

ПРИРОДООХРАННЫЕ И РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ И УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ И ОТХОДОВ

¹В.И. Ляшенко, ²Т.В. Чекушина, ³Т.В. Дудар, ⁴И.А. Лисовой

¹Государственное предприятие "Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии", г. Желтые Воды, Украина,

²Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН,

³Национальный авиационный университет, г. Киев, Украина,

⁴Уманский национальный университет садоводства, г. Умань, Украина

Дано обоснование природоохранных и ресурсосберегающих технологий и технических средств для переработки и утилизации техногенных образований и отходов горно-металлургического производства в подземные выработанные пространства (техногенные пустоты) в качестве компонентов твердеющих закладочных смесей. Это обеспечит сохранность дневной поверхности от разрушения и жизнедеятельность населения, проживающего в зоне влияния горнодобывающего региона. Установлено, что для шахт ГП "ВостГОК" (Украина) коэффициент использования отходов собственного производства для твердеющей закладки составляет от 0,45 до 0,68; гидравлической – от 0,56 до 0,75; сыпучей – 0,62, а добыча каждой тонны товарной руды сопровождается выходом 0,7–0,8 т отходов. Результаты исследований могут быть использованы при подземной разработке рудных месторождений сложной структуры и горно-металлургическом производстве.

Ключевые слова: отходы, горнометаллургическое производство, природоохранная и ресурсосберегающая технология, технические средства, жизнедеятельность населения

Статья поступила в редакцию 03.08.2020, доработана 17.09.2020, принята к публикации 11.11.2020

Environmental and Resource-Saving Technologies and Technical Equipment for Processing and Disposal of Man-General Formation and Waste

¹V.I. Lyashenko, ²T.V. Chekushina, ³T.V. Dudar, ⁴I.A. Lisovoy

¹State Enterprise "Ukrainian Research and Development and Survey Institute of Industrial Technology", 52204 Zholti Vody, Ukraine,

²Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, 11 1020 Moscow, Russia,

³National Aviation University, 03058 Kyiv, Ukraine,

⁴Uman National University of Horticulture, 20305 Uman, Ukraine

The substantiation of environmental and resource-saving technologies and technical means for the processing and disposal of man-made formations and waste from mining and metallurgical production into underground mined-out spaces (man-made voids) as components of hardening filling mixtures is given. This will ensure the safety of the day surface from destruction and the vital activity of the population living in the zone of influence of the mining region. It was found that for the mines of the State Enterprise "VostGOK" (Ukraine), the utilization rate of waste of own production for the hardening filling is from 0.45 to 0.68; hydraulic – from 0.56 to 0.75; free-flowing – 0.62, and the extraction of each ton of salable ore is accompanied by the output of 0.7–0.8 tons of waste. The research results can be used in underground mining of ore deposits of complex structure and mining and metallurgical production.

Keywords: waste, mining and metallurgical production, environmental and resource-saving technology, technical means, livelihoods of the population

Received 03.08.2020, revised 17.09.2020, accepted for publication 11.11.2020

DOI: 10.18412/1816-0395-2021-5-10-15

Добыча минерального сырья оказывает отрицательное влияние на окружающую природную среду. Нейтрализация этого влияния достигается за счет природо- и ресурсосберегающих технологий добычи полезных ис-

копаемых [1]. К таким технологиям авторы относят, прежде всего, различные варианты систем разработки с заполнением выработанных пространств твердеющими закладочными смесями различного состава и прочности. Однако их

применение осложняется из-за необходимости транспортирования по трубопроводам твердеющих закладочных смесей на значительные расстояния по вертикали и горизонтали к месту их укладки, повышенных материальных и трудо-

вых затрат, дефицита материала для приготовления смесей [2]. Поэтому разработка природоохранных и ресурсосберегающих технологий и технических средств для переработки и утилизации техногенных образований и отходов горно-металлургического производства в подземные выработанные пространства (техногенные пустоты) в качестве компонентов твердеющих закладочных смесей, — задача, имеющая важное народнохозяйственное и социальное значение, требующая оперативного решения. Данная работа является продолжением исследований, основные научные и практические результаты которых наиболее полно приведены в работе [3].

Для ее решения авторами намечены следующие задачи.

1. Определить основные направления утилизации отходов горно-металлургического производства.

2. Дать оценку технологических схем закладочных комплексов и уровня утилизации отходов горно-металлургического производства в подземное выработанное пространство в качестве компонентов твердеющих закладочных смесей.

3. Разработать кадастр отходов горно-металлургического производства и направления возможного их использования для нужд народного хозяйства.

4. Предложить новую схему "сухого" в иммобилизованном виде складирования твердых отходов горно-металлургического производства в балке вместо традиционного наливного способа.

Обсуждение результатов исследований

Отходы горно-металлургического производства (пустые породы, забалансовые по содержанию металла, руды и хвосты кучного выщелачивания) складировались, как правило, на поверхности в отвалах [4]. Анализ работы горных предприятий показывает, что при добыче и первичной переработке 1 т товарной руды попутно извлекается 1,4–1,6 т отходов, создающих экологически неблагоприятную обстановку в регионе. Утилизация отходов горно-металлургического производства (закладка выработанных пространств, сооружение плотин, специальных хранилищ и пр.) позволяет использо-

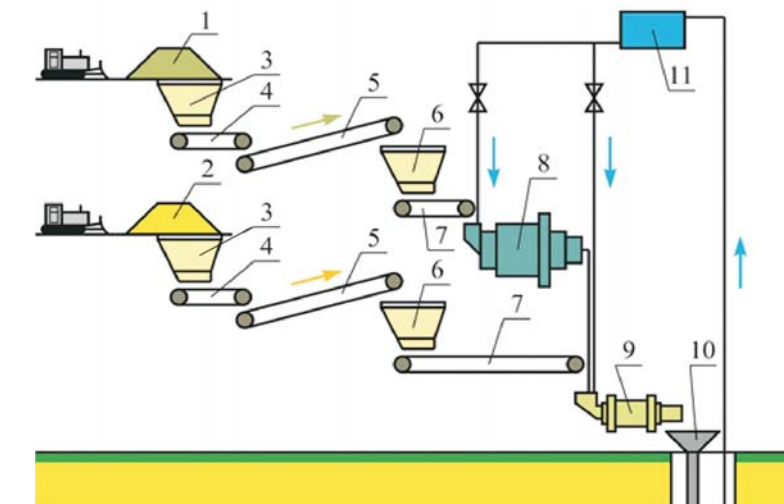


Рис. 1. Технологическая схема закладочного комплекса:

1 – шлак; 2 – песок; 3 – бункер приемный; 4 – питатель; 5 – конвейер; 6 – бункер накопительный; 7 – дозатор; 8 – мельница шаровая; 9 – смеситель; 10 – воронка приемная; 11 – емкость для воды затворения

Fig. 1. Technological scheme of the filling complex:

1 – slag; 2 – sand; 3 – receiving hopper; 4 – feeder; 5 – conveyor; 6 – storage hopper; 7 – dispenser; 8 – ball mill; 9 – mixer; 10 – receiving funnel; 11 – container for mixing water

вать до 50–60 % их общего объема, а оставшаяся часть подлежит захоронению, дезактивации и последующей рекультивации загрязненных территорий. Отходы перерабатывающего производства гидрометаллургических заводов (ГМЗ) представляют собой материалы крупностью 0,074 мм, которые транспортируются по пульпопроводам и складируются в специальных хранилищах намывного типа [5].

Опыт работы горных предприятий показывает, что отходы их производств возможно утилизировать следующим образом [6]:

- в качестве закладочного материала (в твердеющих и гидросмесях, а также сыпучей закладке) для заполнения выработанных пространств, образованных в процессе ведения горных работ;
- для заполнения выработанных пространств отработанных карьеров, воронок обрушения, различных оврагов и балок с последующей рекультивацией нарушенной поверхности;
- в строительстве плотин, дамб, хранилищ для складирования отходов с последующей их рекультивацией;
- для изготовления щебня.

Важнейшее мероприятие для повышения полноты извлечения запасов, охраны недр и окружающей среды при подземной добыче руд — переход на системы разработки с закладкой выработанного пространства твердеющими смеша-

ми различного состава и прочности. Эта технология особенно эффективна в районах с охраняемой поверхностью высокоценных земель при добыче богатых и дефицитных руд, когда затраты, связанные с закладочными работами, компенсируются вышеуказанным положительным эффектом. В последние годы объемы применения твердеющей закладки при добыче руд резко возросли. Однако при определении составов твердеющей закладочной смеси не в полной мере учтены факторы, влияющие на ее свойства, а в качестве вяжущего материала преимущественно используется цемент или молотый гранулированный шлак кислого вида с активизирующими добавками. Сейчас эти материалы стали дефицитными.

Технологический аудит утилизации отходов горно-металлургического производства. На шахтах ГП "ВостГОК" (Украина) наиболее широко распространены технологические схемы приготовления твердеющих закладочных смесей на поверхностных стационарных закладочных комплексах на основе вяжущего, изготовленного из доменного гранулированного шлака и низкосортного песка (рис. 1). Песок и гранулированный шлак из расходного склада бульдозером транспортируются в приемные бункеры, откуда эти материалы пластинчатыми питателями, а затем ленточными конвейерами доставляются в промежуточные бун-

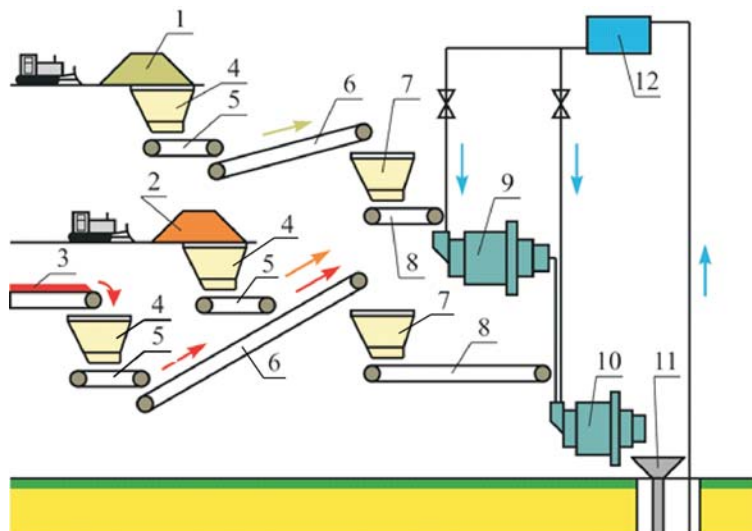


Рис. 2. Технологическая схема закладочного комплекса для приготовления твердеющей закладочной смеси с использованием дробленых пород и хвостов кучного выщелачивания:

1 – шлак доменный; 2 – суглинки; 3 – порода с ДСК; 4 – бункер приемный; 5 – питатель-дозатор; 6 – конвейер; 7 – бункер расходный; 8 – дозатор; 9, 10 – соответственно мельницы шаровая и стержневая; 11 – воронка приемная; 12 – емкость для воды

Fig. 2. Technological scheme of a filling complex for preparing a hardening filling mixture using crushed rocks and heap leaching tailings:

1 – blast-furnace slag; 2 – loam; 3 – breed with DSC; 4 – receiving hopper; 5 – dispenser feeder; 6 – conveyor; 7 – consumable hopper; 8 – dispenser; 9, 10 – ball and rod mills, respectively; 11 – receiving funnel; 12 – water tank

керы и далее на автоматические ленточные дозаторы. Для отделения комков глины и других примесей песок проходит через грохотную решетку, установленную над промежуточным бункером. 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.

Исследованиями установлено, что в качестве добавки к заполнителю твердеющей закладки можно использовать хвосты кучного выщелачивания либо дробленые горные породы. Причем прочность искусственного массива с добавками хвостов кучного выщелачивания выше, чем с применением дробленых горных пород при одинаковом расходе шлака на 1 м^3 закладки. После выщелачивания и промывки хвосты транспортируются в закладочный комплекс. Одновременно подается дробленая горная порода. Дозировка осуществляется в опреде-

ленном соотношении с песком и поступает в смеситель, в который подаются в нужном количестве молотый доменный шлак и вода затворения. Готовая твердеющая закладочная смесь по трубопроводу доставляется в выработанное пространство.

Анализ технологии возведения искусственных массивов из твердеющей закладочной смеси показывает, что в условиях шахт ГП "ВостГЭК" использование для закладки отходов горно-металлургического производства осуществимо двумя способами.

Первый способ — централизованный, основанный на приготовлении твердеющей закладочной смеси на стационарном закладочном комплексе и подачи ее в готовом виде к месту укладки по трубопроводам. Он отличается простой организацией и высокой надежностью закладочных работ. Однако необходимы большие затраты для строительства дробильно-сортировочного комплекса.

Второй способ — раздельный, включающий подачу твердеющей закладочной смеси и крупнокускового заполнителя раздельно и смешивания их при укладке непосредственно в выработанное пространство. Главное преимущество данного способа — возможность

использования закладочных материалов любой крупности, а недостаток — необходимость создания дополнительной механизированной цепи для доставки пород к закладываемой камере, образование встречных грузовых потоков, сложность организации закладочных работ. Учитывая лучшую технологичность и промышленную надежность, принята схема закладочных работ, позволяющая использовать дробильно-сортировочные комплексы закладочной установки для дробления пород и забалансовых руд, направляемых на кучное выщелачивание (рис. 2).

Установлено, что все отходы пригодны для приготовления твердеющей закладочной смеси в качестве заполнителя. Наличие сульфат-ионов в хвостах ГМЗ не оказывает существенного влияния на прочность закладки. На основе отходов горно-металлургического производства и молотого доменного гранулированного шлака разработаны сложные составы твердеющей закладочной смеси [7]. Анализ композиций твердеющей закладочной смеси показывает, что применение данной технологической схемы позволяет снизить расход дефицитного дорогостоящего вяжущего — молотого гранулированного шлака в 2–2,6 раза (с 400 до 150 $\text{кг}/\text{м}^3$) и удельные затраты на закладку почти в 2 раза, но главное — утилизировать в подземные техногенные пустоты отходы горно-металлургического производства.

Плотность закладочного массива составляет 2100–2300 $\text{кг}/\text{м}^3$. Исследованиями 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 [8].

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 надеж-

ностью в работе. Оптимальная крупность отходов определена с учетом затрат на дробление, трубопроводный транспорт и плотность их укладки в отработанные камеры и находится в пределах 25–35 мм.

В настоящее время в качестве мелкодисперсного заполнителя в композиции твердеющей закладочной смеси используют вскрышные глинистые пески вместо хвостов ГМЗ. Это связано с тем, что сегодня отсутствуют надежные в безопасном отношении и дешевые средства транспортирования пылеватых радиоактивных отходов на большие расстояния и особенно технология приготовления, транспорта и укладки в камеру твердеющей закладочной смеси на основе хвостов ГМЗ [9].

Для обоснования пригодности низкосортных песков местного Обозновского карьера (Украина) в качестве заполнителя в композиции твердеющей закладочной смеси для шахт ГП "ВостГОК" авторами выполнены исследования их характеристик, подвижности и прочностных свойств. Расход молотого гранулированного шлака из расчета на 1 м³ смеси составляет 230–365 кг, тонкость его помола не превышает 55 %, содержание частиц — 0,074 мм, подвижность твердеющей закладочной смеси — 12–12,5 см по конусу "Строй-ЦНИЛА" обеспечивалась расходом воды затворения 425–465 л [10].

Модуль крупности песков всех проб соответствовал поставленным техническим требованиям и составил 0,46–2,31. В некоторых пробах, отобранных из нижних интервалов скважин, недостаточно глинистых частиц, их содержание в пределах 5,4–23,0 %. Отдельные пробы песков имеют повышенное содержание органических примесей. Отмеченные недостатки устранимы перемешиванием песков верхних и нижних горизонтов в процессе их выемки. Прочность твердеющей закладки, полученной на основе песков Обозновского карьера, составляет 3,2; 5,3 и 6,4 МПа после твердения соответственно в течение 90, 180 и 360 сут при расходе молотого гранулированного шлака 313 кг на 1 м³ смеси. Влияние глинистых и органических веществ на прочность закладки не отмечено. После укладки закладочной смеси в формы ее твердые частицы уплотняются, отжимая избыточную воду затворе-

ния, за счет чего увеличивается ее плотность и расход исходных материалов. Коэффициент уплотнения твердеющей закладочной смеси определяется по формуле:

$$k_y = \gamma_m / \gamma_c = 1,715 / 1,495 = 1,15, \quad (1)$$

где γ_m , γ_c — масса твердого материала в массиве и исходного, кг/м³, соответственно.

Для обеспечения необходимой прочности твердеющей закладки 3 и 5 МПа расход молотого гранулированного шлака на 1 м³ смеси составляет 283 и 384 кг в массиве и 246 и 303 кг в твердеющей закладочной смеси соответственно. На основании полученных результатов исследований пески Обозновского карьера по их качеству приближаются к применяемым пескам из Морозовского карьера (Украина), обеспечивают заданную прочность закладочной смеси и удовлетворительный ее транспорт по трубопроводам к месту укладки. Рекомендуемая необходимая прочность твердеющей закладки 5,0 и 3,0 МПа обеспечивается составом из расчета на 1 м³ смеси соответственно: песок 1200 и 1250 кг; основной доменный гранулированный шлак 300 и 250 кг; вода затворения (для двух композиций) изменяется от 400 до 450 л. В закладочном массиве эти показатели составляли: песок 1365 и 1435 кг; основной доменный гранулированный шлак 350 и 280 кг соответственно.

Оценка уровня утилизации отходов горно-металлургического про-

изводства произведена по показателям их выхода на 1 т товарной руды и использования для заполнения выработанных пространств согласно формулам:

$$k_{илп} = P_n / \gamma_n \quad (2)$$

$$k_{илх} = P_x / \gamma_x \quad (3)$$

$$k_{ил0} = (P_n + P_z + P_{хв} + P_{от}) / \gamma_p, \quad (4)$$

где $k_{илп}$, $k_{илх}$, $k_{ил0}$ — соответственно коэффициенты использования горных пород, хвостов и отходов для заполнения выработанных пространств, доли ед.; P_n , P_x — соответственно вес породы и хвостов в 1 м³ закладки в массиве, т/м³; γ_n , γ_x — соответственно плотность горной породы и хвостов (исходного материала) в массиве, м/м³; P_z , $P_{хв}$, $P_{от}$ — соответственно вес забалансовой, по содержанию полезного компонента, руды, хвостов кучного выщелачивания и хвостов гидрометаллургического передела, т/м³; γ_p — плотность руды, т/м³.

Плотность твердеющей закладочной смеси с добавками дробленого материала определяется согласно формуле:

$$\gamma_3 = \gamma_{ис} + P_{дл} [(1 - \gamma_{ис}) / \gamma_n] \quad (5)$$

где γ_3 — плотность твердеющей закладочной смеси с добавками дробленых горных пород, кг/м³; $\gamma_{ис}$ — плотность песчаношлаковой твердеющей закладочной смеси, кг/м³; $P_{дл}$ — масса добавки дробленной горной породы, кг/м³.

На основании проведенных исследований авторами разработан кадастр для отходов горных предприятий, который дает оценочную характеристику и направ-

Кадастр твердых отходов горно-металлургического производства
Inventory of solid waste of mining and metallurgical production

Отходы	Крупность отходов диаметром d , мм	Источник получения	Выход от общего объема горной массы, %	Направление возможного использования
Пустая порода (крупнокусковые)	-350 (-500)	Горные капитальные выработки	3–4	Строительный материал
Забалансовая руда (крупнокусковые)	-350 (-500)	Горно-подготовительные и нарезные выработки	10–12	Закладочное сырье, частично стройматериалы
	-350 (-500)	Очистные выработки	3–5	Закладочное сырье после переработки
	+50 -250	Отсортировка на рудо-обогащительной фабрике (РОФ)	20–30	То же
Песковые	-0,5 +0,043	Гидрометаллургический передел товарной руды	17–22	Закладочное сырье, частично направляются в хвостохранилище
Илистые	-0,043			

Примечание. Крупность твердых отходов, прошедших через сито с определенным диаметром d , обозначен -, а оставшихся на сите +.

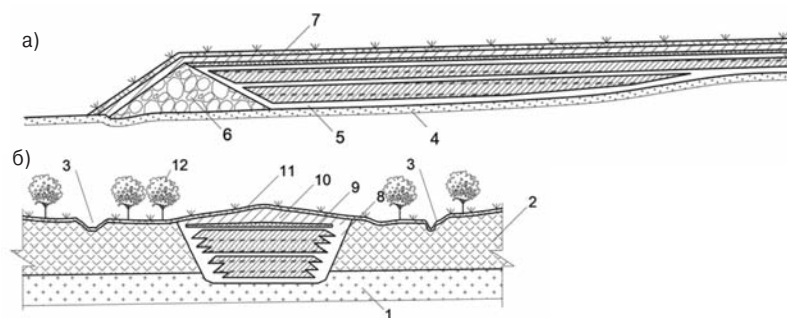


Рис. 3. Утилизация твердых отходов горно-металлургического производства в балке (а, б – продольное и поперечное сечения):
 1 – супесь; 2 – суглинок; 3 – дренажная канава; 4 – основание балки; 5 – анти-фильтрационный слой из глины; 6 – отвал пустой породы; 7 – сорбционный слой из суглинка мощностью 0,5 м; 8 – гидроизоляция из глины; 9 – биопроницающий дренажный слой щебня; 10 – гидроизоляционный слой суглинка мощностью 1,5 м; 11 – плодородная почва мощностью 0,3 м; 12 – деревья (должна быть вся территория покрыта лесом после нанесения плодородной почвы)

Fig. 3. Scheme of utilization of solid waste of mining and metallurgical production in a beam (a, b – longitudinal and cross sections):
 1 – sandy loam; 2 – loam; 3 – drainage ditch; 4 – the base of the beam; 5 – anti-filtration clay layer; 6 – waste rock dump; 7 – sorption layer of loam, 0.5 m thick; 8 – clay waterproofing; 9 – bio-penetrating crushed stone drainage layer; 10 – a waterproofing layer of loam with a thickness of 1.5 m; 11 – fertile soil 0.3 m thick; 12 – trees (the entire area should be covered with forest after applying fertile soil)

ления их возможного использования для нужд народного хозяйства (см. таблицу). На ряде шахт развитых горнодобывающих стран мира закладочные комплексы используются для приготовления твердеющих закладочных смесей, а на некоторых — и местного вяжущего из доменного шлака; дробильно-сортировочные комплексы — для переработки скальных отходов в щебень, тепляки и т.п. В период конверсии основного производства на горных предприятиях оборудование этих комплексов может быть эффективно использовано для производства строительных изделий и конструкций [11].

На шахтах ГП "ВостГЭК" действующие закладочные комплексы можно использовать для производства шлакоблоков, бетонных блоков для фундаментов и других строительных изделий. При этом из привозного доменного гранулированного шлака в действующих шаровых мельницах можно получить местное вяжущее — шлакощелочной цемент, а на дробильно-сортировочном комплексе — собственный щебень из пустых пород. Это позволит обеспечить занятые высвобождаемых из горнодобывающего производства трудящихся и получить дополнительные средства на репрофилирование закладочного хозяйства в строительные цеха [12].

Вопросы сооружения дамб и плотин из отходов горнодобывающих и перерабатывающих производств для хранилищ широко

изучены и проработаны. Имеются нормативно-технические документы, в которых указаны наиболее целесообразные составы композиций из отходов и вяжущего, способы, техника и технология их транспорта и укладки. Предложены специальные комплексы для обезвоживания хвостов ГМЗ, приготовления из них и вяжущего твердеющей смеси и последующего сооружения плотин [13]. Организация "сухого" в иммобилизованном виде складирования отходов горно-металлургического производства в балке вместо традиционного наливного способа приведена на рис. 3.

С этой целью предусматривается разделение хвостовой пульпы на твердую и жидкую фазы. Жидкая фаза возвращается на ГМЗ в оборотный цикл, а твердая после обезвоживания на фильтрах смешивается с вяжущим и укладывается на предварительно подготовленную поверхность хвостохранилища высотой до 10 м. После достижения необходимой прочности массив рекультивируется.

Внедрение результатов исследований

Предложены новые природоохранные и ресурсосберегающие технологии и технические средства для утилизации отходов горно-металлургического производства в подземное выработанное пространство в качестве компонентов твердеющих закладочных смесей

(вяжущего, инертного заполнителя и воды затворения), которые дали положительные результаты при подземной разработке рудных месторождений сложной структуры Российской Федерации, Северного Кавказа, Украины, Северного Казахстана и др. развитых горнодобывающих стран мира [14].

Экология горного производства по-прежнему развивается по пути управления процессом формирования техногенных месторождений в ходе их разработки и перевода неактивных запасов техногенных месторождений в активные путем воздействия на них физико-химическими процессами. Кроме того, необходимо разработать научно-методические основы, технологии и технические средства для повышения плодородности и эффективности использования почв промышленных зон горных объектов, а также дать оценку их влияния на окружающую среду и человека с учетом отдаленных во времени последствий [15].

Выводы

Определены основные направления утилизации отходов горно-металлургического производства (закладка выработанных пространств, сооружение плотин специальных хранилищ и пр.), позволяющие использовать до 50–60 % их общего объема, а оставшаяся часть подлежит захоронению и последующей рекультивации загрязненных территорий.

Установлено, что для шахт ГП "ВостГЭК" (Украина) коэффициент использования отходов собственного производства в твердеющей закладке составляет от 0,45 до 0,68; гидравлической — от 0,56 до 0,75; сыпучей — 0,62, а добыча каждой тонны товарной руды сопровождается выходом 0,7–0,8 т отходов.

Разработан кадастр отходов горно-металлургического производства в зависимости от их крупности, источника получения, выхода от общего объема горной массы и направления возможного использования для нужд народного хозяйства.

Предложена новая схема "сухого" в иммобилизованном виде складирования твердых отходов горно-металлургического производства в балке вместо традиционного наливного способа.

Литература

1. Lyashenko V., Khomenko O., Topolnij F., Golik V. Development of natural underground ore mining technologies in energy distributed massifs. *Technology Audit And Production Reserves*. 2020. 1 (3(51)). P. 17–24. DOI: [http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372-2020.51\(1\),17-24](http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372-2020.51(1),17-24).
2. Добыча и переработка урановых руд. Под общ. ред. А.П. Чернова. Киев, Адеф-Украина, 2001. 238 с.
3. Ляшенко В.И., Чекушина Т.В., Дудар Т.В., Лисовой И.А. Природоохранные и ресурсосберегающие технологии погашения пустот при подземной добыче руд. *Экология и промышленность России*. 2020. Т. 24. № 8. С. 28–33. DOI: [10.18412/1816-0395-2020-8-28-33](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-8-28-33).
4. 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.
5. Khani A., Baghbanan A., Norouzi S., Hashemolhosseini H. Effects of fracture geometry and Wittke W. Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM). Verlag, Wilhelm Ernst & Sohn, 2014. 875 p.
6. Shabanimashcool M., Li C. C. Analytical approaches for studying the stability of laminated roof strata. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015. Vol. 79. P. 99–108.
7. Steinacker S.R., Antrekowitsch J. Treatment of Residues from the Copper Industry with an Alternative Approach for Electric Furnace Slag. *BHM*. 2017. Vol. 162. Iss. 7. P. 252–257.
8. Sarfo P., Das A., Wyss G., Young C. Recovery of metals values from copper slag and reuse of residual secondary slag. *Waste Management*. December 2017. Vol. 70. P. 272–281.
9. Ляшенко В.И., Дятчин В.З., Лисовой И.А. Повышение экологической безопасности горного производства на основе использования отходов добычи и переработки рудного сырья. *Экология и промышленность России*. 2018. Т. 22. № 4. С. 4–10.
10. Malanchuk Z., Korniienko V., Malanchuk Ye., Soroka V., Vasylychuk O. Modeling the formation of high metal concentration zones in man-made deposits. *Mining of Mineral Deposits*. 2018. Vol. 12. Iss. 2. P. 76–84. <https://doi.org/10.15407/mining12.02.076>.
11. Filonenko O. Sustainable development of Ukrainian iron and steel industry enterprises in regards to the bulk manufacturing waste recycling efficiency improvement. *Mining of Mineral Deposits*. 2018. Vol. 12. Iss. 1. P. 115–122. <https://doi.org/10.15407/mining12.01.115>.
12. Petlovanyi M., Kuzmenko O., Lozynskiy V., Popovych V., Sai K., Saik P. Review of man-made mineral formations accumulation and prospects of their developing in mining industrial regions in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*. 2019. Vol. 13. Iss. 1. P. 24–38. <https://doi.org/10.33271/mining13.01.024>.
13. 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.
14. Ляшенко В.И., Голик В.И., Дятчин В.З. Складирование хвостов в подземное выработанное пространство и хвостохранилище в виде твердеющих масс. Обогащение руд. 2020. № 1. С. 41–47. DOI: [10.17580/or.2020.01.08](https://doi.org/10.17580/or.2020.01.08).
15. Ляшенко В.И., Хоменко О.Е., Голик В.И. Развитие природоохранных и ресурсосберегающих технологий подземной добычи руд в энергонарушенных массивах. *Горные науки и технологии*. 2020. Т. 5. № 2. С. 104–118. DOI: [10.17073/2500-0632-2020-2-104-118](https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-104-118).

References

1. Lyashenko V., Khomenko O., Topolnij F., Golik V. Development of natural underground ore mining technologies in energy distributed massifs. *Technology Audit And Production Reserves*. 2020. 1 (3(51)). P. 17–24. DOI: [http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372-2020.51\(1\),17-24](http://dx.doi.org/10.15587/2312-8372-2020.51(1),17-24).
2. Dobycha i pererabotka uranovykh rud. Pod obshch. red. A.P. Chernova. Kiev, Adef-Ukraina, 2001. 238 s.
3. Lyashenko V.I., Chekushina T.V., Dudar T.V., Lisovoi I.A. Prirodookhrannye i resursosberegayushchie tekhnologii pogasheniya pustot pri podzemnoi dobyche rud. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2020. T. 24. № 8. S. 28–33. DOI: [10.18412/1816-0395-2020-8-28-33](https://doi.org/10.18412/1816-0395-2020-8-28-33).
4. 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.
5. Khani A., Baghbanan A., Norouzi S., Hashemolhosseini H. Effects of fracture geometry and Wittke W. Rock Mechanics Based on an Anisotropic Jointed Rock Model (AJRM). Verlag, Wilhelm Ernst & Sohn, 2014. 875 p.
6. Shabanimashcool M., Li C. C. Analytical approaches for studying the stability of laminated roof strata. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2015. Vol. 79. P. 99–108.
7. Steinacker S.R., Antrekowitsch J. Treatment of Residues from the Copper Industry with an Alternative Approach for Electric Furnace Slag. *BHM*. 2017. Vol. 162. Iss. 7. P. 252–257.
8. Sarfo P., Das A., Wyss G., Young C. Recovery of metals values from copper slag and reuse of residual secondary slag. *Waste Management*. December 2017. Vol. 70. P. 272–281.
9. Lyashenko V.I., Dyatchin V.Z., Lisovoi I.A. Povyshenie ekologicheskoi bezopasnosti gornogo proizvodstva na osnove ispol'zovaniya otkhodov dobychi i pererabotki rudnogo syr'ya. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2018. T. 22. № 4. S. 4–10.
10. Malanchuk Z., Korniienko V., Malanchuk Ye., Soroka V., Vasylychuk O. Modeling the formation of high metal concentration zones in man-made deposits. *Mining of Mineral Deposits*. 2018. Vol. 12. Iss. 2. P. 76–84. <https://doi.org/10.15407/mining12.02.076>.
11. Filonenko O. Sustainable development of Ukrainian iron and steel industry enterprises in regards to the bulk manufacturing waste recycling efficiency improvement. *Mining of Mineral Deposits*. 2018. Vol. 12. Iss. 1. P. 115–122. <https://doi.org/10.15407/mining12.01.115>.
12. Petlovanyi M., Kuzmenko O., Lozynskiy V., Popovych V., Sai K., Saik P. Review of man-made mineral formations accumulation and prospects of their developing in mining industrial regions in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*. 2019. Vol. 13. Iss. 1. P. 24–38. <https://doi.org/10.33271/mining13.01.024>.
13. Lyashenko V.I., Chekushina T.V., Lisovoi I.A., Lisovaya T.S. Ekologicheskaya bezopasnost' v zone vliyaniya uranovogo proizvodstva. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2019. T. 23. № 3. S. 60–65.
14. Lyashenko V.I., Golik V.I., Dyatchin V.Z. Skladirovanie khvostov v podzemnoe vyrabotannoe prostranstvo i khvostokhranilishche v vide tverdeyushchikh mass. *Obogashchenie rud*. 2020. № 1. S. 41–47. DOI: [10.17580/or.2020.01.08](https://doi.org/10.17580/or.2020.01.08).
15. Lyashenko V.I., Khomenko O.E., Golik V.I. Razvitie prirodookhrannykh i resursosberegayushchikh tekhnologii podzemnoi dobychi rud v energonarushennykh massivakh. *Gornye nauki i tekhnologii*. 2020. T. 5. № 2. S. 104–118. DOI: [10.17073/2500-0632-2020-2-104-118](https://doi.org/10.17073/2500-0632-2020-2-104-118).

В.И. Ляшенко – канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник, Государственное предприятие "Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии", e-mail: viyashenko2017@gmail.com • Т.В. Чекушина – канд. техн. наук, вед. науч. сотрудник, Институт проблем комплексного освоения недр имени академика Н.В. Мельникова РАН, e-mail: taniya_ch@mail.ru • Т.В. Дудар – д-р техн. наук, доцент, Национальный авиационный университет, e-mail: dudar@nau.edu.ua • И.А. Лисовой – канд. техн. наук, заместитель декана, Уманский национальный университет садоводства, e-mail: lisov.iv.ol@gmail.com

V.I. Lyashenko – Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Fellow, State Enterprise "Ukrainian Research and Development and Survey Institute of Industrial Technology", e-mail: viyashenko2017@gmail.com • T.V. Chekushina – Cand. Sci. (Eng.), Leading Research Fellow, Institute of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources Russian Academy of Sciences, e-mail: taniya_ch@mail.ru • T.V. Dudar – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, National Aviation University, e-mail: dudar@nau.edu.ua • I.A. Lisovoy – Cand. Sci. (Eng.), Associate Dean, Uman National University of Horticulture, e-mail: lisov.iv.ol@gmail.com