



Оригинальная статья

УДК 504.55.054:622(470.6)

DOI 10.17073/0368-0797-2021-4-282-291



МЕХАНОХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЖЕЛЕЗА ИЗ ХВОСТОВ ОБОГАЩЕНИЯ

В. И. Голик¹, Ю. В. Дмитрак¹, Ю. И. Разоренов²,
С. А. Масленников³, В. И. Ляшенко⁴

¹ Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), СКГМИ (ГТУ) (Россия, 362021, Владикавказ (РСО-Алания), ул. Николаева, 44)

² Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова (Россия, 346428, Ростовская обл., Новочеркасск, ул. Просвещения, 132)

³ Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) Донского государственного технического университета (Россия, 346500, Ростовская обл., Шахты, ул. Шевченко, 147)

⁴ Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии (Украина, 52204, Днепропетровская обл., Желтые Воды, Бульвар Свободы, 37)

Аннотация. Описываются результаты исследований по переработке отходов обогащения руд на предприятиях Курской магнитной аномалии (складировано около 1,8 млрд т) с получением металлов и строительных материалов. Существенной особенностью формирования отложенных хвостов обогащения является раскладка хвостов по крупности и удельному весу в водном потоке, поскольку транспортировка хвостов от обогатительной фабрики в хвостохранилище производится гидротранспортом. Представлена характеристика хвостов мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов Лебединского месторождения и методика исследований с использованием лабораторного дезинтегратора DESI-11 (Таллин, Эстония). Применен комплексный метод исследования, включающий системный анализ и научное обобщение, обработку данных с использованием методов статистики и теории вероятности, а также математическое моделирование. Систематизированы результаты выщелачивания хвостов: агитационного в перколяторе, агитационного после активации в дезинтеграторе в сухом состоянии и реагентного выщелачивания в дезинтеграторе. Выполнен регрессионный анализ экспериментальных данных, на основании которого построены графики зависимости извлечения железа от значений переменных факторов процесса. Установлено, что применяемые технологии обогащения ограничены пределом извлечения, результатом которого являются хвосты переработки. Использование хвостов традиционными технологиями экономически не эффективно, а модернизация процессов обогащения целесообразна путем применения гидрометаллургической и химической технологии. Показано, что перспективным направлением извлечения металлов из отходов горной промышленности является комбинирование технологий переработки на основе сочетания возможностей одновременно химического обогащения и активации в дезинтеграторе. Определено, что механохимическая активация хвостов обогащения в дезинтеграторе одновременно с выщелачиванием позволяет существенно увеличить извлечение при том, что время переработки сокращается на два порядка. Рекомендуемая технология может быть востребована на предприятиях различных отраслей промышленности при перспективе перехода к подземной добыче.

Ключевые слова: железистые кварциты, хвосты обогащения, металл, магнитная сепарация, исследование, дезинтегратор

Для цитирования: Голик В.И., Дмитрак Ю.В., Разоренов Ю.И., Масленников С.А., Ляшенко В.И. Механохимическая технология извлечения железа из хвостов обогащения // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 4. С. 282–291.

<https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-282-291>

Original article

MECHANOCHEMICAL TECHNOLOGY OF IRON EXTRACTION FROM ENRICHMENT TAILINGS

V. I. Golik¹, Yu. V. Dmitrak¹, Yu. I. Razorenov²,
S. A. Maslennikov³, V. I. Lyashenko⁴

¹ North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University) (44 Nikolaeva Str., Vladikavkaz, Republic of North Ossetia – Alania 362021, Russian Federation)

² Platov South-Russian State Polytechnic University (132 Prosveshcheniya Str., Novocherkassk, Rostov Region 346428, Russian Federation)

³ Institute of Service and Entrepreneurship (branch) of the Don State Technical University (147 Shevchenko Str., Shakhty, Rostov Region 346500, Russian Federation)

⁴ Ukrainian Research and Design Institute of Industrial Technology (37 Svobody Blvd., Zhovti Vody, Dnipropetrovsk Region 52204, Ukraine)

Abstract. The article describes the results of studies on ore dressing waste processing at the enterprises of the Kursk Magnetic Anomaly with production of metals and building materials. About 1.8 billion tons of tailings were stored there. Significant feature of deposits formation is division of tailings by

size and specific gravity in water stream, since tailings are transported from the enrichment plant to the tailing dams by hydrotransport. Characteristics of the tailings from wet magnetic research method was applied, including system analysis and scientific generalization, data processing using methods of statistics, probability theory and mathematical modeling. The authors have systematized the results of tailings leaching of following types: agitation leaching in percolator, agitation leaching after activation in disintegrator in the dry state and reagent leaching in disintegrator. Regression analysis of experimental data have been carried out, on the basis of which graphs of dependence of iron extraction on the values of variable process factors were constructed. The used enrichment technologies are limited by extraction limit, which results in processing tailings. The use of these tailings by traditional technologies is not economically efficient, and upgrading of enrichment processes is advisable using hydrometallurgical and chemical technologies. Promising direction in metals extraction from mining waste is combination of processing technologies based on possibilities of both chemical enrichment and activation in disintegrator. It was determined that mechanochemical activation of tailings in disintegrator simultaneously with leaching can significantly increase extraction while the processing time is reduced hundredfold. Recommended technology may be in demand at mining enterprises with the prospect of transition to underground mining.

Keywords: ferruginous quartzites, tailings, metal, magnetic separation, research, disintegrator

For citation: Golik V.I., Dmitrak Yu.V., Razorenov Yu.I., Maslennikov S.A., Lyashenko V.I. Mechanochemical technology of iron extraction from enrichment tailings. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 4, pp. 282–291. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-4-282-291>

ВВЕДЕНИЕ

В работах И.Н. Масленицкого, Л.И. Калабина, И.А. Остроушко, В.Я. Мостович и других представлена оценка традиционных методов магнитного, гравитационного и электрохимического обогащения руд и новых методов гидрометаллургии и выщелачивания [1, 2]. Проблемы разработки месторождений Курской магнитной аномалии исследовали В.К. Кушнеренко, В.Н. Анисимов, Е.А. Котенко и другие [3, 4].

Возможности традиционных технологий обогащения ограничены использованием в процессах обогащения преимущественно механической энергии. Модернизация традиционных обогатительных процессов осуществляется путем привлечения иных видов энергии [5, 6]. Альтернативу традиционным технологиям составляют геотехнологические способы обогащения, недостатком которых является продолжительность проникновения раствора в минерал. Перспективно сочетание возможностей химического обогащения и механоактивации в дезинтеграторах [7, 8]. Настоящая работа является продолжением исследований, основные научные и практические результаты которых наиболее полно приведены в работах [9, 10].

Целью настоящей работы является создание технологических основ для разработки эффективной технологии утилизации хвостов горно-обогатительной переработки с получением металлов и компонентов для последующего приготовления твердеющих смесей.

Для исследования были поставлены следующие задачи:

- выполнить математическое и физическое моделирование, а также расчет эффективности извлечения металлов из хвостов обогащения;
- дать оценку результатам агитационного выщелачивания, при котором пульпу из минералов и раствора перемешивали для исключения застойных зон;
- рекомендовать технические средства для использования механохимической технологии извлечения железа из хвостов обогащения.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Комплексный метод исследования включает в себя системный анализ и научное обобщение литературных данных, лабораторный эксперимент, обработку массива данных с использованием методов статистики и теории вероятности, а также математическое моделирование. Основу исследования составляет многофакторный эксперимент с выщелачиванием железа из хвостов обогащения железистых кварцитов Лебединского месторождения [11, 12].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Хвосты обогащения мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов содержат 40 – 80 % фракции менее 0,076 мм при средневзвешенном диам. 0,06 – 0,11 мм и представлены кварцем, магнетитом, гематитом, карбонатами, слюдами, пиритом, ильменитом, силикатами, полевым шпатом и другими минералами. Проба хвостов обогащения для исследования была отобрана в отвале четвертого хранилища Лебединского ГОК [13, 14]. Химический состав пробы хвостов следующий: 64,0 % SiO_2 ; 8,0 % Fe; 5,2 % Al_2O_3 ; 3,2 % Mn; 0,7 % K_2O ; 0,1 % P; 0,8 % Ca; 0,2 % MgO; $5 \cdot 10^{-3}$ % Cu; $4 \cdot 10^{-3}$ % Ni; $5 \cdot 10^{-4}$ % Zn; примерно $(30 \div 50) \cdot 10^{-5}$ % As, Ba, Be, Bi, Co, Cr, Li, Mo, Nb, Pb, Sb, Sn, Sr, Ti, V, Y.

В качестве базы для оценки эффективности извлечения металлов из хвостов обогащения использовали результаты агитационного выщелачивания, при котором пульпу из минералов и раствора перемешивали для исключения застойных зон. Эксперименты осуществляли с использованием лабораторного дезинтегратора DESI-11 (Таллин, Эстония), изготовленного по специальному заказу. Хвосты обогащения измельчали до размеров 2 мм при температуре 60 °С в течение 12 – 24 ч с понижением влажности до 2 %. Результаты агитационного выщелачивания представлены в табл. 1.

Эксперименты осуществлены с использованием математического планирования по плану Венкена – Бокса. Предварительно подготовленный выщелачивающий раствор заданного состава смешивали с хвостами на

Т а б л и ц а 1

Матрица планирования и результаты эксперимента

Table 1. Planning matrix and experiment results

Проба	Содержание в растворе, г/л		Соотношение Ж:Т	Время выщелачивания, ч	Извлечение железа в раствор, %
	H ₂ SO ₄	NaCl			
1	2 (–1)	20 (–1)	4 (–1)	0,250 (–1)	0,40
2	10 (1)	20 (–1)	4 (–1)	0,250 (–1)	3,08
3	2 (–1)	160 (1)	4 (–1)	0,250 (–1)	1,56
4	10 (1)	160 (1)	4 (–1)	0,250 (–1)	3,76
5	2 (–1)	20 (–1)	10 (1)	0,250 (–1)	0,84
6	10 (1)	20 (–1)	10 (1)	0,250 (–1)	3,72
7	2 (–1)	160 (1)	10 (1)	0,250 (–1)	1,84
8	10 (1)	160 (1)	10 (1)	0,250 (–1)	4,35
9	2 (–1)	20 (–1)	4 (–1)	1 (1)	0,45
10	10 (1)	20 (–1)	4 (–1)	1 (1)	3,48
11	2 (–1)	160 (1)	4 (–1)	1 (1)	1,77
12	10 (1)	160 (1)	4 (–1)	1 (1)	4,18
13	2 (–1)	20 (–1)	10 (1)	1 (1)	1,17
14	10 (1)	20 (–1)	10 (1)	1 (1)	3,93
15	2 (–1)	160 (1)	10 (1)	1 (1)	2,55
16	10 (1)	160 (1)	10 (1)	1 (1)	4,75
17	2 (–1)	90 (0)	7 (0)	0,625 (0)	1,64
18	10 (1)	90 (0)	7 (0)	0,625 (0)	3,13
19	6 (0)	20 (–1)	7(0)	0,625 (0)	2,27
20	6 (0)	160 (1)	7 (0)	0,625 (0)	2,58
21	6 (0)	90 (0)	4 (–1)	0,625 (0)	1,53
22	6 (0)	90 (0)	10 (1)	0,625 (0)	2,01
23	6 (0)	90 (0)	7 (0)	0,250 (–1)	2,10
24	6 (0)	90 (0)	7 (0)	1 (1)	2,54

Пр и м е ч а н и е. В скобках указаны уровни варьирования независимых переменных: –1, 0, 1.

первом этапе непосредственно перед агитационным выщелачиванием, на втором – после активации выщелачиваемого материала в дезинтеграторе, а на остальных этапах – перед подачей в дезинтегратор [15, 16].

На первом и втором этапах агитационного выщелачивания хвосты с раствором в виде пульпы, полученной добавлением в выщелачивающий раствор активированного материала, или пульпы, полученной при пропускании хвостов с раствором через дезинтегратор, проводили заданное время в агитаторе с постоянной и одинаковой скоростью вращения. На третьем этапе полученную добавление в выщелачивающий раствор хвостов или руды смесь загружали в камеру дезинтегратора. На четвертом этапе аналогично смесь также загружали в рабочую камеру дезинтегратора, после чего выщелачивали заданное время в агитаторе с пос-

тоянной и одинаковой скоростью вращения. На пятом этапе смесь исходных материалов с выщелачивающим раствором пропускали через дезинтегратор заданное количество раз, за счет чего увеличивали время активации [17, 18].

После завершения выщелачивания в экспериментах любого этапа полученную пульпу направляли на исследование качественного состава. В каждом опыте исследовали пять партий хвостов. По каждому виду хвостов переработано по 0,05 т просеянных через сито 2,0 мм хвостов обогащения. Базовое перколяторное выщелачивание осуществляли до достижения фонового содержания независимо от времени. Комбинированная активация продолжается 60 мин.

Эффективность извлечения металлов исследовали сравнением вариантов выщелачивания в перколяторе

Регрессионный анализ экспериментальных данных

Table 2. Regression analysis of experimental data

Уравнение регрессии	Переменные	Показатели и критерии значимости
<p>1. Раскрытие хвостов флотационного обогащения активацией в дезинтеграторе</p> $\varepsilon_1 = 2,095 + 1,231X_1 + 0,444X_2 + 0,275X_3 + 0,176X_4 + 0,290X_1^2 + 0,330X_2^2 - 0,325X_3^2 + 0,225X_4^2 - 0,127X_1X_2 + 0,047X_2X_3 + 0,036X_3X_4$	$X_1 = \frac{C_{H_2SO_4} - 6}{4}; X_2 = \frac{C_{NaCl} - 90}{70};$ $X_3 = \frac{(Ж : Т) - 7}{3}; X_4 = \frac{t - 0,625}{0,375}$	$R^2 = 0,9770;$ $S_{ad} = 0,0673;$ $F = 225,99$
<p>2. Агитационное выщелачивание активированных в дезинтеграторе в сухом состоянии хвостов</p> $\varepsilon_2 = 2,447 + 1,736X_1 + 0,714X_2 + 0,48X_3 + 0,372X_4 + 0,655X_1^2 + 0,705X_2^2 - 0,27X_3^2 + 0,142X_1X_3 + 0,147X_1X_4 + 0,136X_2X_3 + 0,198X_2X_4 + 0,184X_3X_4$	$X_1 = \frac{C_{H_2SO_4} - 6}{4}; X_2 = \frac{C_{NaCl} - 90}{70};$ $X_3 = \frac{t - 0,625}{0,375}; X_4 = \frac{f - 125}{75}$	$R^2 = 0,9540;$ $S_{ad} = 0,3393;$ $F = 75,47$
<p>3. Выщелачивание хвостов в дезинтеграторе</p> $\varepsilon_3 = 3,091 + 2,381X_1 + 1,015X_2 + 0,698X_3 + 0,583X_4 + 1,034X_1^2 + 1,104X_2^2 - 0,276X_3^2 - 0,176X_4^2 + 0,259X_1X_3 - 0,268X_1X_4 + 0,255X_2X_3 + 0,339X_2X_4 + 0,315X_3X_4$	$X_3 = \frac{t - 0,625}{0,375}; X_4 = \frac{f - 125}{75}$	$R^2 = 0,9384;$ $S_{ad} = 1,0111;$ $F = 43,03$

и в дезинтеграторе в течение 60 мин. По результатам опытов устанавливали, как активация хвостов обогащения повышает извлечение металлов из хвостов. Результаты опытов интерпретировали в форме логарифмической или полиномиальной интерполяции. Процесс раскрытия хвостов флотационного обогащения активацией в дезинтеграторе описывали математически [19, 20].

Регрессионный анализ экспериментальных данных приведен в табл. 2 (где $X_1 = 2 \div 10$ г/л – содержание серной кислоты в выщелачивающем растворе; $X_2 = 20 \div 160$ г/л – содержание хлорида натрия в выщелачивающем растворе; X_3 – весовое соотношение массы (4 ÷ 10) выщелачивающего раствора и выщелачиваемой массы (50 г) в единичном эксперименте; $X_4 = 0,15 \div 1,00$ ч – время выщелачивания (t); ε – случайная ошибка; R_2 – коэффициент детерминации; S_{ad} – точность определения оценок коэффициентов регрессии; F – коэффициент детерминации).

На основе анализа регрессионной зависимости построен график изменения извлечения металла от содержания реагентов. Факторы «соотношение Ж:Т» и «скорость вращения роторов дезинтегратора» при этом устанавливаются на нулевом уровне. График изменения извлечения металла от продолжительности выщелачивания и «соотношения Ж:Т» при нулевом уровне факторов скорости вращения дисков дезинтегратора, содержания серной кислоты и соли представлен на рис. 1.

Результаты агитационного выщелачивания активированных в дезинтеграторе в сухом состоянии хвостов сведены в табл. 3. На основании полученной регрессионной зависимости построен график изменения из-

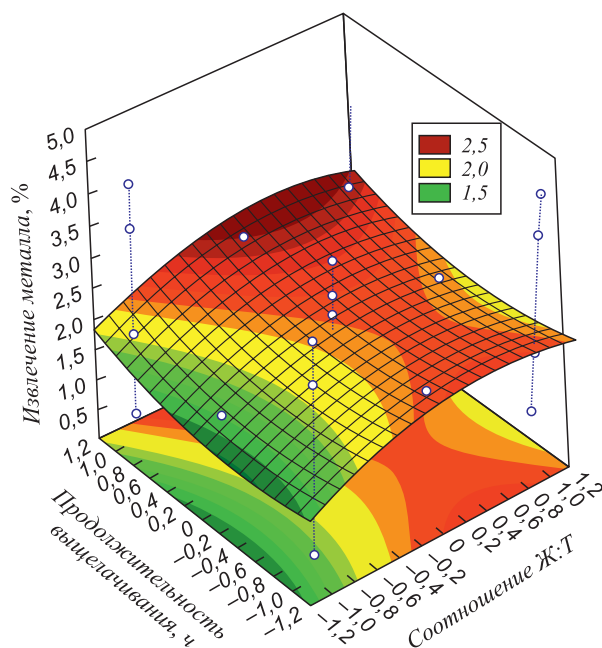


Рис. 1. Зависимости извлечения металла от продолжительности выщелачивания и соотношения Ж:Т

Fig. 1. Dependence of metal extraction on leaching duration and W:T ratio

Матрица планирования и результаты эксперимента при выщелачивании активированных в сухом состоянии хвостов

Table 3. Planning matrix and experiment results at leaching of dry activated tailings

Проба	Содержание в растворе, г/л		Соотношение Ж:Т	Время выщелачивания, ч	Извлечение железа в раствор, %
	H ₂ SO ₄	NaCl			
1	2 (–1)	20 (–1)	0,250 (–1)	50 (–1)	0,40
2	10 (1)	20 (–1)	0,250 (–1)	50 (–1)	4,00
3	2 (–1)	160 (1)	0,250 (–1)	50 (–1)	2,03
4	10 (1)	160 (1)	0,250 (–1)	50 (–1)	4,89
5	2 (–1)	20 (–1)	1 (1)	50 (–1)	1,09
6	10 (1)	20 (–1)	1 (1)	50 (–1)	4,84
7	2 (–1)	160 (1)	1 (1)	50 (–1)	2,39
8	10 (1)	160 (1)	1 (1)	50 (–1)	5,66
9	2 (–1)	20 (–1)	0,250 (–1)	200 (1)	0,59
10	10 (1)	20 (–1)	0,250 (–1)	200 (1)	4,52
11	2 (–1)	160 (1)	0,250 (–1)	200 (1)	2,30
12	10 (1)	160 (1)	0,250 (–1)	200 (1)	5,43
13	2 (–1)	20 (–1)	1 (1)	200 (1)	1,52
14	10 (1)	20 (–1)	1 (1)	200 (1)	5,11
15	2 (–1)	160 (1)	1 (1)	200 (1)	3,32
16	10 (1)	160 (1)	1 (1)	200 (1)	8,50
17	2 (–1)	90 (0)	0,625 (0)	125 (0)	2,13
18	10 (1)	90 (0)	0,625 (0)	125 (0)	4,07
19	6 (0)	20 (–1)	0,625 (0)	125 (0)	2,95
20	6 (0)	160 (1)	0,625 (0)	125 (0)	3,35
21	6 (0)	90 (0)	0,250 (–1)	125 (0)	1,99
22	6 (0)	90 (0)	1 (1)	125 (0)	2,36
23	6 (0)	90 (0)	0,625 (0)	50 (–1)	2,10
24	6 (0)	90 (0)	0,625 (0)	200 (1)	2,80

Пр и м е ч а н и е. В скобках указаны уровни варьирования независимых переменных: –1, 0, 1.

влечения металла от содержания реагентов. Факторы «соотношение Ж:Т» и «скорость вращения роторов дезинтегратора» установлены на нулевом уровне.

Графики изменения зависимости извлечения металла от содержания хлорида натрия и серной кислоты при нулевом уровне факторов скорости вращения дисков дезинтегратора, продолжительности выщелачивания и «соотношения Ж:Т» представлены на рис. 2 и от содержания хлорида натрия и скорости вращения дисков дезинтегратора – на рис. 3.

Результаты выщелачивания хвостов в дезинтеграторе сведены в табл. 4. Учитывая малое содержание сопутствующих металлов, их концентрация в растворах повышается упариванием растворов или осаждением комплексного геля из растворов содой с переводом металлов в нерастворимую форму [21, 22].

Экономическое значение работы заключается в обосновании возможности вовлечения в хозяйственный оборот отходов горного производства с получением прибыли за счет реализации товарной продукции. В будущем можно прогнозировать развитие исследований в направлении повышения извлечения металлов из отходов горного производства [23, 24].

Для переработки техногенных отходов (хвостов обогащения) в настоящей работе рекомендуется создавать новые технологии, основанные на последних достижениях науки и техники с использованием механохимической технологии извлечения железа из хвостов обогащения геотехнологий и дезинтеграторов типа ДУ-65 (Таллин, Эстония). Реализация эффективных методов извлечения металлов из таких отходов позволит улучшить экологическую обстановку в районах

Результаты выщелачивания хвостов в дезинтеграторе

Table 4. Results of tailings leaching in a disintegrator

Проба	Содержание в выщелачивающем растворе, г/л		Скорость вращения роторов дезинтегратора, Гц	Время выщелачивания, ч	Извлечение железа в производственный раствор, %
	H ₂ SO ₄	NaCl			
1	2 (–1)	20 (–1)	50 (–1)	0,250 (–1)	0,50
2	10 (1)	20 (–1)	50 (–1)	0,250 (–1)	5,33
3	2 (–1)	160 (1)	50 (–1)	0,250 (–1)	2,67
4	10 (1)	160 (1)	50 (–1)	0,250 (–1)	6,50
5	2 (–1)	20 (–1)	200 (1)	0,250 (–1)	1,45
6	10 (1)	20 (–1)	200 (1)	0,250 (–1)	6,44
7	2 (–1)	160 (1)	200 (1)	0,250 (–1)	3,18
8	10 (1)	160 (1)	200 (1)	0,250 (–1)	7,53
9	2 (–1)	20 (–1)	50 (–1)	1 (1)	0,78
10	10 (1)	20 (–1)	50 (–1)	1 (1)	6,02
11	2 (–1)	160 (1)	50 (–1)	1 (1)	3,06
12	10 (1)	160 (1)	50 (–1)	1 (1)	7,23
13	2 (–1)	20 (–1)	200 (1)	1 (1)	2,02
14	10 (1)	20 (–1)	200 (1)	1 (1)	6,80
15	2 (–1)	160 (1)	200 (1)	1 (1)	4,41
16	10 (1)	160 (1)	200 (1)	1 (1)	12,50
17	2 (–1)	90 (0)	125 (0)	0,625 (0)	2,84
18	10 (1)	90 (0)	125 (0)	0,625 (0)	5,41
19	6 (0)	20 (–1)	125 (0)	0,625 (0)	3,93
20	6 (0)	160 (1)	125 (0)	0,625 (0)	4,46
21	6 (0)	90 (0)	50 (–1)	0,625 (0)	2,65
22	6 (0)	90 (0)	200 (1)	0,625 (0)	2,98
23	6 (0)	90 (0)	125 (0)	0,250 (–1)	2,28
24	6 (0)	90 (0)	125 (0)	1 (1)	3,55

Пр и м е ч а н и е. В скобках указаны уровни варьирования независимых переменных: –1, 0, 1.

их складирования и обеспечит прирост минерально-сырьевой базы горнодобывающей промышленности [25, 26].

Выполнен регрессионный анализ экспериментальных данных, на основании которого построены графики зависимости извлечения железа от значений переменных факторов процесса. Установлено, что применяемые технологии обогащения ограничены пределом извлечения, результатом которого являются хвосты переработки. Использование хвостов традиционными технологиями экономически не эффективно, а модернизация процессов обогащения целесообразна путем привлечения гидрометаллургической и химической технологий. Показано, что перспективным направлением извлечения металлов из отходов горной промышленности является комбинирование техно-

логий переработки на основе сочетания возможностей одновременно химического обогащения и активации в дезинтеграторе. Определено, что механохимическая активация хвостов обогащения в дезинтеграторе одновременно с выщелачиванием позволяет существенно увеличить извлечение при том, что время переработки сокращается на два порядка. Рекомендуемая технология может быть востребована на предприятиях различных отраслей промышленности при перспективе перехода к подземной добыче.

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ

ИССЛЕДОВАНИЙ

Основным негативным влиянием горной технологии на окружающую среду и человека являются боль-

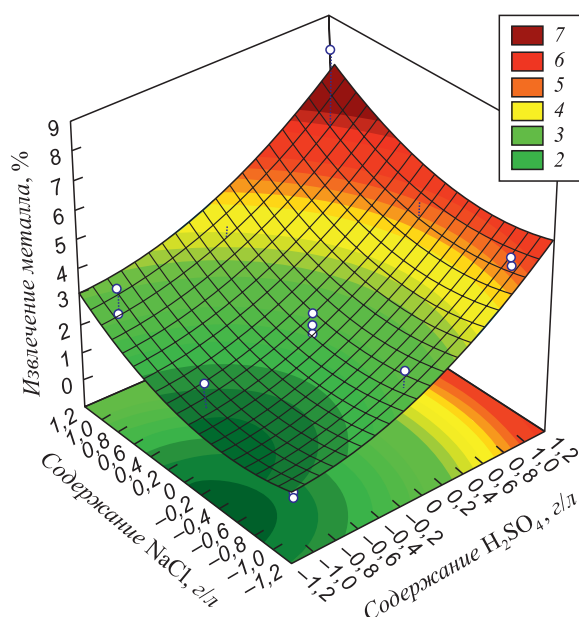


Рис. 2. Зависимости извлечения металла от содержания хлорида натрия и серной кислоты

Fig. 2. Dependence of metal extraction on the content of sodium chloride and sulfuric acid

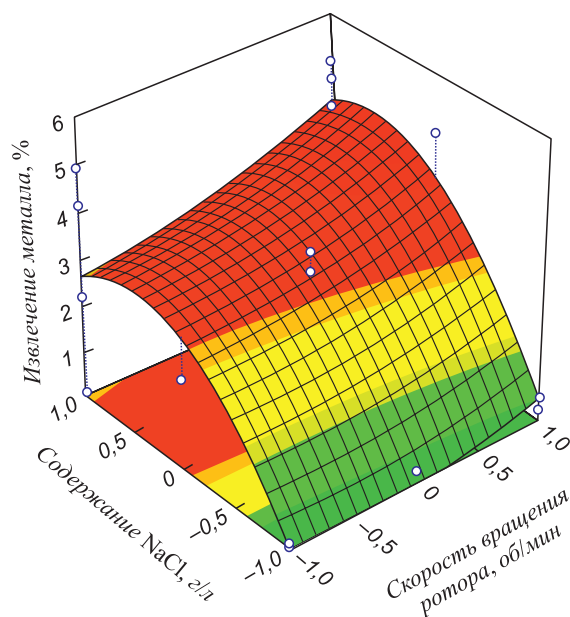


Рис.3. Зависимости извлечения металла от содержания хлорида натрия и скорости вращения дисков дезинтегратора

Fig. 3. Dependences of metal extraction on the content of sodium chloride and the rotation speed of disintegrator disks

шие затраты на обеспечение жизнедеятельности населения, проживающего в зоне влияния горных объектов, отчуждения больших площадей земель из пользования и др. Поэтому предлагается рассмотреть вопрос о целесообразности проведения следующих мероприятий [27, 28]:

- широкое вовлечение в производство техногенных запасов хвостов обогащения руд, а также переработка отвалов забалансовых (по содержанию полезных компонентов) руд на модульных установках;
- рекультивация территории промышленных площадок и прилегающей к ним территории после окончания эксплуатации месторождений полезных ископаемых;
- озеленение рекультивированной территории травяной и кустарниковой растительностью;
- постоянный мониторинг компонентов окружающей среды в зоне влияния горных объектов;
- дистанционное картирование индикаторов опасности территорий на детальном (объектовом) уровне отдельных экологически опасных объектов территории за пределами локаций самих шахтных площадок для сравнения [29, 30].

Выводы

Механохимическая активация хвостов обогащения в дезинтеграторе на два порядка быстрее по сравнению с агитационным выщелачиванием, увеличивает извлечение металлов в раствор на 10 – 25 % в течение одного цикла переработки и может увеличить извлечение при многократной переработке. Выполненные исследования являются шагом в направлении создания высокоэффективной технологии утилизации хвостов обогащения руд с получением металлов и компонентов бетонных смесей, основными достоинствами которой являются возможность утилизации отходов обогащения со временем хранения более 10 лет и получение металлов в количестве от 20 до 60 % от содержания в хвостах. Рекомендуется технология к внедрению на предприятиях горнодобывающих отраслей промышленности, в частности на комбинате «КМА руда» (Яковлевском руднике) с перспективой перехода к подземной добыче на Лебединском, Стойленском, Михайловском и других месторождениях. Феномен активации при обработке в дезинтеграторе подтвержден и в смежных отраслях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Голик В.И., Комашенко В.И. Отходы обогащения железистых кварцитов как сырье для доизвлечения металлов и использования в качестве закладочных смесей // Горный журнал. 2017. № 3. С. 43–47. <http://doi.org/10.17580/gzh.2017.03.08>
2. Голик В.И., Комашенко 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.

1. Golik V.I., Komashchenko V.I. Ferruginous quartzite processing waste as a source of additional metal recovery and backfilling. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 3, pp. 43–47. (In Russ.). <http://doi.org/10.17580/gzh.2017.03.08>
2. Golik V.I., Komashchenko V.I., Stradanchenko S.G., Maslennikov S.A. Increasing completeness of subsoil use through deep utilization of coal enrichment waste. *Gornyi Zhurnal*. 2012, no. 9, pp. 91–95. (In Russ.).

3. Голик В.И., Разоренов Ю.И., Страданченко С.Г., Хашева З.М. Принципы и экономическая эффективность комбинирования технологий добычи руд // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 7. С. 6–14.
4. Кощаченко В.И. Эколого-экономическая целесообразность утилизации горнопромышленных отходов с целью их переработки // Известия Тульского государственного университета. Науки о Земле. 2015. № 4. С. 23–30.
5. Каплун Д.Р., Радченко Д.Н. Принципы проектирования и выбор технологий освоения недр, обеспечивающих устойчивое развитие подземных рудников // Горный журнал. 2017. № 11. С. 121–125. <http://doi.org/10.17580/gzh.2017.11.10>
6. Эпов М.И., Юркевич Н.В., Бортникова С.Б., Карин Ю.Г., Саева О.П. Определение состава горно-рудных отходов геохимическими и геофизическими методами (на примере хвостохранилища Салаирского горно-обогатительного комбината) // Геология и геофизика. 2017. Т. 58. № 12. С. 1543–1552. <http://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.11.014>
7. Крупская Л.Т., Голубев Д.А., Растиани Н.К., Филатова М.Ю. Рекультивация поверхности хвостохранилища закрытого горного предприятия Приморского края с использованием биоремедиации // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. Т. 2019. № 9. С. 138–148. <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-09-0-138-148>
8. Волков Е.П., Анушенков А.Н. Разработка технологии закладки горных выработок твердеющими смесями на основе хвостов обогащения // Известия вузов. Горный журнал. 2019. № 7. С. 5–13. <http://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-7-5-13>
9. Ляшенко В.И., Голик В.И., Дятчин В.З. Складирование хвостов обогащения в виде твердеющих масс в подземном выработанном пространстве и хвостохранилище // Обогащение руд. 2020. Т. 2020. № 1. С. 41–47. <http://doi.org/10.17580/or.2020.01.08>
10. Ляшенко В.И., Голик В.И., Дятчин В.З. Повышение экологической безопасности при снижении техногенной нагрузки в горнодобывающих регионах // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 7. С. 529–538. <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-7-529-538>
11. Гавришев С.Е., Корнилов С.Н., Пыталев И.А., Гапонова И.В. Повышение экономической эффективности горнодобывающих предприятий за счет вовлечения в эксплуатацию техногенных георесурсов // Горный журнал. 2017. № 12. С. 46–51. <http://doi.org/10.17580/gzh.2017.12.09>
12. Kayri M. Predictive abilities of Bayesian regularization and Levenberg – Marquardt algorithms in artificial neural networks: A comparative empirical study on social data // Mathematical and Computational Applications. 2016. Vol. 21. No. 2. Article 21020020. <http://doi.org/10.3390/mca21020020>
13. Modaihsh A.S., Mahjoub M.O., Nadeem M.E.A., Ghoneim A.M., Al-Barakah F.N. The air quality, characterization of polycyclic aromatic hydrocarbon, organic carbon, and diurnal variation of particulate matter over Riyadh City // Journal of Environmental Protection. 2016. No. 7. P. 1198–1209. <http://doi.org/10.4236/jep.2016.79107>
14. Ke X., Zhou X., Wang X., Wang T., Hou H., Zhou M. Effect of tailings fineness on the pore structure development of cemented paste backfill // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 126. P. 345–350. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.052>
15. Yuan Y., Bolan N., PrévotEAU A., Vithanage M., Biswas J.K., Ok Y.S., Wang H. Applications of biochar in redox-mediated reactions // Bioresource Technology. 2017. Vol. 246. P. 271–281. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.154>
16. Beiyuan J., Awad Y.M., Beckers F., Tsang D.C., Ok Y.S., Rinklebe J. Mobility and phytoavailability of As and Pb in a contaminated soil using pine sawdust biochar under systematic change of redox conditions // Chemosphere. 2017. Vol. 178. P. 110–118. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.022>
17. Deng D.Q., Liu L., Yao Z.L., Song K.I., Lao D.Z. A practice of ultra-fine tailings disposal as filling material in a gold mine // Journal of Environmental Management. 2017. Vol. 196. P. 100–109. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.056>
3. Golik V.I., Razorenov Yu.I., Stradanchenko S.G., Khasheva Z.M. Principles and economic efficiency of ore mining technology combination. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering*. 2015, vol. 326, no. 7, pp. 6–14. (In Russ.).
4. Komashchenko V.I. Ecological and economic feasibility of mining wastes utilization for their processing. *Izvestiya Tul. GU. Nauki o Zemle*. 2015, no. 4, pp. 23–30. (In Russ.).
5. Kaplunov D.R., Radchenko D.N. Design philosophy and choice of technologies for sustainable development of underground mines. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 11, pp. 121–125. (In Russ.). <http://doi.org/10.17580/gzh.2017.11.10>
6. Epov M.I., Yurkevich N.V., Bortnikova S.B., Karin Yu.G., Saeva O.P. Analysis of mine waste by geochemical and geophysical methods (a case study of the mine tailing dump of the Salair ore-processing plant). *Russian Geology and Geophysics*. 2017, vol. 58, no. 12, pp. 1543–1552. <http://doi.org/10.1016/j.rgg.2017.11.014>
7. Krupskaya L.T., Golubev D.A., Rastanina N.K., Filatova M.Yu. Reclamation of tailings storage surface at a closed mine in the Primorsky Krai by bio remediation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019, vol. 2019, no. 9, pp. 138–148. (In Russ.). <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-09-0-138-148>
8. Volkov E.P., Anushenkov A.N. Developing the technology of mine stowing with processing tailings based hardening blends. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*. 2019, no. 7, pp. 5–13. (In Russ.). <http://doi.org/10.21440/0536-1028-2019-7-5-13>
9. Lyashenko V.I., Golik V.I., Dyatchin V.Z. Storage of tailings in the form of a hardened mass in underground mined-out spaces and tailings facilities. *Obogashchenie rud*. 2020, vol. 2020, no. 1, pp. 41–47. (In Russ.). <http://doi.org/10.17580/or.2020.01.08>
10. Lyashenko V.I., Golik V.I., Dyatchin V.Z. Increasing environmental safety by reducing technogenic load in mining regions. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 7, pp. 529–538. (In Russ.). <http://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-7-529-538>
11. Gavrishev S.E., Kornilov S.N., Pytalev I.A., Gaponova I.V. Enhancing mine production efficiency through waste management. *Gornyi zhurnal*. 2017, no. 12, pp. 46–51. (In Russ.). <http://doi.org/10.17580/gzh.2017.12.09>
12. Kayri M. Predictive abilities of Bayesian regularization and Levenberg – Marquardt algorithms in artificial neural networks: A comparative empirical study on social data. *Mathematical and Computational Applications*. 2016, vol. 21, no. 2, article 21020020. <http://doi.org/10.3390/mca21020020>
13. Modaihsh A.S., Mahjoub M.O., Nadeem M.E.A., Ghoneim A.M., Al-Barakah F.N. The air quality, characterization of polycyclic aromatic hydrocarbon, organic carbon, and diurnal variation of particulate matter over Riyadh City. *Journal of Environmental Protection*. 2016, no. 7, pp. 1198–1209. <http://doi.org/10.4236/jep.2016.79107>
14. Ke X., Zhou X., Wang X., Wang T., Hou H., Zhou M. Effect of tailings fineness on the pore structure development of cemented paste backfill. *Construction and Building Materials*. 2016, vol. 126, pp. 345–350. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.052>
15. Yuan Y., Bolan N., PrévotEAU A., Vithanage M., Biswas J.K., Ok Y.S., Wang H. Applications of biochar in redox-mediated reactions. *Bioresource Technology*. 2017, vol. 246, pp. 271–281. <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.154>
16. Beiyuan J., Awad Y.M., Beckers F., Tsang D.C., Ok Y.S., Rinklebe J. Mobility and phytoavailability of As and Pb in a contaminated soil using pine sawdust biochar under systematic change of redox conditions. *Chemosphere*. 2017, vol. 178, pp. 110–118. <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.022>
17. Deng D.Q., Liu L., Yao Z.L., Song K.I., Lao D.Z. A practice of ultra-fine tailings disposal as filling material in a gold mine. *Journal of Environmental Management*. 2017, vol. 196, pp. 100–109. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.056>

18. Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production // *Waste Management*. 2017. Vol. 61. P. 40–57. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.019>
19. Cheng Y., Jiang H., Zhang X., Cui J., Song C., Li X. Effects of coal rank on physicochemical properties of coal and on methane adsorption // *International Journal of Coal Science and Technology*. 2017. Vol. 4. No. 2. P. 129–146. <http://doi.org/10.1007/s40789-017-0161-6>
20. Paul A., Murthy V.M.S.R., Prakash A.K. Estimation of rock load in development workings of underground coal mines. A modified RMR approach // *Current Science*. 2018. Vol. 114. No. 10. P. 2167–2174. <http://doi.org/10.18520/cs/v114/i10/2167-2174>
21. Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B., Beriev O.G., Kanukov A.S., Maisuradze M.V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory // *International Journal of Geomate*. 2016. Vol. 10. No. 1. P. 1693–1697.
22. Chen T., Lei C., Yan B., Xiao X. Metal recovery from the copper sulfide tailing with leaching and fractional precipitation technology // *Hydrometallurgy*. 2014. Vol. 147. P. 178–182. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.05.018>
23. 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. P. 223–227. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.05.019>
24. 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. P. 73–119. <http://doi.org/10.1080/08827508.2015.1115990>
25. Mwase J.M., Petersen J., Eksteen J.J. A conceptual flowsheet for heap leaching of platinum group metals (PGMs) from a low-grade ore concentrate // *Hydrometallurgy*. 2012. Vol. 111–112. P. 129–135. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.11.012>
26. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects // *Hydrometallurgy*. 2015. Vol. 157. P. 306–324. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.08.022>
27. Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production // *Waste Management*. 2017. Vol. 61. P. 40–57. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.019>
28. Wang G., Li R., Carranza E.J.M., Yang F. 3D geological modeling for prediction of subsurface Mo targets in the Luanchuan district, China // *Ore Geology Reviews*. 2015. Vol. 71. P. 592–610. <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.002>
29. Lyashenko V., Khomenko O., Topolnij F., Helevera O. Substantiation of technologies and technical means for disposal of mining and metallurgical waste in mines // *Technology Audit and Production Reserves*. 2020. Vol. 3. No. 3 (53). P. 4–11. <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.200897>
30. Станкевич С.А., Дудар Т.В., Свиденюк М.О. Застосування багаточасової радарної інтерферометрії для виявлення зміщення земної поверхні для території урановидобування в Україні // *Екологічна безпека*. 2019. Т. 28. № 2. С. 18–23. <http://doi.org/10.30929/2073-5057.2019.2.18-23>
18. Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production. *Waste Management*. 2017, vol. 61, pp. 40–57. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.019>
19. Cheng Y., Jiang H., Zhang X., Cui J., Song C., Li X. Effects of coal rank on physicochemical properties of coal and on methane adsorption. *International Journal of Coal Science and Technology*. 2017, vol. 4, no. 2, pp. 129–146. <http://doi.org/10.1007/s40789-017-0161-6>
20. Paul A., Murthy V.M.S.R., Prakash A.K. Estimation of rock load in development workings of underground coal mines. A modified RMR approach. *Current Science*. 2018, vol. 114, no. 10, pp. 2167–2174. <http://doi.org/10.18520/cs/v114/i10/2167-2174>
21. Burdzieva O.G., Zaalishvili V.B., Beriev O.G., Kanukov A.S., Maisuradze M.V. Mining impact on environment on the North Ossetian territory. *International Journal of Geomate*. 2016, vol. 10, no. 1, pp. 1693–1697.
22. Chen T., Lei C., Yan B., Xiao X. Metal recovery from the copper sulfide tailing with leaching and fractional precipitation technology. *Hydrometallurgy*. 2014, vol. 147, pp. 178–182. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.05.018>
23. 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, pp. 223–227. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2014.05.019>
24. 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. <http://doi.org/10.1080/08827508.2015.1115990>
25. Mwase J.M., Petersen J., Eksteen J.J. A conceptual flowsheet for heap leaching of platinum group metals (PGMs) from a low-grade ore concentrate. *Hydrometallurgy*. 2012, vol. 111–112, pp. 129–135. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.11.012>
26. Sinclair L., Thompson J. In situ leaching of copper: Challenges and future prospects. *Hydrometallurgy*. 2015, vol. 157, pp. 306–324. <http://doi.org/10.1016/j.hydromet.2015.08.022>
27. Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterisation: Informing material recovery and fuel production. *Waste Management*. 2017, vol. 61, pp. 40–57. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.01.019>
28. Wang G., Li R., Carranza E.J.M., Yang F. 3D geological modeling for prediction of subsurface Mo targets in the Luanchuan district, China. *Ore Geology Reviews*. 2015, vol. 71, pp. 592–610. <http://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.002>
29. Lyashenko V., Khomenko O., Topolnij F., Helevera O. Substantiation of technologies and technical means for disposal of mining and metallurgical waste in mines. *Technology Audit and Production Reserves*. 2020, vol. 3, no. 3 (53), pp. 4–11. <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2020.200897>
30. Stankevich S.A., Dudar T.V., Svidenyuk M.O. Stagnation of bagatoch radar interferometry for detecting the change of the earth's surface for the territory of uranium production in Ukraine. *Ecological Safety*. 2019, vol. 28, no. 2, pp. 18–23. (In Ukr.). <http://doi.org/10.30929/2073-5057.2019.2.18-23>

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Владимир Иванович Голик, д.т.н., профессор кафедры «Горное дело», Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)

ORCID: 0000-0002-1181-8452

E-mail: v.i.golik@mail.ru

Юрий Витальевич Дмитрак, д.т.н., профессор, ректор, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)

ORCID: 0000-0003-1278-4845

E-mail: dmitrak@yandex.ru

Vladimir I. Golik, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Chair of Mining Engineering, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)

ORCID: 0000-0002-1181-8452

E-mail: v.i.golik@mail.ru

Yurii V. Dmitrak, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University)

ORCID: 0000-0003-1278-4845

E-mail: dmitrak@yandex.ru

Юрий Иванович Разоренов, д.т.н., профессор, ректор, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова
ORCID: 0000-0001-8171-0749
E-mail: yiri1963@mail.ru

Станислав Александрович Масленников, к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Строительство и техносферная безопасность», Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал) Донского государственного технического университета
E-mail: maslennikovsa@mail.ru

Василий Иванович Ляшенко, к.т.н., старший научный сотрудник, начальник научно-исследовательского отдела, Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии
E-mail: vilyashenko2017@gmail.com

Yurii V. Razorenov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Rector, Platov South-Russian State Polytechnic University
ORCID: 0000-0001-8171-0749
E-mail: yiri1963@mail.ru

Stanislav A. Maslennikov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof., Head of the Chair of Construction and Technosphere Safety, Institute of Service and Entrepreneurship (branch) of the Don State Technical University
E-mail: maslennikovsa@mail.ru

Vasilii I. Lyashenko, Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Head of Research Department, Ukrainian Research and Design Institute of Industrial Technology
E-mail: vilyashenko2017@gmail.com

Поступила в редакцию 17.02.2020
 После доработки 27.02.2020
 Принята к публикации 02.03.2020

Received 17.02.2020
 Revised 27.02.2020
 Accepted 02.03.2020