdot n^4$;
- 14) $a_{13}(n;3) = 54,45 - 101,179 \cdot n + 61,025 \cdot n^2 - 14,476 \cdot n^3 + 1,18 \cdot n^4$;
- 15) $a_{14}(n;3) = 31,7 - 67,841 \cdot n + 43,441 \cdot n^2 - 10,634 \cdot n^3 + 0,884 \cdot n^4$.

IV. Рассмотрим модель извлечения свинца из хвостов ($m=4$), объединив все пять этапов выщелачивания в единую модель. В одну модель объединяются уравнения регрессий по свинцу, рассчитанные на основе экспериментально полученных данных ($n=1$), ($n=2$), ($n=3$), ($n=4$), ($n=5$).

На каждом из этапов регрессионные модели имеют вид

$$\varepsilon_{Pb} = \varepsilon(n;4) = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3 + a_4 \cdot X_4 + a_5 \cdot X_1^2 + a_6 \cdot X_2^2 + a_7 \cdot X_3^2 + a_8 \cdot X_4^2 + a_9 \cdot X_1 X_2 + a_{10} \cdot X_1 X_3 + a_{11} \cdot X_1 X_4 + a_{12} \cdot X_2 X_3 + a_{13} \cdot X_2 X_4 + a_{14} \cdot X_3 X_4, \quad (10)$$

где $a_k=a_k(n;4)$; $k=0,1,\dots,14$; $n=1,2,\dots,5$.

Формулы для коэффициентов a_k из (10) строятся с помощью интерполяционного полинома Лагранжа

$$a_k(n;4) = \frac{(n-2)(n-3)(n-4)(n-5)}{4!} a_k(1;4) - \frac{(n-1)(n-3)(n-4)(n-5)}{3!} a_k(2;4) + \frac{(n-1)(n-2)(n-4)(n-5)}{2! \cdot 2!} a_k(3;4) - \frac{(n-1)(n-2)(n-3)(n-5)}{3!} a_k(4;4) + \frac{(n-1)(n-2)(n-3)(n-4)}{4!} a_k(5;4). \quad (11)$$

Коэффициенты $a_k(1;4), \dots, a_k(5;4)$, $k=0,1,\dots,14$ определяются из уравнений регрессии для экспериментальных данных.

Рассчитанное в Maple регрессионное уравнение, определяющее извлечение из хвостов цинка ($m=4$) имеет вид (10), где коэффициенты $a_k=a_k(n;4)$; $k=0,1,\dots,14$

- 1) $a_0(n;4) = 183,74 - 258,448 \cdot n + 149,23 \cdot n^2 - 34,953 \cdot n^3 + 2,86 \cdot n^4$;
- 2) $a_1(n;4) = -40,85 + 79,337 \cdot n - 49,954 \cdot n^2 + 12,548 \cdot n^3 - 1,081 \cdot n^4$;
- 3) $a_2(n;4) = 72,07 - 96,957 \cdot n + 51,878 \cdot n^2 - 11,003 \cdot n^3 + 0,812 \cdot n^4$;
- 4) $a_3(n;4) = -49,07 + 95,311 \cdot n - 55,307 \cdot n^2 + 12,764 \cdot n^3 - 1,018 \cdot n^4$;

- 5) $a_4(n;4) = -21,09 + 40,654 \cdot n - 23,575 \cdot n^2 + 5,361 \cdot n^3 - 0,42 \cdot n^4;$ (12)
- 6) $a_5(n;4) = -34,06 + 56,311 \cdot n - 33,306 \cdot n^2 + 7,799 \cdot n^3 - 0,634 \cdot n^4;$
- 7) $a_6(n;4) = 37,41 - 94,224 \cdot n + 44,557 \cdot n^2 - 7,421 \cdot n^3 + 0,368 \cdot n^4;$
- 8) $a_7(n;4) = -35,97 + 62,643 \cdot n - 32,893 \cdot n^2 + 6,677 \cdot n^3 - 0,458 \cdot n^4;$
- 9) $a_8(n;4) = -82,06 + 152,648 \cdot n - 85,96 \cdot n^2 + 19,232 \cdot n^3 - 1,5 \cdot n^4;$
- 10) $a_9(n;4) = -21,31 + 48,053 \cdot n - 32,33 \cdot n^2 + 8,447 \cdot n^3 - 0,74 \cdot n^4;$
- 11) $a_{10}(n;4) = -27,77 + 54,923 \cdot n - 35,039 \cdot n^2 + 8,602 \cdot n^3 - 0,716 \cdot n^4;$
- 12) $a_{11}(n;4) = -44,3 + 77,493 \cdot n - 42,739 \cdot n^2 + 9,357 \cdot n^3 - 0,711 \cdot n^4;$
- 13) $a_{12}(n;4) = -47,83 + 91,243 \cdot n - 52,812 \cdot n^2 + 12,082 \cdot n^3 - 0,953 \cdot n^4;$
- 14) $a_{13}(n;4) = -22,8 + 42,927 \cdot n - 25,787 \cdot n^2 + 6,173 \cdot n^3 - 0,513 \cdot n^4;$
- 15) $a_{14}(n;4) = 9,93 - 14,438 \cdot n + 6,803 \cdot n^2 - 1,352 \cdot n^3 + 0,097 \cdot n^4.$

Универсальная математическая модель извлечения металла из руды для каждого значения переменной «m» регрессионная модель имеет одну и ту же линейную структуру

$$\varepsilon = \varepsilon(n; m) = a_0 + a_1 \cdot X_1 + a_2 \cdot X_2 + a_3 \cdot X_3 + a_4 \cdot X_4 + a_5 \cdot X_1^2 + a_6 \cdot X_2^2 + a_7 \cdot X_3^2 + a_8 \cdot X_4^2 + a_9 \cdot X_1 X_2 + a_{10} \cdot X_1 X_3 + a_{11} \cdot X_1 X_4 + a_{12} \cdot X_2 X_3 + a_{13} \cdot X_2 X_4 + a_{14} \cdot X_3 X_4, \quad (13)$$

здесь $a_k = a_k(n; m); k=0,1,\dots,14; n=1,2,\dots,5; m=1,2,3,4.$

Коэффициенты $a_k = a_k(n; m)$ определяются через $a_k(n; 1), a_k(n; 2), a_k(n; 3), a_k(m; 4)$ с помощью интерполяционного полинома Лагранжа

$$a_k(n; m) = -\frac{(m-2)(m-3)(m-4)}{3!} a_k(n; 1) + \frac{(m-1)(m-3)(m-4)}{2!} a_k(n; 2) - \frac{(m-1)(m-2)(m-4)}{2!} a_k(n; 3) + \frac{(m-1)(m-2)(m-3)}{3!} a_k(n; 4), \quad (14)$$

где коэффициенты $a_k(n; 1), a_k(n; 2), a_k(n; 3), a_k(m; 4)$ определяются по формулам (3), (6), (9), (12).

Из формул (3), (6), (9), (12) при подходящих значениях «n» может быть получено каждое из относящихся к своему классу уравнений регрессии, описанное в таблицах.

Из формул (13,14) при соответствующих значениях «n» и «m» может быть получено любое описанное в таблицах уравнение регрессии. Уравнение (13) с коэффициентами (14) описывает универсальную модель извлечения металла из руды.

Из моделей (13,14) можно получать различные осредненные по некоторым параметрам зависимости, характеризующие остальные (не осредненные) параметры извлечения металлов.

Универсальная модель и составленная на ее основе программа моделирования имеет практическое значение, позволяя механизировать расчет параметров механохимических технологий [17-20].

Годовая прибыль от переработки хвостов обогащения определяется решением модели

$$\Pi_x = \frac{\sum_1^{n_0} (C_{TO} - 3_{oo} - 3_{oM}) \cdot Q_0}{t_o} + C_{ш}^o + \frac{\sum_1^{n_M} (C_{TM} - 3_{oM} - 3_{MM}) \cdot Q_M}{t_M} + C_{ш}^M$$

где Π_x - годовая прибыль от переработки хвостов, руб./т; $C_{то}$ - стоимость реализации продукции переработки хвостов обогащения, руб./т; 3_{oo} - затраты на обогащение хвостов обогащения, руб./т; 3_{oM} - затраты на металлургический передел хвостов обогащения, руб./т; n_0 - количество извлекаемых компонентов из хвостов обогащения; Q_0 - масса хвостов обогащения, т; t_0 - время переработки хвостов обогащения, год; $C_{ш}^o$ - штрафы за хранение хвостов обогащения, руб./год; $C_{тм}$ - стоимость реализации продуктов переработки хвостов металлургии, руб./т; 3_{oM} - затраты на обогащение хвостов металлургии, руб./т; 3_{mM} - затраты на металлургию хвостов металлургии, руб./т; n_M - количество извлекаемых компонентов из хвостов металлургии; Q_M - масса хвостов

металлургии, т; t_m - время переработки хвостов металлургии, лет; $C_{ш}^m$ - штрафы за хранение хвостов металлургии, руб./год.

Выводы. 1. Метод химического обогащения и механической активации в дезинтеграторе описывается универсальной математической моделью комбинированной технологии.

2. Методика экспериментального выщелачивания свинца и цинка из хвостов обогащения в дезинтеграторе включает математическое осмысление инновационного процесса с обоснованием основы механизации расчетов параметров механохимических технологий.

3. Возможность радикальной утилизации отходов добычи и переработки металлосодержащего минерального сырья открывает возможность освоения техногенной минеральной базы, параметры и эффективность освоения которой могут быть определены решением предложенной универсальной математической модели.

4. Перспективы дальнейшего развития работ в этом направлении включают совершенствование конструкции дезинтегратора и решение связанных с использованием продуктов дезинтеграции проблем.

Список литературы

1. Исмаилов Т.Т., Голик В.И., Дольников Е.Б. Специальные способы разработки месторождений полезных ископаемых. – М.: МГГУ, 2006. – 331 с.
2. Golik V., Komashchenko V., Morkun V. Innovative technologies of metal extraction from the ore processing mill tailings and their integrated use//Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – №3. – P. 49– 52 .
3. Голик В.И. Специальные способы разработки месторождений. –М.: Инфра-М, 2014. –132 с.
4. Golik V.I., Razorenov Y.I., Polukhin O.N. Metal extraction from ore beneficiation codas by means of lixiviation in a disintegrator // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. –Т. 10. –№ 17. –С. 38105-38109.
5. Голик В.И. Природоохранные технологии разработки рудных месторождений . –М.: Инфра-М, 2014. –192 с.
6. Голик В.И., Пагиев К.Х., Габараев О.З. Энергосберегающие технологии добычи руд. –Владикавказ, Рухс. –1995. –375 с.
7. Вагин В.С., Голик В.И. Проблемы использования природных ресурсов южного федерального округа. –Владикавказ, Проект-пресс. –2005. – 192 с.
8. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Страданченко С.Г., Прокопов А.Ю., Масленников С.А. Экспериментальное обоснование возможности извлечения металлов из хвостов обогащения угля // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2012. – № 5. –С. 128-134.
9. Golik V.I., Khasheva Z.M., Shulgatyi L.P. Economical efficiency of utilization of allied mining enterprises waste // The Social Sciences (Pakistan). –2015. –Т. 10. – № 6. –Pp. 750-754.
10. Golik V.I., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Experimental study of non-waste recycling tailings ferruginous quartzite // International Journal of Applied Engineering Research. – 2015. –Т. 10. – № 15. – С. 35410-35416.
11. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Khasheva Z. The effectiveness of combining the stages of ore fields development // Metallurgical and Mining Industry. –2015. –Т. 7. –№ 5. –С. 401-405.
12. Polukhin O.N., Komashchenko V.I., Golik V.I., Drebenstedt C. Substantiating the possibility and expediency of the ore beneficiation tailings usage in solidifying mixtures production// Scientific Reports on Resource Issues Innovations in Mineral Resource Value Chains: Geology, Mining, Processing, Economics, Safety, and Environmental Management. – Freiberg. – 2014. –С. 402-412.
13. Голик В.И., Исмаилов Т.Т., Мицик М.Ф. Универсальная модель выщелачивания металлов из некондиционного сырья с механохимической активацией.// Горный информационно-аналитический бюллетень. – М. – 2011. – №10. – С.233-241.
14. Golik Vladimir, Komashchenko Vitaly, Morkun Vladimir, Burdzieva Olga. Metal extraction in the case of non-waste disposal of enrichment tailings//Metallurgical and Mining Industry. –No.10 – 2015. – P.213-217.
15. Голик В.И., Разоренов Ю.И. Проектирование горных предприятий. – Новочеркасск, ЮРГТУ. –2007– 262 с.
16. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Efremenkov A.B. Recycling of metal ore mill tailings // Applied Mechanics and Materials. – 2014. –Т. 682. –С. 363-368.
17. Разоренов Ю.И., Голик В.И., Куликов М.М. Экономика и менеджмент горной промышленности. – Новочеркасск, ЮРГТУ. –2010. –251 с.
18. Разоренов Ю.И., Голик В.И. Проблемы глубокой утилизации отходов переработки угля // Маркшейдерия и недропользование. – 2013. – № 4 (66). – С. 52-54.
19. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Страданченко С.Г., Прокопов А.Ю., Масленников С.А. Экспериментальное обоснование возможности извлечения металлов из хвостов обогащения угля.// Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2012. – № 5. – С. 128-134.
20. V. Golik, V. Komashchenko, V. Morkun. The economic efficiency of ore fields development technology combination//Metallurgical and Mining Industry. – 2016. – No4. – P.11– 114.

Рукопись поступила в редакцию 19.03.17