

УДК 504.55.054:622(470.6)

ПОВЫШЕНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СНИЖЕНИИ ТЕХНОГЕННОЙ НАГРУЗКИ В ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ РЕГИОНАХ*

Ляшенко В.И.¹, к.т.н., начальник научно-исследовательского отдела,
старший научный сотрудник (vilyashenko2017@gmail.com)

Голик В.И.², д.т.н., профессор кафедры «Горное дело» (v.i.golik@mail.ru)

Дятчин В.З.³, к.т.н., доцент кафедры менеджмента и социальной работы (dsveta49@i.ua)

¹ ГП «УкрНИПИИпромтехнологии»

(52204, Украина, Днепропетровская обл., Желтые Воды, пр. Свободы, 37)

² Северо-Кавказский горно-металлургический институт (государственный технологический университет)

(362021, Республика Северная Осетия-Алания, Владикавказ, ул. Николаева, 44)

³ Институт предпринимательства «Стратегия»

(52204, Украина, Днепропетровская обл., Желтые Воды, ул. Гагарина, 43)

Аннотация. Одним из самых проблемных мест технологии складирования отходов переработки рудного сырья в подземное выработанное пространство и хвостохранилища с добавкой отвердителя являются хвосты гидрометаллургического завода (ГМЗ), которые направляются по пульпопроводу в хвостохранилище в виде пульпы с соотношением по массе твердое:жидкое 1:2. Жидкая фаза пульпы после отстаивания и осветления в хвостохранилище возвращается в технологический цикл на ГМЗ. Рассматриваемая технология складирования имеет ряд недостатков: высокие единовременные капитальные затраты на строительство хвостохранилища на полную проектную мощность; большая вероятность миграции вредных химических веществ в подземные воды при повреждении защитных экранов основания или бортов хвостохранилища. В ходе исследования использовали данные литературных источников и патентной документации в области обоснования параметров хранилищ, результаты лабораторных и производственных экспериментов. Проводили физическое моделирование и подбор составов твердеющих смесей. Выполнены аналитические исследования, сравнительный анализ теоретических и практических результатов по стандартным и новым методикам. Установлена возможность использования твердеющих смесей с применением в качестве вяжущего отходов смежного производства. Предложен оптимальный состав ингредиентов на 1 м³ твердеющей смеси. Предложенная технология складирования отходов переработки рудного сырья в подземное выработанное пространство и хвостохранилища с добавкой отвердителя позволяет при производственной мощности предприятия 1500 тыс. т/год хвостов использовать 50 – 55 % для закладки подземного выработанного пространства. Оставшуюся часть, соединенную с вяжущим материалом, можно складировать в хранилище. При заполнении связанными хвостами всей существующей площади зеркала хвостохранилища на высоту 10 м и производительности ГМЗ до 1,5 млн т в год срок эксплуатации хвостохранилища продлевается на 50 лет.

Ключевые слова: отходы переработки, рудное сырье, хвостохранилища, технологии укладки, экологическая безопасность, эффективность.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-529-538

ВВЕДЕНИЕ

Анализ работы горных предприятий показывает, что при добыче и первичной переработке 1 т товарной руды попутно извлекается 1,4 – 1,6 т твердых отходов, техногенно-усиленных вредными источниками природного происхождения, создающих экологически неблагоприятную обстановку в регионе [1, 2]. Утилизация отходов горно-металлургического производства (закладка выработанных пространств, сооружение плотин для специальных хранилищ и пр.) позволяет использовать лишь 50 – 60 % общего их объема, а оставшаяся часть подлежит захоронению и последующей рекультивации загрязненных территорий [3, 4]. Поэтому актуальным является повышение экологической безопасности путем снижения техногенной нагрузки

* Указанная технология выполнена при участии Ю.Н. Тархина, Н.А. Худошиной, Л.А. Ляшенко, А.Г. Скотаренко.

в горнодобывающих регионах за счет разработки технологий и технических средств для складирования отходов переработки рудного сырья в подземное выработанное пространство и хвостохранилища с добавкой отвердителя.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ И ЕГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ АУДИТ

Объектом исследования настоящей работы будет горнодобывающий регион, технологии и технические средства для складирования отходов переработки рудного сырья в подземное выработанное пространство и хвостохранилища с добавкой отвердителя [5, 6]. Одним из самых проблемных мест является технология складирования отходов переработки рудного сырья, согласно которой хвосты гидрометаллургического завода (ГМЗ) направляются по пульпопроводу в хвостохранилище в виде

пульпы с соотношением по массе твердое:жидкое 1:2. Жидкая фаза пульпы после отстаивания и осветления в хвостохранилище возвращается в технологический цикл на ГМЗ [7, 8]. Рассматриваемая технология складирования имеет ряд недостатков:

- высокие единовременные капитальные затраты на строительство хвостохранилища на полную проектную мощность;
- большая вероятность миграции вредных химических веществ в подземные воды при повреждении защитных экранов основания или бортов хвостохранилища.

Целью настоящей работы является повышение экологической безопасности за счет снижения техногенной нагрузки в горнодобывающих регионах при разработке технологий и технических средств для складирования отходов добычи и переработки рудного сырья в воронку обрушения, подземное выработанное пространство и хвостохранилища с добавкой отвердителя.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- установить возможность использования твердеющих смесей с применением в качестве вяжущего отходов горного производства и предложить оптимальный состав ингредиентов на 1 м³ смеси для заполнения воронки обрушения, подземных пустот и хвостохранилищ с добавкой отвердителя;
- предложить технологические, планировочные и инженерные мероприятия для улучшения экологической обстановки на промышленных площадках горно-металлургических предприятий и зоне влияния их объектов;
- рекомендовать «сухое» в иммобилизованном виде складирование хвостов горно-металлургического производства в хвостохранилища вместо традиционного наливного способа;
- показать перспективные направления дальнейших исследований технологий и технических средств для утилизации хвостов обогащения руд с извлечением всех опасных и ценных ингредиентов с применением механической и механохимической активаций минерального сырья, а также механической и химической компоненты выщелачивания.

ИССЛЕДОВАНИЕ СУЩЕСТВУЮЩИХ РЕШЕНИЙ

ПРОБЛЕМЫ

На практике промышленные отходы складировать в подземных выработанных пространствах и специальных хранилищах на «дневной» поверхности [9, 10]. При этом хвостохранилища с ограждающей дамбой [11, 12] сооружают из инертных грунтов или из переработанного рудного материала в смеси с вяжущим компонентом [13, 14].

Таким образом, снижение опасности для окружающей среды путем складирования отходов переработки

рудного сырья в подземное выработанное пространство и хвостохранилища с добавкой отвердителя решает важные научные, практические и социальные задачи [15, 16]. Это достигается за счет отверждения опасных ингредиентов, определения рецептур твердеющих смесей, оценки их прочности для заполнения подземных выработанных пространств и поверхностных карт хранилища, перевода в твердое состояние [17, 18].

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Проведены следующие исследования:

- анализ мирового опыта обращения с отходами гидрометаллургического передела руд;
- сбор и анализ материалов по технологиям складирования и иммобилизации отходов горно-металлургического производства в поверхностных хранилищах;
- определение эффективной технологии иммобилизации и складирования хвостов ГМЗ;
- определение требований к физико-механическим, химическим показателям складированных отходов и к устройству хвостохранилища;
- установление физико-механических показателей смеси хвостов ГМЗ с вяжущим (подвижность, сцепление, прочность, фильтрация, выщелачиваемость вредных ингредиентов);
- разработка технологий и рецептов твердеющих смесей для укладки их в карты поверхностного хранилища и в подземные выработанные пространства шахты;
- определение основных технико-экономических показателей технологии приготовления и укладки твердеющей смеси;
- оценка влияния технологии приготовления и укладки твердеющей смеси в карты хвостохранилища на персонал, окружающую среду и население, проживающее в зоне его влияния.

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ТВЕРДЕЮЩЕЙ СМЕСИ

Для проведения натуральных испытаний твердеющей смеси на основе хвостов рудообогатительной фабрики на пляжной зоне хвостохранилища была отобрана проба хвостов со следующим гранулометрическим составом по классам крупности: более 15 мм – 14,8 %; 0,074 ÷ 15 мм – 43,1 %; менее 0,074 мм – 42,1 %. На основе этих хвостов были приготовлены три образца твердеющей смеси объемом 1 м³, каждый с молотым гранулированным доменным шлаком в качестве вяжущего. Тонина помола шлака была аналогичной, как и при использовании его для натуральных испытаний твердеющей смеси на основе хвостов ГМЗ. Количество шлака по образцам брали несколько выше, по сравнению с хвостами ГМЗ, которое составило 89, 100 и 120 кг на 1 м³ твердеющей смеси. Приготовленную смесь

укладывали в деревянную опалубку, которую снимали после схватывания смеси. Образцы были оставлены на открытом воздухе для определения влияния атмосферных условий на их сохранность. В течение одного года образцы подвергали воздействию 50 циклов (замораживание – оттаивание). Внешний вид образцов после трех лет испытаний показал незначительное разрушение их поверхности и лучшую сохранность по сравнению с образцами на основе хвостов ГМЗ. Это связано с увеличением количества вяжущего. Хвосты обогатительной фабрики можно использовать в составе твердеющей смеси для заполнения воронки обрушения как следствия многолетней подземной разработки железорудного месторождения системами с принудительным обрушением руд и вмещающих пород (ГП «ВостГОК», г. Желтые Воды, Украина). При этом рекомендуется следующая композиция для 1 м³ твердеющей смеси: 1350 – 1500 кг хвосты обогатительной фабрики (песковая часть); 50 – 70 кг молотый гранулированный шлак; 350 кг вода затворения.

При анализе результата проведенных исследований были отобраны оптимальные образцы закладочных смесей (достижение нормативной прочности при минимальном расходе вяжущего), в которых вяжущим является цемент, а заполнителем – кислые или нейтрализованные хвосты и дробленая порода. На основании проведенных исследований можно рекомендовать следующие составы твердеющих смесей:

– для закладки выработанного пространства камер: 1400 кг нейтрализованных хвостов ГМЗ; 200 кг цемента марки М200; 400 л воды затворения;

– для укладки в хвостохранилище: 1600 – 1800 кг хвостов ГМЗ; 200 кг цемента марки М200; 350 л воды затворения.

СКЛАДИРОВАНИЕ ОТХОДОВ ГОРНОГО

И МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВ В ПОДЗЕМНЫЕ ВЫРАБОТАННЫЕ ПРОСТРАНСТВА

Анализ технологии возведения искусственных массивов в подземном выработанном пространстве из твердеющей закладочной смеси различного состава и прочности показывает, что использование для закладки отходов горного и перерабатывающего производств технически осуществимо двумя способами (централизованный и раздельный).

На горно-металлургических предприятиях наиболее широко распространены технологические схемы приготовления твердеющей закладочной смеси на поверхностных стационарных закладочных комплексах на основе вяжущего, изготовленного из доменного гранулированного шлака и низкосортного песка или хвостов обогащения (рис. 1). Песок и гранулированный шлак из расходного склада бульдозером транспортируются в приемные бункера, откуда эти материалы пластинчатыми питателями, а затем ленточными конвейерами доставляются в промежуточные бункера и далее на автоматические ленточные дозаторы. Для отделения комков глины и других примесей песок проходит через грохотную решетку, установленную над промежуточным бункером.

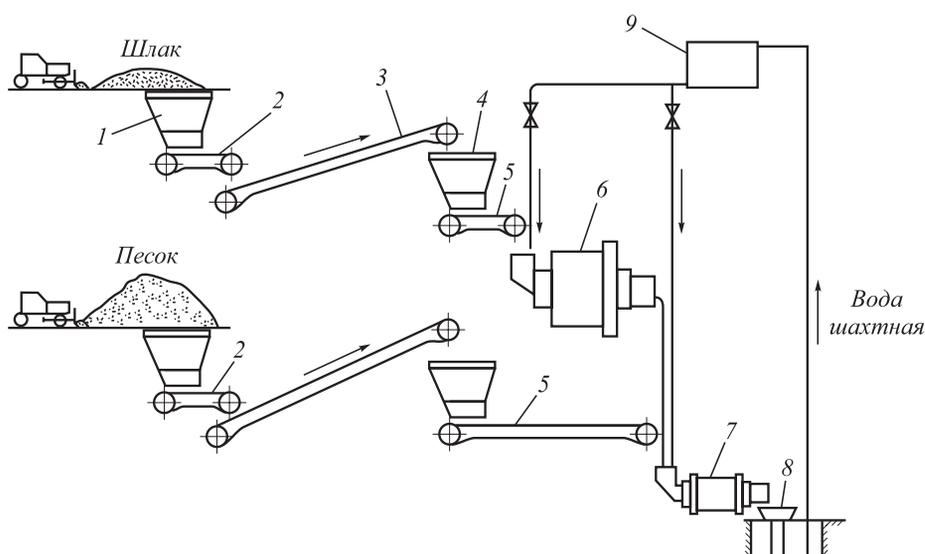


Рис. 1. Технологическая схема закладочного комплекса на основе вяжущего, изготовленного из доменного гранулированного шлака и низкосортного песка:
1 – бункер приемный; 2 – питатель; 3 – конвейер; 4 – бункер накопительный; 5 – дозатор; 6 – мельница шаровая; 7 – смеситель; 8 – воронка приемная; 9 – емкость для воды затворения

Fig. 1. Technological scheme of the filling complex based on a binder made of granulated blast furnace slag and low-grade sand:
1 – ground bunker; 2 – feeder; 3 – conveyor; 4 – storage bunker; 5 – dispenser; 6 – ball grinder; 7 – mixer; 8 – receiving funnel; 9 – mixing water tank

Характеристика твердеющих закладочных смесей

Table 1. Specification of hardening filling mixtures

Расход компонентов, кг/м ³					Предел прочности на сжатие в возрасте 6 месяцев, МПа
песок	дробленый материал	хвосты ГМЗ	гранулированный шлак	вода затворения	
1350	–	–	250	400	3,0
750	750	–	200		
–	800	700	200		
1300	–	–	300	400	5,0
700	750	–	250		
–	800	850	250		

После дозировки шлак в определенном соотношении с водой поступает в шаровую мельницу, а затем в виде пульпы в смеситель, где перемешивается с песком. В смеситель также подается вода для придания закладочной смеси нужной подвижности. Готовая смесь поступает в приемную воронку, далее по трубам в самотечно-пневматическом режиме транспортируется в выработанное пространство. Установлено, что в качестве добавки к заполнителю твердеющей закладки можно использовать дробленые горные породы или хвосты обогащения (табл. 1).

Анализ композиций твердеющей закладочной смеси показывает, что применение рассматриваемой технологической схемы позволяет снизить расход дефицитного дорогостоящего вяжущего (цемента) в 2,0 – 2,6 раза (от 400 до 150 кг/м³) и удельные затраты на закладку почти в 2,0 раза, а главное утилизировать в подземные пустоты вредные отходы (рис. 2).

Плотность закладочного массива составляет 2100 – 2300 кг/м³. Установлено, что 40 % объемов подземных пустот, образованных в процессе ведения горных работ, могут погашаться гидравлической смесью или сыпучей закладкой. В этом случае погашают полностью отдельные обособленные отработанные блоки и верхние части камер вторых очередей выемки.

Технико-экономические расчеты показали, что с учетом существующей технологии производства и доставки к месту укладки закладочного материала наиболее рациональной является схема с дроблением скальных отходов и их транспортировкой по трубопроводам в подземные пустоты. Такая схема отличается простотой организации и обслуживания, высокой производительностью и надежностью в работе. Оптимальная крупность отходов определена с учетом затрат на дробление, трубопроводный транспорт и плотность их укладки в отработанные камеры и находится в пределах 15 мм. Гранулометрический состав хвостов ГМЗ приведен в табл. 2, а прочность твердеющей закладки на основе хвостов ГМЗ – в табл. 3.

ПРАКТИКА СКЛАДИРОВАНИЯ ХВОСТОВОЙ ПУЛЬПЫ В ХВОСТОХРАНИЛИЩАХ

С начала эксплуатации Желтореченских рудных месторождений (г. Желтые Воды, Украина) образовались:

- два карьера («Габаевский» и «Веселоивановский»), три хвостохранилища (резервное хвостохранилище в отработанном карьере бурых железняков (КБЖ), «Разбери» и «Терновская») и воронка обрушения как следствие подземной разработки железорудного месторождения системами с принудительным обрушением руд и вмещающих пород (табл. 4);

- балка «Щербаковская» (Щ) (ГП «ВостГОК», Петровский район, Украина).

Складирование хвостовой пульпы осуществляли в хвостохранилища, расположенные в КБЖ и балке Щ. Под хвостохранилище использован КБЖ, состоящий

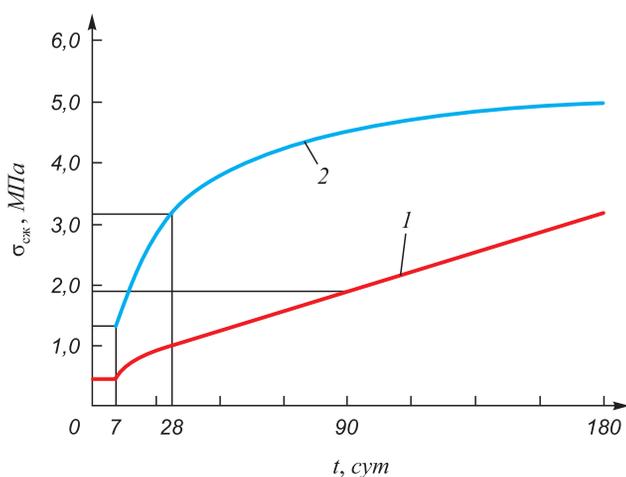


Рис. 2. Зависимость прочности закладки на сжатие $\sigma_{сж}$ от времени твердения t при расходе 50 кг (1) и 300 кг (2) цемента марки М200 на 1 м³ твердеющей закладочной смеси

Fig. 2. Graphs of dependence of compression strength of the filling mass $\sigma_{сж}$ on hardening time t at cement consumption of 50 kg (1) and 300 kg (2) on 1 m³ of waste

Т а б л и ц а 2

Гранулометрический состав хвостов ГМЗ

Table 2. Granulometric composition of HMP tailings

Размер фракции, мм	Содержание фракции, %
более 0,150	4,0
0,074 ÷ 0,150	19,8 – 41,8
0,043 ÷ 0,074	22,0 – 30,0
0,005 ÷ 0,043	30,0 – 40,0
менее 0,005	2,2

Т а б л и ц а 3

Характеристики твердеющей закладки на основе хвостов ГМЗ

Table 3. Strength hardening filler produced of HMP tailings

Наименование параметров	Количество замеров, шт	Среднее значение
Плотность, т/м ³ :		
шлака	4	2,47
хвостов	4	2,63
Влажность, %:		
шлака	5	8,00
хвостов	5	19,00
Модуль крупности хвостов	4	0,08
Содержание фракции –0,074 мм в шлаке, %:		
исходном	5	3,00
молотом	5	43,00
Объемная масса, т/м ³ :		
готовой смеси	4	2,00
пульпы молотого шлака	4	1,48
Подвижность смеси, см	9	14,00
Содержание воды, % :		
в смеси	4	31,00
в пульпе молотого шлака	4	53,00
Расход материалов, т/м ³ :		
хвостов	4	1,17
шлака	4	0,38
Прочность искусственного массива, МПа:		
3 месяцев	4	2,83
6 месяцев	6	5,12

из малой и большой чаш глубиной 10 – 15 и 60 – 65 м. В настоящее время резервное хвостохранилище КБЖ выведено из эксплуатации и рекультивируется. Действующее хвостохранилище Щ состоит из двух секций, разделенных плотиной, и эксплуатируется с 1959 г. Складирование материала осуществляли гидроналивом в обе секции с образованием поверхностного слоя

Т а б л и ц а 4

Характеристика хвостохранилищ КБЖ и Щ

Table 4. Specification of tailing dams of brown iron ore career and Scherbakovskaya putlog

Показатель	Хвостохранилища	
	КБЖ	Щ
Площадь земельного отвода, га	137,2	614,9
Площадь зеркала хвостохранилища, га	55,6	250,6
Проектный объем, млн м ³	12,4	40,7
Количество заскладированных отходов, млн т	15,9	27,7

воды в виде прудов-отстойников. Ограждающие дамбы имеют высоту от 7 до 44 м, общая протяженность около 8 км, мощность слоя хвостов до 30 м. При верхней отметке дамб 138,3 м заполнение хвостохранилища достигает уровня 135,1 м [19].

Складирование отходов

ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА В ХВОСТОХРАНИЛИЩА

С учетом мировой практики складирования и хранения отходов, достижений науки и техники с целью минимизации отрицательного влияния на окружающую среду во время строительства, эксплуатации и хранения отходов предполагается следующее [13, 14]:

- расположение хранилища в естественном понижении местности (балке), что с санитарно-экологической точки зрения является более благоприятным и обеспечивает наименьшую длину искусственных ограждающих дамб;
- строительство ограждающих дамб из естественных материалов (уплотненного суглинка);
- изоляция днища и внутренних откосов хранилища противофильтрационным экраном, который включает слой уплотненного суглинка и полиэтиленовую пленку высокой плотности (геомембрана типа НБРЕ); экран надежно защищает геологическую и гидрогеологическую среды от химического загрязнения;
- хранение отходов гидрометаллургической переработки рудного сырья в иммобилизованном (связанном) состоянии, которое снижает вероятность миграции вредных химических веществ в окружающую среду;
- устройство водоотводных канав по периметру хранилища, которые исключают поступление дождевых вод в чашу хранилища с близлежащей территории;
- устройство санитарно-защитной зоны хранилища по его периметру размером 1000 м и озеленение;
- поэтапное складирование отходов и рекультивация заскладированного участка;

- складирование и хранение плодородного слоя грунта и суглинка, которые вынимаются во время инженерной подготовки территории для дальнейшего использования их в строительстве и рекультивации заскладированного массива отходов;

- использование вентиляционного и очистного оборудования, орошение разрабатываемых грунтов с целью обеспечения соответствия загрязнения атмосферного воздуха санитарно-гигиеническим требованиям;

- своевременные сбор, хранение и утилизация образующихся промышленных отходов в соответствии с разработанными и согласованными лимитами предприятия в целом;

- рекультивация территории хранилища и близлежащей к нему территории после окончания эксплуатации;

- озеленение рекультивированной территории травяной и кустарниковой растительностью;

- постоянный мониторинг компонентов окружающей среды в зоне влияния хранилища.

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПО СКЛАДИРОВАНИЮ И ХРАНЕНИЮ ОТХОДОВ

Хвостохранилище намечается разместить в безымянной балке, которая является правым притоком реки Малая Высь (Кировоградская обл., Украина). Постоянного тока воды в балке нет, за исключением стока в весеннее наводнение и в период осеннего паводка. Естественные условия участка отвечают требованиям нормативов по размещению хранилища. При строительстве по дну хранилища уплотняется естественный грунт (суглинок), укладывается песок (0,1 м), геомембрана и защитный слой суглинка.

Емкость хранилища для складирования отходов переработки рудного сырья составляет 43,125 млн м³. Площадь его чаши составляет 2897,9 тыс. м², средняя глубина – 15,0 м, самая высокая отметка дамбы – 216,0 м. Прогнозный объем складирования во время разработки руд Новокопачинского месторождения (Кировоградская обл., Украина) составляет 34,816 млн м³. Расчетный период складирования отходов ГМЗ составляет 50 – 85 лет в зависимости от объемов добычи и переработки руды. Территория выведенных из сельскохозяйственного пользования земель ограничивается площадью хранилища и составляет 290 га. Для хвостохранилища отходов ГМЗ предусматривается организация санитарно-защитной зоны по его периметру размером 1000 м. На борту хранилища строится комплекс подготовки отходов к складированию. Отходы ГМЗ к хранилищу транспортируются по пульпопроводу. Ориентировочно количество ингредиентов на 1 м³ смеси составляет: 1600 – 1800 кг обезвоженных отходов; 200 кг измельченной забалансовой руды (15 мм по содержанию полезных компонентов); 200 – 300 кг цемента марки М300 [20].

Вода, образующаяся при обезвоживании отходов, возвращается в технологический процесс ГМЗ. Образованная твердеющая смесь бетононасосом подается на подготовленный участок чаши хранилища. После затвердения смеси осуществляли рекультивацию этого участка. После окончания эксплуатации и рекультивации хранилища близлежащая территория рекультивируется для сельскохозяйственного или лесохозяйственного использования. Рекультивационные слои из суглинка (0,5 м), щебня или шлака (0,5 м), плодородного пласта грунта (0,6 м) снижают влияние вредных веществ на окружающую среду. Поверхность рекультивированного хранилища закрепляется посадкой травяной и кустарниковой растительности [21].

Подготовка хвостов ГМЗ к иммобилизации

Подготовка хвостов включает следующие операции: обезвоживание хвостовой пульпы ГМЗ в гидроциклонах диам. 500 мм с выделением песка с содержанием твердого 45 %, поступающего на стадию II обезвоживания, и слива, поступающего на стадию III обезвоживания; стадия I обезвоживания песка в гидроциклонах диам. 350 мм с выделением песка с содержанием 80 % твердого, направляемого на смешение с цементом в двухвальном смесителе, и слива, поступающего на стадию III обезвоживания; обезвоживание сливов гидроциклонов в сгустителе Ц50 диам. 50 м с центральным приводом с получением песка с содержанием 50 % твердого, направляемого на фильтрацию, и слива, используемого на ГМЗ в качестве оборотной воды; фильтрация песка сгустителей на дисковых вакуум-фильтрах до содержания 84 % твердого в кеке; смешение обезвоженных хвостов с цементом и фракцией 15 мм горных отходов; подача смеси на хранилище отвержденных отходов [22].

Хвосты ГМЗ с соотношением Т:Ж = 1,0:1,9 обезвоживаются на стадии I в гидроциклонах диам. 500 мм (четыре рабочих и четыре резервных), песок перекачивается на стадию II обезвоживания в гидроциклонах диам. 350 мм (четыре рабочих и четыре резервных), а слив самотеком поступает в сгустители диам. 50 м с центральным приводом. Для получения чистого слива предусматривается три сгустителя типа Ц50М. Слив сгустителей откачивается на ГМЗ для использования в качестве оборотной воды, избыток подается на карту испарения, организованную на хранилище отходов. Песок сгустителей подается на обезвоживание на дисковые вакуум-фильтры типа ДОО 100 (шесть рабочих и два резервных).

Удельные нагрузки для выбора сгустителей и вакуум-фильтров приняты по справочным данным и перед последующей стадией проектирования требуют проверки опытным путем. Кек фильтров совместно с песком гидроциклонов стадии II обезвоживания перегружается на ленточный конвейер, подающий обезвоженные хвосты на смешение с вяжущим. На этот кон-

вейер дозируется отсеб (фракция менее 15 мм) отходов горного производства. Подготовка смеси к иммобилизации проводится в двухвальных бетоносмесителях типа БП-2Г-4500. Вяжущее подается в бетоносмесители весовыми дозаторами СБ-71В. Подготовленная смесь откачивается на укладку в хранилище поршневыми бетононасосами BSA 1400 HP-D [23].

Таким образом, установлена возможность использования твердеющих смесей с применением в качестве вяжущего цемента, доменного гранулированного шлака и золы, а в качестве наполнителя – хвостов ГМЗ для их иммобилизации при заполнении карт поверхностных хвостохранилищ, определена прочность, рецептура и последовательность укладки полученной твердеющей смеси в хранилище (табл. 5) [24].

РЕЗУЛЬТАТЫ ВНЕДРЕНИЯ

В результате выполненных работ по пылеподавлению по данным санитарно-эпидемиологической службы содержание пыли в воздухе хвостохранилища ниже предельно-допустимых концентраций [25]. Результаты исследования твердеющих смесей, приготовленных на основе хвостов ГМЗ для сооружения макета дамбы хвостохранилища, показали следующее:

- контакт дамбовой воды и технической с твердеющей смесью в пределах исследованного диапазона концентрации солей и времени не разрушает ее и не влияет на прочность;
- коэффициент фильтрации смеси составляет менее 1 см в сутки, а прочность твердеющей смеси, пригото-

вленной на дамбовой воде, на 25 % выше, чем при использовании технической воды;

- выбуренные керны из массива дамбы после одного года пребывания на открытом воздухе прочность (2,0 – 2,3 МПа) не потеряют.

Твердеющая смесь после 100 циклов «замораживание – оттаивание» получила незначительное шелушение поверхности и сохранность формы, в соответствии с требованием СНиП-56 – 76 считается морозостойчивой.

Для контроля за распространением подземных вод, их химическим составом в пределах санитарно-защитной зоны и зоны наблюдения хвостохранилища (до 1000 м по его периметру) создана режимная сеть скважин. Два раза в год проводятся замеры уровня подземных вод и отбор проб воды для химического анализа. За каждый год приводится отчетность, выполняется анализ характера миграции сульфатов и нитратов по данным режимных наблюдений. Работы выполняются гидрогеологической службой ГП «ВостГОК» (Украина). Проводятся мероприятия по предотвращению пыления хвостового материала из сухих пляжей чаши хвостохранилища путем покрытия их суглинком мощностью до 0,5 м и по укреплению низовых откосов дамб [26].

Повышение экологической безопасности в зоне влияния горных объектов достигается за счет разработки и внедрения новых методов, технологий и технических средств, обеспечивающих возможность использования для закладки местных некондиционных материалов и отходов производства, уменьшение расхода вяжущего, снижение затрат на добычу рудного

Т а б л и ц а 5

Технологические показатели формирования хвостохранилища

Table 5. Technological indicators of tailing dump

Показатель	Вариант формирования хвостохранилища		
	1	2	3
Форма укладки отходов	Замкнутый объем из привозного материала	Ленточный блок по ширине	Ленточный блок по длине
Средство укладки	Бетононасос стрелами длиной 50 м	Бетононасос стрелами длиной 50 м	Трубопровод
Объем заскладированных отходов в блоке, тыс. м ³	138,0	1050,0	126,0
Параметры уложенного массива (блока), м:			
длина	190,0	1200,0	1200,0
ширина	150,0	50,0	6,0
высота	5,5	17,5	17,5
Площадь обнажений, м ² :			
– горизонтальных поверхностей;	28 500,0	7850,0*	600,0**
– вертикальных (наклонных)	–	92 760,0	92 760,0
Всего	28 500,0	100 610,0	93 360,0

* – принято по параметрам одного блока в работе и одного в стадии отвердения;

** – принято по размерам длины выпускного пульпопровода, обеспечивающей необходимую производительность по укладке хвостов.

сырья. Технология укладки иммобилизованных хвостов горно-металлургических производств в хранилище наклонными слоями обеспечивает удаление накапливающейся жидкости в емкости хранилища по мере его заполнения [27, 28].

НАПРАВЛЕНИЕ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

По результатам настоящей работы отмечена целесообразность полного покрытия лесом всех загрязненных локальных участков, а также всех санитарно-защитных зон вокруг горных объектов. Лес заменит гидропылеподавляющие системы для уменьшения пыления «сухих» пляжей, поскольку в лесу ветра практически нет. Территории, где ПДК загрязнений превышена, необходимо изымать из хозяйственного использования и переводить в земли природно-заповедного фонда местного значения со сплошным залесением и ограниченным посещением людьми. Возможен перевод этих территорий под посев технических культур, а в водоемах – запрет вылова рыбы, купания и др. Кроме того, нужно разработать научно-методические основы и технические средства для повышения плодородности и эффективности использования почв промышленных зон горно-металлургических производств, а также дать оценку их влияния на окружающую среду и человека [29, 30].

Выводы

Установлена возможность использования твердеющих смесей с применением в качестве вяжущего отходов горного производства и предложен оптимальный состав ингредиентов на 1 м³ смеси для заполнения воронки обрушения (1350 – 1500 кг хвостов обогатительной фабрики (песковая часть); 50 – 70 кг молотого гранулированного шлака; 350 л воды затворения); для закладки выработанного пространства камер (1400 кг нейтрализованных хвостов ГМЗ; 200 кг цемента марки М200; 400 л воды затворения); для укладки в хвостохранилище (1600 – 1800 кг хвостов ГМЗ; 200 кг цемента марки М200; 350 л воды затворения). Предложены технологические, планировочные и инженерные мероприятия для улучшения экологической обстановки на площадках горных предприятий и зоне влияния горных объектов за счет проведения предусматривающих покрытие поверхностей «сухих» пляжей хвостохранилища суглинком (по мере необходимости), организацию ливневой канализации для сбора поверхностных и профильтрованных через отвалы вод и подачи их на установку очистки шахтных вод; изоляцию поверхности отвалов почворастительным слоем, препятствующим пылевыведению и миграции загрязняющих веществ от воздействия атмосферных осадков; рекультивацию загрязненных в процессе производственной деятельности локальных участков общей площадью 20 тыс. м² и др. Рекомендовано «сухое» в иммобилизованном виде

складирование хвостов горно-металлургического производства в хвостохранилища вместо традиционного наливного способа, который включает комплекс подготовки хвостов к складированию, состоящий из корпуса обезвоживания, складов обезвоженных хвостов и цемента, узла приготовления раствора, сгустителей, конвейерных галерей и вспомогательных сооружений. При заполнении связанными хвостами всей существующей площади зеркала хвостохранилища на высоту 10 м и производительности ГМЗ до 1,5 млн т в год продлевается срок его эксплуатации на 50 лет. Показаны перспективные направления дальнейших исследований технологий и технических средств для утилизации хвостов обогащения руд с извлечением всех опасных и ценных ингредиентов с применением механической и механохимической активаций минерального сырья, а также механической и химической компоненты выщелачивания. Эти мероприятия позволяют повысить экологическую безопасность промышленных регионов путем вовлечения в производство складированных хвостов обогащения и эффективность комбинированного выщелачивания металлов из хвостов горного, обогатительного и металлургического переделов руд (электрохимических, ультразвуковых, радиационно-термических, механохимических, гидрохимических и др.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Ломоносов Г.Г., Полоник П.И., Абдалах Х. Совершенствование технологии очистных работ на основе применения пастообразных закладочных материалов // *Горный журнал*. 2000. № 2. С. 21 – 23.
3. Добыча и переработка урановых руд в Украине. Монография / Под общ. ред. А.П. Чернова. – Киев: Адеф – Украина, 2001. – 238 с.
4. Hu S. G., Lu X. J., Niu H. L. and Jin Z. Q. Research on preparation and properties of backfilling cementation material based on blast furnace slag // *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 158. P. 189 – 196.
5. Lottermoser B. *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. – New York: Springer, 2012. – 400 p.
6. Maanju S.K., Saha K. Impact of mining industry on environmental fabric – a case study of Rajasthan State in India // *Journal of Environmental Science. Toxicology and Food Technology*. 2013. Vol. 6. No. 2. P. 8 – 13.
7. Snelling P.E., Godin L., McKinnon S.D. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada // *Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013. Vol. 58. P. 166 – 179.
8. Reiter K., Heidbach O. 3-D geomechanical-numerical model of the contemporary crustal stress state in the Alberta Basin (Canada) // *Solid Earth*. 2014. No. 5. P. 1123 – 1149.
9. 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.
10. Chowdhury S.R., Yanful E.K., Pratt A.R. Recycling of nickel smelter slag for arsenic remediation – an experimental study // *Environmental Science and Pollution Research*. 2014. Vol. 21. No. 17. P. 10096 – 10107.
11. Modaihs 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.
12. Ke X., Zhou X., Wang X., Wang T., Hou H., and 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.
 13. 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.
 14. 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.
 15. Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterization: Informing material recovery and fuel production // *Waste Management*. 2017. Vol. 61. P. 40 – 57.
 16. 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 // *Int. Journal of Coal Science & Technology*. 2017. Vol. 4. No. 2. P. 129 – 146.
 17. 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.
 18. Трубецкой К.Н., Каплунов Д.Р., Рыльникова М.В. Проблемы и перспективы развития ресурсосберегающих и ресурсовоспроизводящих геотехнологий комплексного освоения недр Земли // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2012. № 4. С. 116 – 124.
 19. Комашенко В.И. Разработка взрывной технологии, снижающей вредное воздействие на окружающую среду // *Изв. Тульского государственного университета. Науки о Земле*. 2016. № 1. С. 34 – 43.
 20. Ляшенко В.И., Голик В.И. Научное и конструкторско-технологическое сопровождение развития уранового производства. Достижения и задачи // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017. № 7. С. 137 – 152.
 21. Строительство хвостохранилища на медно-молибденовом руднике Лос-Пеламбрес в Чили. – URL: <http://mineral.ru/News/34680.html> (дата обращения: 06.11.2019).
 22. Ляшенко В.И. Развитие научно-методических основ оценки эффективности природоохранных технологий и технических средств при добыче и переработке рудного сырья // *Безопасность труда в промышленности*. 2017. № 9. С. 30 – 36.
 23. Ляшенко В.И., Дятчин В.З., Лисовой И.А. Повышение безопасности горного производства на основе эффективного управления отходами добычи и переработки рудного сырья // *Безопасность труда в промышленности*. 2017. № 11. С. 16 – 22.
 24. Ляшенко В.И., Чекушина Т.В., Лисовой И.А., Лисовая Т.С. Экологическая безопасность в зоне влияния уранового производства // *Экология и промышленность России*. 2019. Т. 23. № 3. С. 60 – 65.
 25. Каплунов Д.Р., Радченко Д.Н. Принципы проектирования и выбор технологий освоения недр, обеспечивающих устойчивое развитие подземных рудников // *Горный журнал*. 2017. № 11. С. 52 – 59.
 26. 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. 1944 – 1954.
 27. Крупская Л.Т., Голубев Д.А., Растанина Н.К., Филатова М.Ю. Рекультивация поверхности хвостохранилища закрытого горного предприятия Приморского края с использованием биоремедиации // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2019. № 9. С. 138 – 148.
 28. Волков Е.П., Анушенков А.Н. Разработка технологии закладки горных выработок твердеющими смесями на основе хвостов обогащения // *Изв. вуз. Горный журнал*. 2019. № 7. С. 5 – 13.
 29. Lyashenko V., Topolnij F., Dyatchin V. Development of technologies and technical means for storage of waste processing of ore raw materials in the tailings dams // *Technology audit and production reserves*. 2019. Vol. 3. No. 49. P. 33 – 40.
 30. Ляшенко В.И., Голик В.И. Комбинированные геотехнологии предконцентрации запасов руд выщелачиванием металлов из рудного сырья // *Маркшейдерия и недропользование*. 2020. № 2 (106). С. 16 – 23.

Поступила в редакцию 5 декабря 2019 г.
После доработки 20 января 2020 г.
Принята к публикации 24 января 2020 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2020. VOL. 63. NO. 7, PP. 529–538.

INCREASING ENVIRONMENTAL SAFETY BY REDUCING TECHNOGENIC LOAD IN MINING REGIONS

V.I. Lyashenko¹, V.I. Golik², V.Z. Dyatchin³

¹ Ukrainian Research and Design Institute for Industrial Technology, Zhovti Vody, Dnipropetrovsk Region, Ukraine

² North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University), Vladikavkaz, Republic of North Ossetia – Alania, Russia

³ Institute of Entrepreneurship “Strategy”, Zhovti Vody, Dnipropetrovsk Region, Ukraine

Abstract. One of the most problematic points in technology for storing ore enrichment waste materials with hardener admixture into underground mined space and tailing dumps are the tailings of hydrometallurgical plant (HMP). They are supplied through a slurry pipeline to the tailing dump in form of pulp with solid to liquid mass ratio of 1:2. Liquid phase of the pulp after gravity separation and clarification in tailing dump is returned to technological cycle of HMP. Storage technology under consideration has several disadvantages: high nonrecurrent capital costs for construction of tailing dump at full design capacity; high probability of harmful chemicals migration into groundwater if protec-

tive shields of the base or sides of tailings are damaged. The authors have used data from literature and patent documentation considering storage parameters, laboratory and production experiments, physical modeling and selection of compositions of hardening mixtures. Analytical studies, comparative analysis of theoretical and practical results by standard and new methods were performed. Possibility of using hardening mixtures with adjacent production wastes used as binders was established. Optimal composition of ingredients per 1 m³ of hardening mixture is proposed as follows: 1350 – 1500 kg of HMP tailings; 50 – 70 kg of binder (cement); 350 liters of mixing water. Proposed technology of ore enrichment waste storage into underground mined space and tailings with hardener admixture application allows using underground mined space at the enterprise production capacity of 1,500 thousand tons per year to store 50 – 55 % of tailings, and store the rest wastes cemented by binding material in repository. When filling the entire area of the tailing dump mirror of 10 m height with cemented tails and HMP capacity of up to 1.5 million tons per year, its operation life is extended by 50 years.

Keywords: ore enrichment waste, tailings, stacking technology, environmental safety, efficiency.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-7-529-538

REFERENCES

1. 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.
2. Lomonosov G.G., Polonik P.I., Abdalakh Kh. Improving extraction technology with the use of pasteous filling materials. *Gornyi zhurnal*. 2000, no. 2, pp. 21–23. (In Russ.).
3. Chernov A.P. ed. *Dobycha i pererabotka uranovikh rud v Ukraine. Monografiya* [Mining and enrichment of uranium ores in Ukraine. Monograph]. Kiev: Adef–Ukraina, 2001, 238 p. (In Russ.).
4. Hu S. G., Lu X. J., Niu H. L., Jin Z. Q. Research on preparation and properties of backfilling cementation material based on blast furnace slag. *Advanced Materials Research*. 2011, vol. 158, pp. 189–196.
5. Lottermoser B. *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. New York: Springer, 2012, 400 p.
6. Maanju S.K., Saha K. Impact of mining industry on environmental fabric – a case study of Rajasthan State in India. *Journal of Environmental Science. Toxicology and Food Technology*. 2013, vol. 6, no. 2, pp. 8–13.
7. Snelling P.E., Godin L., McKinnon S.D. The role of geologic structure and stress in triggering remote seismicity in Creighton Mine, Sudbury, Canada. *Int. Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2013, vol. 58, pp. 166–179.
8. Reiter K., Heidbach O. 3-D geomechanical-numerical model of the contemporary crustal stress state in the Alberta Basin (Canada). *Solid Earth*. 2014, no. 5, pp. 1123–1149.
9. 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.
10. Chowdhury S.R., Yanful E.K., Pratt A.R. Recycling of nickel smelter slag for arsenic remediation – an experimental study. *Environmental Science and Pollution Research*. 2014, vol. 21, no. 17, pp. 10096–10107.
11. 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.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. Vrancken C., Longhurst P.J., Wagland S.T. Critical review of real-time methods for solid waste characterization: Informing material recovery and fuel production. *Waste Management*. 2017, vol. 61, pp. 40–57.
16. 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. *Int. Journal of Coal Science & Technology*. 2017, vol. 4, no. 2, pp. 129–146.
17. 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.
18. Trubetskoi K.N., Kaplunov D.R., Ryl'nikova M.V. Problems and prospects for development of resource-saving and resource-reproducing geotechnologies for integrated development of the Earth's deep interior. *Fiziko-tekhicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh*. 2012, no. 4, pp. 116–124. (In Russ.).
19. Komashchenko V.I. Development of explosive technology reducing environmental impact. *Izv. Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2016, no. 1, pp. 34–43 (In Russ.).
20. Lyashenko V.I., Golik V.I. Scientific, design and technological support for development of uranium production. Achievements and tasks. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2017, no. 7, pp. 137–152. (In Russ.).
21. *Stroitel'stvo khvostokhranilishcha na medno-molibdenovom rudnike Los-Pelambres v Chili* [Construction of tailing dump at the Los Pelambres Copper-Molybdenum Mine in Chile]. Available at URL: <http://mineral.ru/News/34680.html> (reference date: 06.11.2019). (In Russ.).
22. Lyashenko V.I. Development of scientific and methodological foundations for evaluating effectiveness of environmental technologies and technical equipment in extraction and processing of ore resources. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2017, no. 9, pp. 30–36. (In Russ.).
23. Lyashenko V.I., Dyatchin V.Z., Lisovoi I.A. Improving safety of mining through effective waste management of mining and processing of ore resources. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2017, no. 11, pp. 16–22. (In Russ.).
24. Lyashenko V.I., Chekushina T.V., Lisovoi I.A., Lisovaya T.S. Environmental safety in the zone of influence of uranium production. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2019, vol. 23, no. 3, pp. 60–65. (In Russ.).
25. Kaplunov D.R., Radchenko D.N. Design philosophy and choice of technologies for sustainable development of underground mines. *Gornyi Zhurnal*. 2017, no. 11, pp. 52–59. (In Russ.).
26. 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.
27. 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, no. 9, pp. 138–148. (In Russ.).
28. Volkov E.P., Anushenkov A.N. Development of technology for filling mine workings with hardening mixtures based on enrichment tailings. *Izv. vuz. Gornyi zhurnal*. 2019, no. 7, pp. 5–13. (In Russ.).
29. Lyashenko V., Topolnij F., Dyatchin V. Development of technologies and technical means for storage of waste processing of ore raw materials in the tailings dams. *Technology Audit and Production Reserves*. 2019, vol. 3, no. 49, pp. 33–40.
30. Lyashenko V.I., Golik V.I. Combined geotechnologies for pre-concentration of ore reserves by metals leaching from ores. *Marksheideriya i nedropol'zovanie*. 2020, no. 2 (106), pp. 16–23. (In Russ.).

Acknowledgements. Provided technology was designed with participation of Yu.N. Tarkhin, N.A. Khudoshina, L.A. Lyashenko, A.G. Skotarenko.

Information about the authors:

V.I. Lyashenko, Cand. Sci. (Eng.), Head of Research Department, Senior Researcher (vilyashenko2017@gmail.com)

V.I. Golik, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Mining Engineering (v.i.golik@mail.ru)

V.Z. Dyatchin, Dr. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Management and Social Work (dsveta49@mail.ru)

Received December 5, 2019

Revised January 20, 2020

Accepted January 24, 2020