

УДК 627.824(088.8)  
DOI: 10.15587/2312-8372.2019.184940

## **РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ СКЛАДИРОВАНИЯ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ РУДНОГО СЫРЬЯ В ХВОСТОХРАНИЛИЩА**

**Ляшенко В. И., Топольный Ф. Ф., Дятчин В. З.**

## **ROZROBKA TECHNOLOGIJ TA TEHNICHNIH ZASOBIV DLYA SKLADUVANНЯ VIDXODIV PEREROBKI RUDNOJ SIROVINI V XВОСТОСХОВИЩА**

**Ляшенко В. І., Топольний Ф. П., Дятчин В. З.**

## **DEVELOPMENT OF TECHNOLOGIES AND TECHNICAL MEANS FOR STORAGE OF WASTE PROCESSING OF ORE RAW MATERIALS IN THE TAILINGS DAMS**

**Lyashenko V., Topolnij F., Dyatchin V.**

*Объектом исследования являются технология и технические средства для складирования отходов переработки рудного сырья в подземное выработанное пространство и хвостохранилища с добавкой отвердителя. 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. Данная 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 использовались данные литературных источников и патентной документации в области обоснования параметров хранилищ, лабораторные и производственные эксперименты, физическое моделирование и подбор составов твердеющих смесей. Выполнены аналитические исследования, сравнительный анализ теоретических и практических результатов по стандартным и новым методикам с участием авторов.*

*Получен и сформулирован механизм воздействия миграционных пылевых и водных потоков из массива хранилищ хвостов обогащения и металлургического передела металлосодержащих руд. Показано, что миграция пыли прекращается при достижении прочности закрепленного массива на сжатие  $(1,0-1,5) \cdot 10^5$  МПа и скорости воздушного потока 15 м/с. Установлена*

возможность использования твердеющих смесей с применением в качестве вяжущего отходов смежного производства. Предложен оптимальный состав их ингредиентов на 1 м<sup>3</sup> смеси:

- хвосты ГМЗ – 1350–1500 кг;
- вяжущее (цемент) – 50–70 кг;
- вода затворения – 350 л.

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 50–55 % хвостов использовать для закладки выработанного пространства (830 тыс. т/год). А остальную часть, соединенную с вяжущим материалом, складировать в хранилище (670 тыс. т/год). Благодаря этому обеспечивается возможность заполнения связанными хвостами всей существующей площади зеркала хвостохранилища на высоту 10 м.

**Ключевые слова:** отходы переработки рудного сырья, гидрометаллургическое производство, хвостохранилища, технологии укладки, экологическая безопасность.

Об'єктом дослідження є технологія і технічні засоби для складування відходів переробки рудної сировини в підземний вироблений простір і хвостосховища з добавкою затверджувача. Одним з найбільш проблемних місць є технологія складування відходів переробки рудної сировини, згідно з якою хвости гідрометалургійного заводу (ГМЗ) направляються по пульпопроводу в хвостосховище у вигляді пульпи з співвідношенням по масі «тверде – рідке»: 1:2. Рідка фаза пульпи після відстоювання і освітлення в хвостосховищі повертається в технологічний цикл на ГМЗ. Дана технологія складування має ряд недоліків: високі одноразові капітальні витрати на будівництво хвостосховища на повну проектну потужність; велика ймовірність міграції шкідливих хімічних речовин в підземні води при пошкодженні захисних екранів основи або бортів хвостосховища.

В ході дослідження використовувалися дані літературних джерел і патентної документації в області обґрунтування параметрів сховищ, лабораторні та виробничі експерименти, фізичне моделювання і підбір складів твердіючих сумішей. Виконано аналітичні дослідження, порівняльний аналіз теоретичних і практичних результатів за стандартними і новими методиками за участю авторів.

Отримано і сформульовано механізм впливу міграційних пилових і водних потоків з масиву сховищ хвостів збагачення і металургійного переділу металовмісних руд. Показано, що міграція пилу припиняється при досягненні міцності закріпленого масиву на стиск  $(1,0–1,5) \cdot 10^5$  МПа і швидкості повітряного потоку 15 м/с.

Встановлено можливість використання твердіючих сумішей із застосуванням в якості вяжущого відходів суміжного виробництва. Запропоновано оптимальний склад інгредієнтів на 1 м<sup>3</sup> суміші:

- хвости ГМЗ – 1350–1500 кг;

- в'язуче (цемент) – 50–70 кг;
- вода замішування – 350 л.

Запропонована технологія складування відходів переробки рудної сировини в підземний вироблений простір і хвостосховища з додавкою затверджувача дозволяє при виробничій потужності підприємства 1500 тис. т/рік 50–55 % хвостів використовувати для закладки виробленого простору (830 тис. т/рік). А іншу частину, з'єднану з в'язучим матеріалом, складувати в сховище (670 тис. т/рік). Завдяки цьому забезпечується можливість заповнення пов'язаними хвостами всієї існуючої площі дзеркала хвостосховища на висоту 10 м.

**Ключові слова:** відходи переробки рудної сировини, гідрометалургійне виробництво, хвостосховища, технології укладання, екологічна безпека.

## 1. Введение

Природоохранные технологии и технические средства в развитых горнодобывающих странах совершенствуются с учетом экологических, экономических, технологических и социальных факторов [1, 2]. Один из путей снижения техногенной нагрузки в зоне влияния горнодобывающих предприятий – совершенствование технологий складирования хвостов после гидроциклонирования и добавки отвердителя [3, 4].

Поэтому актуальным является разработка технологий и технических средств для складирования отходов переработки рудного сырья в подземное выработанное пространство и хвостохранилища с добавкой отвердителя.

## 2. Объект исследования и его технологический аудит

*Объект исследования* – технологии и технические средства для складирования отходов переработки рудного сырья в подземное выработанное пространство и хвостохранилища с добавкой отвердителя.

*Хвостохранилище* – комплекс сооружений, предназначенных для складирования хвостов переработки руд – тонкоизмельченной минеральной массы, образующейся при обогащении руд на горнорудных предприятиях. Хвосты поступают в хвостохранилище в виде пульпы с отношением количества твердых минеральных частиц к воде, достигающим 1:15–1:30. На практике это соотношение колеблется от 1:0,3 до 1:70. Твердые частицы осаждаются, а осветленная вода отводится для повторного использования или сбрасывается в водоем. В состав объектов хвостохранилища входят первичная дамба и дамбы последующих ярусов, противофильтрационные устройства, дренажи, водосбросные сооружения, системы гидротранспорта и пылеподавления.

*Хвосты* гидрометаллургического производства – твердые частицы, образующиеся в результате гидрометаллургической переработки руды, размерами от долей миллиметра до сантиметра и с содержанием не извлеченных ингредиентов.

*Безопасность экологическая* – совокупность состояний, процессов и действий, обеспечивающих экологический баланс в окружающей среде и не наносящих жизненно важного ущерба природной среде и человеку.

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. Данная 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.

### **3. Цель и задачи исследования**

*Цель исследования* – разработка технологий и технических средств для складирования отходов переработки рудного сырья в подземное выработанное пространство и хвостохранилища с добавкой отвердителя.

Для достижения поставленной цели необходимо выполнить такие задачи:

1. Систематизировать технологии и технические средства для складирования отходов переработки рудного сырья в подземное выработанное пространство и хвостохранилища с добавкой отвердителя.
2. Установить возможность использования твердеющих смесей с применением в качестве вяжущего отходов смежного производства и предложить оптимальный состав их ингредиентов на 1 м<sup>3</sup> смеси.
3. Рекомендовать аналитическую модель определения эффективности горного производства путем сравнения вариантов разработки месторождений (включая техногенные) с учетом затрат на всех переделах.
4. Предложить технологии и технические средства для использования их в технико-экономическом обосновании строительства предприятия на базе Новоконстантиновского рудного месторождения (Государственное предприятие «Восточный горно-обогатительный комбинат» – ГП «ВостГОК», г. Жёлтые Воды, Украина).

### **4. Исследование существующих решений проблемы**

В мировой практике основным способом охраны окружающей природной среды и человека от вредного влияния промышленных отходов, содержащих радионуклиды, является их хранение в изолированных условиях (подземных выработанных пространствах и специальных хранилищах на дневной поверхности) [5, 6]. Наиболее перспективным способом создания хвостохранилищ является комбинированный, при котором отходы переработки укладываются в специально оборудованное естественное углубление с ограждающей дамбой [7, 8]. При этом одна часть сооружается из инертных грунтов, а другая – из переработанного рудного материала в смеси с вяжущим компонентом [9, 10].

Авторами выполнен анализ литературных источников и патентной документации в области складирования хвостов после гидроциклонирования и добавки отвердителя в хвостохранилища [11, 12]. А также лабораторный и производственный эксперименты, физическое моделирование и подбор составов твердеющих смесей по стандартным и новым методикам [13, 14].

На основе проведенного анализа можно сделать вывод о том, что 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 и перевода в твердое состояние [17, 18].

## **5. Методы исследований**

При исследовании были проведены следующие этапы исследования:

- анализ мирового опыта обращения с отходами гидрометаллургического передела радиоактивных руд;
- сбор и анализ материалов по технологиям складирования и иммобилизации отходов горного производства в поверхностных хранилищах;
- определение эффективной технологии иммобилизации и складирования хвостов ГМЗ;
- определение требований к физико-механическим, радиохимическим показателям складированных отходов и к устройству хвостохранилища;
- установление физико-механических показателей смеси хвостов ГМЗ с вяжущим (подвижность, сцепление, прочность, фильтрация, выщелачиваемость) и радиологических показателей (коэффициент эманирования, плотность потока радона);
- 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.

## **6. Результаты исследования**

### **6.1. Характеристика хвостохранилищ гидрометаллургического производства**

На них применяются поочередный многоэтажный намыв хвостов, от дамб по периметру всей чаши хвостохранилища. Выпуск пульпы бывает как подводный, так и надводный. При таком складировании большая часть намывных хвостов находится под водой. Однако, как в процессе намыва, так и после окончания складирования на хвостохранилищах образуются обезвоженные площади (пляж намыва), находящиеся в таком состоянии несколько месяцев в году. Пляж намыва (слабонаклонная плоскость в сторону пруда-отстойника) образуется по всему

периметру хвостохранилища. Ширина этой плоскости зависит от применяемого способа складирования хвостов и колеблется в интервале от 100 до 500 м. Имеется опыт карточного намыва хвостов, при котором хвостохранилище разбивается на отсеки (карты), отделенные от основного разделительными дамбами. Выпуск пульпы производится на одном из участков карты и намывается слоями, после чего выпускные патрубки на этом участке перекрываются, а в работу включается следующий по порядку участок. При достижении высоты слоя проектных отметок намыв его прекращается, карта останавливается на «отстой», длительность которого зависит от размеров, количества карт на хвостохранилище и интенсивности процесса складирования и составляет 1,5–2 года.

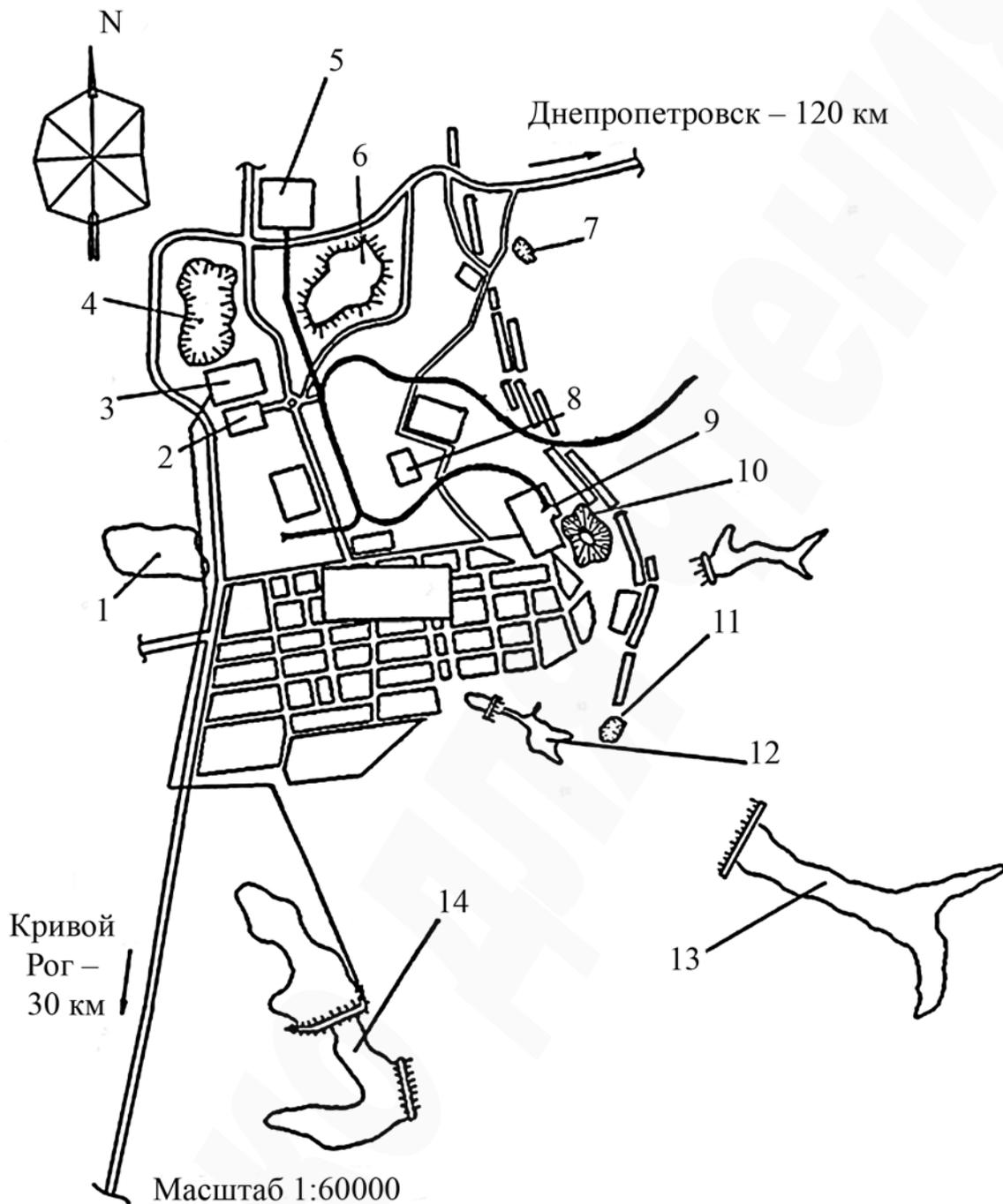
Так, с начала эксплуатации Желтореченского железорудного (1895 г.) и уранового (1951 г.) месторождений (Украина) образовались (рис. 1):

– 2 карьера «Габаевский» и «Веселоивановский», 4 хвостохранилища – отработанный карьер бурых железняков (КБЖ), «Разбери» и «Терновская» и воронка обрушения – как следствие подземной разработки железорудного месторождения системами с принудительным обрушением руд и вмещающих пород (ГП «ВостГОК», г. Жёлтые Воды, Украина);

– балка «Щербаковская» (ГП «ВостГОК», Петровский район, Украина) (рис. 2, а).

Таким образом, на действующих хвостохранилищах имеются обезвоженные участки (надводные пляжи намывы, площади карт, находящиеся на «отстое» внешние откосы дамб и плотин) являются интенсивным источником пылеобразования. Они находятся в таком состоянии по несколько месяцев в году. В летний период поверхность нагревается до 80 °С и сухой слой достигает 30–50 см. Сухие хвосты представляют собой рыхлопесчаный материал, между частицами которого нет устойчивых связей. Содержание пылевых частиц  $S \leq 0,07$  мм составляет более 65 %, а частиц фракции  $\geq 0,01$  мм – до 25 %.

Добыча руд на шахтах и карьерах привела к образованию отвалов пустых пород и забалансовых, по содержанию полезных компонентов, руд и нарушению плодородных земель, которые на сегодня частично восстановлены горнотехнической рекультивацией (рис. 2, б).



**Рис. 1.** Желтоводская промышленная площадка: 1 – золоотвал отходов теплоэлектростанции (ТЭЦ); 2 – ТЭЦ; 3 – гидрометаллургический завод; 4 – хвостохранилище карьера бурых железняков; 5 – сернокислотный завод; 6 – рекультивированный отвал; 7 – карьер «Веселоивановский»; 8, 9 – шахты «Ольховская» и «Новая»; 10 – зона обрушения (провал); 11 – карьер «Габаевский»; 12, 13, 14 – хвостохранилища «Т», «Р» и «Щ»



*а*



*б*

**Рис. 2.** Общий вид хвостохранилищ по складированию отходов гидromеталлургической переработки руд: *а* – балка «Щербаковская»; *б* – горнотехническая рекультивация на хвостохранилище карьера бурых железняков

### **6.2. Обращение с отходами гидromеталлургического производства**

Обращение с отходами гидromеталлургического производства заключается в их складировании в хвостохранилищах на территории рудо-перерабатывающего предприятия или на удалении от него. Различаются три вида хвостохранилищ: намывные, наливные и комбинированные. В намывных хвостохранилищах основная часть ограждающей дамбы намывается из переработанного рудного материала, а в наливных – дамба возводится из минеральных материалов.

Одним из активных источников загрязнения окружающей среды продуктами обогащения руд являются хвостохранилища. В процессе оборудования хвостохранилищ на их поверхностях образуются обезвоженные участки большой площадью. В летние периоды поверхность нагревается до 60 °С и сухой слой достигает толщины 30–50 см. Сухие хвосты представляют собой рыхлый песчаный материал, между частицами которого (кроме незначительных сил поверхностного натяжения, молекулярных, химических связей и силикатизации) нет устойчивых связей, например, пыли. При скорости ветра 5 м/с и более поверхность хвостохранилища становится интенсивным источником выделения пыли, концентрация которой в воздухе над хранилищем и на удалении от него в несколько километров в десятки и сотни раз превышает предельно-допустимую концентрацию (ПДК).

Традиционный способ борьбы с пылью на сухих пляжах хвостохранилищ основан на закреплении пылящих поверхностей путем создания пленок или противоэрозионных корок. Увлажнение является наиболее употребляемым способом борьбы с пылью, которое широко применяется на самом высокогорном 2500 м хвостохранилище в мире Мауро на медно–молибденовом руднике Лос-Пеламбрес в Чили с 2008 г (рис. 3) [19]. Влажный пляж также не пылит, однако влага иногда испаряется и такой пляж требует дополнительной подачи воды, что очень затратно. Кроме того рекультивация таких хвостохранилищ будет затруднена из-за низкой прочности их поверхностей.

На поверхность хвостохранилищ наносят закрепители. В хвостохранилищах наливного типа легкие фракции (иловая и глинистая) концентрируются в верхнем слое пляжей. В верхнем (10–20 мм) слое находится до 90 % частиц этих фракций. Коэффициент фильтрации верхнего слоя составляет в среднем 0,02–0,03 м/сутки. Из-за малой фильтрации проникновение закрепляющих растворов вглубь хвостов не происходит и нерастворимая корка не образуется. После высыхания на поверхности закрепителя образуется тонкая пленка, которая легко разрушается и смывается водой. Большая часть закрепляющего раствора уходит по трещинам или собирается в сформированных углублениях. Противоэрозионная пленка является плоскостью скольжения с пониженными прочностными характеристиками – угол внутреннего трения и сцепление, что способствует разрушению дамб. Хвосты с различными наполнителями и добавками подвергаются природному выщелачиванию, продукты которого нарушают экосистемы окружающей среды [20, 21].



**Рис. 3.** Технология увлажнения пылящих поверхностей хвостохранилища Мауро на медно-молибденовом руднике Лос-Пеламбрес в Чили (фото) [19]

На поверхность хвостохранилищ наносят закрепители. В хвостохранилищах наливного типа легкие фракции (иловая и глинистая) концентрируются в верхнем слое пляжей. В верхнем (10–20 мм) слое находится до 90 % частиц этих фракций. Коэффициент фильтрации верхнего слоя составляет в среднем 0,02–0,03 м/сутки. Из-за малой фильтрации проникновение закрепляющих растворов вглубь хвостов не происходит и

нерастворимая корка не образуется. После высыхания на поверхности закрепителя образуется тонкая пленка, которая легко разрушается и смывается водой. Большая часть закрепляющего раствора уходит по трещинам или собирается в сформированных углублениях. Противоэрозионная пленка является плоскостью скольжения с пониженными прочностными характеристиками – угол внутреннего трения и сцепление, что способствует разрушению дамб. Хвосты с различными наполнителями и добавками подвергаются природному выщелачиванию, продукты которого нарушают экосистемы окружающей среды [20, 21].

### **6.3. Технология пылеподавления битумной эмульсией**

Для стационарного применения технологии необходимо следующее оборудование и сооружения:

- генератор эмульсии: склад битумной эмульсии;
- оборудование для загрузки и разгрузки эмульсии;
- автомобиль, трактор или вертолет;
- навесное оборудование для разбрызгивания эмульсии.

Пылеподавление осуществляется нанесением на пылящую поверхность битумной эмульсии тонким слоем. Расход битумной эмульсии составляет  $0,12 \text{ кг/м}^2$ , т. е. для защиты требуемых, например,  $1000000 \text{ м}^2$  пылящей поверхности дамбы необходимо около 120 т битумной эмульсии в год. Для приготовления 120 т эмульсии необходимо около 60 т битума, 60 т воды и 3,6 т эмульгатора.

Приготовление битумной эмульсии выполняется с помощью специального генератора эмульсии. Срок действия защиты от пыления один год. Слой нанесенной эмульсии на намывном пляже не создает противодиффузионного экрана, т. е. не уменьшает устойчивость дамбы, не загрязняет фильтрационную воду нефтепродуктами или другими вредными веществами, т. е. экологически безопасен.

Приведенный технологический способ складирования с использованием карт широко применяется, например, на Открытое акционерное общество «Южный горно-обогатительный комбинат» – ОАО «Южный ГОК» (Кривой Рог, Украина) [22, 23]. Недостатком такой технологии является ее краткий срок действия (один год), а также низкая прочность поверхностного слоя хранилища, что затруднит процесс рекультивации данного хвостохранилища. Данный технологический способ складирования отходов с использованием карт осуществляется также без включения в отходы твердеющих добавок. Поэтому, описываемые выше наклонные слои невозможно получить и обезвоживание поверхности карты растянется по времени, сдерживая сроки ее рекультивации.

### **6.4. Технология, технические средства и организация складирования отвержденных отходов первичной переработки рудного сырья**

Искусственный массив из хвостов ГМЗ создается блоками объемом равным месячной производительности комплекса подготовки хвостов. После укладки блок оставляют на месяц для набора прочности, а в это время осуществляют укладку соседнего блока. Через месяц блок, набравший требуемую прочность,

рекультивируют. Прочность массива из твердых отходов из условия безопасности работы техники на его поверхности должна составлять 2–3 МПа для верхнего несущего слоя и 1,0–1,5 МПа для остальных слоев (табл. 1).

**Таблица 1**

**Прочность твердеющей закладки на основе хвостов  
гидрометаллургического завода**

Наименование параметров	Количество замеров (образцов), шт.	Среднее значение
Плотность, т/м <sup>3</sup> :		
– 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 <sup>3</sup> :		
– твердеющей 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 <sup>3</sup> :		
– хвостов	4	1,17
– шлака	4	0,38
Прочность искусственного массива, МПа:		
– 3 мес.	4	2,83
– 6 мес.	6	5,12

По рекомендации фирмы Engineering Dobersek GmbH (Германия) при подготовке хвостов к отверждению, их обезвоживают до получения пульпы с содержанием до 80 % твердого компонента и направляют на смешение с цементом в смеситель. Технологическая схема подготовки хвостов обогащения к иммобилизации содержит корпус обезвоживания, сгуститель, смеситель, бетононасосы, дозаторы, бетонопровод, карты хвостохранилища, отводы и конвейер [24, 25]. В состав комплекса по обезвоживанию хвостов и приготовлению закладочной смеси входят: корпус обезвоживания, три сгустителя диаметром 50 м с насосной станцией, узел смешения, силосный склад цемента общей вместимостью 6 тыс. т.

Перед складированием хвостов в чашу хранилища укладывают слой песка мощностью 0,1 м для предохранения от разрывов и деформации противофильтрационной геомембраны. Конструкция чаши хранилища включает:

- уплотненный суглинок мощностью 0,5 м, плотностью  $1,6 \text{ г/см}^3$  с коэффициентом фильтрации 0,1–0,2 м/сут;
- геомембраны типа HDPE G/G (для дна) и HDPE T/G (для откосов 1,0/2,5);
- защитный слой песка мощностью 0,10 м и нагорные канавы на весь период заполнения хранилища.

После выполнения подготовительных работ укладывают и сваривают противофильтрационную геомембрану по технологии компании AGRU (Австрия). На дно хранилища укладывают геомембрану типа HDPE G/G, а по откосам – типа HDPE T/G. Уложенную геомембрану перекрывают слоем уплотненного суглинка мощностью 0,5 м для предохранения ее от повреждения.

В практике обращения с отходами переработки радиоактивных материалов наиболее часто применяется отверждение, позволяющее снизить их природное выщелачивание, стабилизировать физико-механические и радиологические свойства. В технологически развитых горнодобывающих странах оптимизируют методы отверждения отходов гидрометаллургического передела и «сухого» способа укладки хвостов в хранилища. Вокруг хранилища устраивают нагорную канаву, предотвращающую попадание дождевых вод с прилегающей территории в чашу хранилища, и ограждение высотой 2 м. В период строительства в районе низовой дамбы устраивают пруд-отстойник для сбора дождевых вод. Хранение отходов руд в отвержденном состоянии исключает выщелачивание и миграцию химических веществ в подземные воды. Отвердевшая поверхность уложенных хвостов позволяет использовать технику для рекультивации хранилища. Технология уменьшает изымаемую из обращения площадь и снижает капитальные затраты.

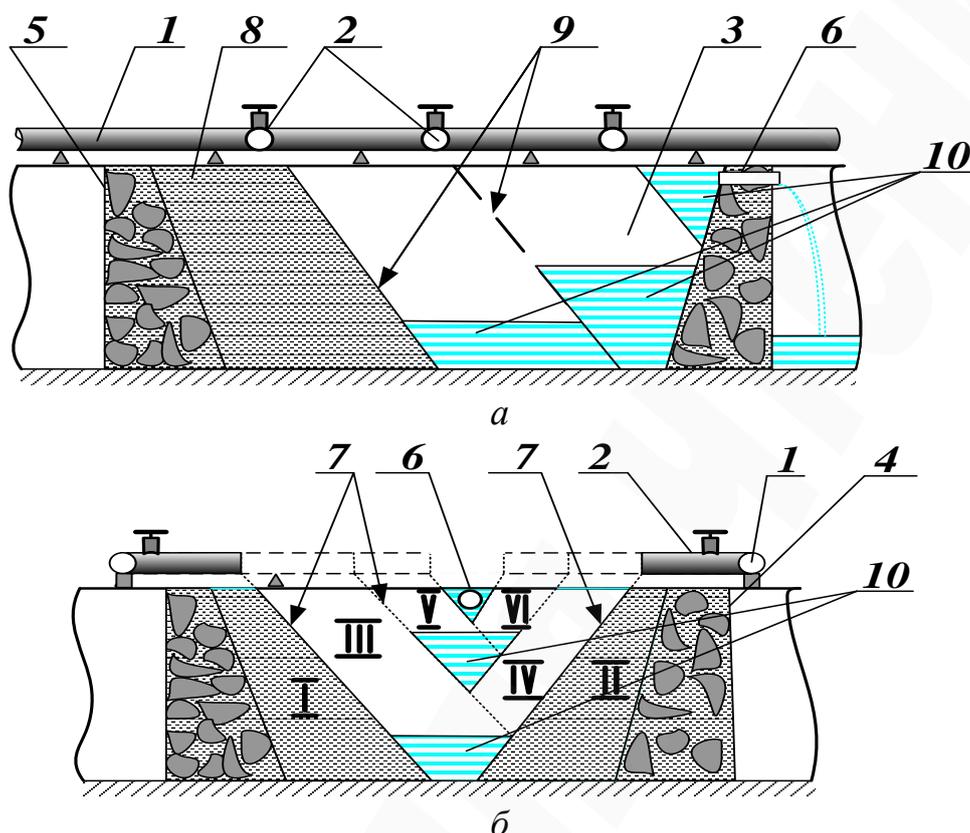
Технологии складирования отходов обогащения, предусматривающие подачу шлама в хранилище через выпуски пульпопровода слоями до разных уровней, обеспечивают растекание потока пульпы в противоположном выпуску направлении с осаждением пыли – глинистых частиц [26].

Ее недостаток заключается в том, что осветленная вода шламов накапливается на всей поверхности хранилища, а к ней добавляются дождевые осадки и сточные воды. Накопившаяся влага постепенно испаряется или отводится после завершения ее заполнения, что увеличивает время твердения шламов в хранилище и рекультивации ячеек со шламовыми отходами.

Авторы предлагают изменить последовательность заполнения ячейки шламом не по всей ее площади, а наклонными слоями в направлении от одного борта ячейки к другому. Этим обеспечивается стекание излишней воды по наклонным слоям смеси к сливному отверстию и слив (отвод) воды. Его производят из ячейки через сливные отверстия без применения специальных стационарных или плавучих водозаборных механизмов (рис. 4).

В трубопровод 1 (рис. 4) пульпу с хвостами обогащения урановых руд подают в смеси с вяжущим материалом (цементом). Через выпуски 2 пульпу укладывают в ячейку 3 шламохранилища. Трубопровод 1 с выпусками 2

располагают на продольных бортах 4 и заполнение ячейки 3 начинают через выпуски 2, расположенные вблизи поперечного борта 5. А на другом поперечном борту 5 у верхнего его края выполняют одно или несколько сливных отверстий 6.



**Рис. 4.** Технология укладки отходов гидromеталлургического производства в хвостохранилища: *а, б* – соответственно, схемы укладки хвостов в продольном и поперечном направлениях ячейки шламохранилища

Заполнение ячейки 3 хвостохранилища шламами, смешанными с цементом, осуществляют в следующей последовательности. Сначала открывают выпуск 2, например, левого продольного борта 4 и заполняют участок I, образуя наклонную поверхность 7, направленную в центр ячейки 3. Затем открывают выпуск 2 правого продольного борта 4 и заполняют участок II с наклонной поверхностью 7, направленной навстречу участку I. В процессе заполнения ячейки 3 из первых крайних отводов 2 излишняя жидкость 10 пульпы и дождевые осадки по образовавшимся наклонным поверхностям 7 начнут стекать к центру ячейки 3, способствуя быстрому отверждению участков пульпы I и II.

Нарастивая отводы 2 на левом и правом продольных бортах 4, заполняют ячейку 3 из этих же крайних отводов 2. Этим образуют участки III, IV, V, VI с наклонными поверхностями 7, направленными к центру ячейки 3, которые также способствуют стеканию лишней жидкости к центру ячейки 3. В результате, упрощается отвод воды из ячейки и ускоряется процесс отверждения пульпы на этих участках. При начальном заполнении шлама

только из крайних отводов 2 до верхнего уровня ячейки 3 образуют отвержденный слой смеси 8 с наклонной поверхностью 9, по которой излишняя жидкость 10 будет стекать на дно ячейки 3. После заполнения шлама до верхнего уровня крайние отводы 2 закрывают. Заполнение ячейки 3 начинают из следующих отводов в такой же последовательности, как и из первых. При этом образуют такие же участки (I–VI) с наклонными поверхностями 7 и последующих наклонных слоев 8.

При заполнении каждого следующего слоя смеси 8, накопившуюся в нижней части ячейки 3 воду 10, выдавливая, перемещают к противоположному поперечному борту 5. Этими же наклонными слоями 8 направляют воду 10 к сливным отверстиям 6, через которые осуществляют слив воды в следующую ячейку. После слива воды 10 сливные отверстия 6 закупоривают и завершают заполнение ячейки 3 шламовой смесью. В это время обезвоженная поверхность шлама, ранее уложенная в ячейку 3 из первых крайних отводов 2, отвердела и стала пригодной для ведения на ней рекультивационных работ, не дожидаясь заполнения всей ячейки шламом. Следовательно, сроки начала и окончания рекультивации сократятся. Предлагаемая технология укладки отходов в хранилище обеспечивает отвод воды с его поверхности за счет образования наклонных слоев, расположенных как вдоль ячейки, так и поперек ее. При этом обеспечивается перемещение скопившейся на дне ячейки воды заполняемым шламом к борту ячейки, где установлены отверстия для слива лишней воды без применения водозаборных механизмов [21, 22].

### 6.5. Эколого-экономическая эффективность горного производства

Накопление отходов добычи и переработки минерального сырья сопровождается химическим воздействием на среду токсичными компонентами отходов, среди которых наиболее опасны тяжелые металлы. Оценка использования хвостов обогащения включает такие элементы, как:

- прогнозирование роста эффективности производства;
- перевод забалансовых, по содержанию полезных компонентов, запасов в категорию балансовых;
- координация деятельности по регулированию технологических процессов;
- оценка, контроль и анализ результатов переработки.

Эффективность горного производства можно определить путем сравнения вариантов разработки месторождений (включая техногенные) с учетом затрат на всех переделах. При этом следует учитывать расходы на защиту населения (включая расходы на охрану окружающей среды, реабилитацию загрязненных и нарушенных территорий, здоровья людей и др.), проживающего в зоне влияния горных объектов согласно предложенной аналитической модели:

$$П = \sum_{i=1}^n \left[ (C_{оп} - C_{др} \pm (Y + Z_n)) \right] \frac{1}{1 + E^{t-1}} \cong max,$$

где  $П$  – прибыль от получения конечной продукции из металлосодержащих руд, ден. ед.;

$C_{др}$  – суммарная извлекаемая ценность конечной продукции из металлосодержащих руд, ден. ед.;

$C_{др}$  – суммарные затраты на добычу и получение конечной продукции, ден. ед.;

$У$  – суммарный ущерб (экономические последствия), наносимый (–) окружающей среде или предотвращаемый (+) с учетом затрат на защиту населения, проживающего в зоне влияния горных предприятий ( $З_n$ ), ден. ед.;

$E$  – коэффициент дисконтирования затрат и прибыли во времени  $t$  применения оцениваемой технологии, доли ед.

## 6.6. Результаты внедрения

Технологии с закреплением хвостов выщелачивания продуктами вторичной минерализации в течение 40 лет использовали при разработке уранового месторождения «Быкогорское» (Северный Кавказ, Республика Северная Осетия, Алания) способом подземного шахтного выщелачивания 3-х процентным раствором серной кислоты. В результате кольматационных процессов хвосты выщелачивания приобретали прочность 0,5–1,0 МПа [17, 18]. Авторами систематизированы технологии управления состоянием хвостохранилищ и предложена их классификация (табл. 2).

Таблица 2

Классификация способов управления хвостохранилищами

Технология	Вариант	Достоинства	Недостатки
Верхнего слоя	глинизация	малые затраты, наличие материалов	малая прочность
	цементация	высокая прочность	высокие затраты
	силикатизация	высокая прочность	сложность
	карбонатизация	простота, надежность, утилизация карбонатов	сложная расконсервация
	биозакрепление	простота и доступность	в комбинации
	кольматация без извлечения металлов	простота, надежность, утилизация отходов	загрязнение металлами и солями
Всего массива	без извлечения металлов	простота, надежность, утилизация продуктов электрохимии, экологичность	не используется возможность утилизации с получением товара
	с извлечением металлов	простота, окупаемость, экологичность	нет

Приведенная авторами классификация (табл. 2) отличается от известных тем, что в качестве основного критерия принят показатель выноса реагентов в природу. В результате выполненных работ по пылеподавлению по данным санитарно-эпидемиологической службы содержание пыли в воздухе над и вокруг хвостохранилища ниже предельно–допустимых концентраций.

Результаты исследования твердеющих смесей, приготовленных на основе хвостов ГМЗ для сооружения макета дамбы хвостохранилища, показали:

– 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, приготовленной на дамбовой воде, на 25 % выше, чем при технической воде;

– выбуренные керны из массива дамбы после одного года пребывания на открытом воздухе прочность не потеряли и составляют 2,0–2,3 МПа. Твердеющая смесь после 100 циклов «замораживание – оттаивание» получила незначительное шелушение поверхности и сохранность формы, в соответствии с требованием СН и П–56–76 считается морозоустойчивой.

## **7. SWOT-анализ результатов исследований**

*Strengths.* 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 50–55 % хвостов использовать для закладки выработанного пространства (830 тыс. т/год). А остальную часть, соединенную с вяжущим материалом, складировать в хранилище (670 тыс. т/год).

*Weaknesses.* Основным отрицательным влиянием строительства, эксплуатации хранилища и хранения отходов является вывод земель из пользования. Поэтому необходимо предусматривать средства на проведение следующих мероприятий:

– 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.

*Opportunities.* Предложенная технология использована Государственным предприятием «Украинский научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт промышленной технологии» (Желтые Воды, Украина) в технико-экономическом обосновании строительства предприятия на базе Новокозантиновского рудного месторождения (ГП «ВостГОК», Украина).

Для переработки техногенных отходов (хвостов), обладающих большим разнообразием минеральных форм по сравнению с обычными рудами, требуется создавать новые технологии, основанные на последних достижениях науки и техники. Необходимо проводить интенсивные исследования, направленные на решение проблемы утилизации накопленных отходов горно-металлургического производства (ГМП). Реализация эффективных методов извлечения металлов из таких отходов позволит улучшить экологическую обстановку в районах их складирования и обеспечить прирост минерально-сырьевой базы украинской промышленности. Широкое вовлечение в производство техногенных запасов хвостов обогащения руд, а также переработка отвалов забалансовых, по содержанию полезных компонентов, руд на модульных установках способствуют получению дополнительного источника удовлетворения потребности промышленности в металлах. А также

снижению загрязнения окружающей среды в развитых горнодобывающих странах мира [27].

*Threats.* Отдельно следует отметить необходимость создания защитных лесополос вдоль транспортных путей (автомобильных и железнодорожных). Территории, где ПДК загрязнений превышена, необходимо перевести под посев технических культур, в водоемах – запретить вылов рыбы, купание и др. С целью предотвращения пылевого переноса загрязненного материала за пределы хвостохранилищ санитарно-защитные полосы вокруг них целесообразно засаживать высокорослыми древесными породами, которые будут сдерживать скорость ветра над хвостохранилищами. При этом пыль будет оседать в этих лесных насаждениях и не будет поступать на другие территории, в том числе и в населённые пункты. Кроме того, нужно разработать научно-методические основы, технологии и технические средства для повышения плодородности и эффективности использования почв промышленных зон ГМП, а также дать оценку их влияния на окружающую среду и человека [20, 24].

## **8. Выводы**

1. Систематизирована технология и технические средства для складирования отходов переработки рудного сырья в подземное выработанное пространство и хвостохранилища с добавкой отвердителя. А также выполнена их классификация, отличающаяся от известных тем, что в качестве основного критерия принят показатель выноса реагентов в окружающую, геологическую и гидрогеологическую природную среду.

2. Установлена возможность использования твердеющих смесей с применением в качестве вяжущего отходов смежного производства и предложен оптимальный состав их ингредиентов на 1 м<sup>3</sup> смеси:

- хвосты ГМЗ – 1350–1500 кг;
- вяжущее (цемент) – 50–70 кг;
- вода затворения – 350 л.

3. Рекомендована аналитическая модель определения эффективности горного производства путем сравнения вариантов разработки месторождений (включая техногенные) с учетом затрат на всех переделах, отличающаяся учетом затрат и на защиту населения, проживающего в зоне влияния горных объектов. В том числе расходы на охрану окружающей среды, реабилитацию загрязненных и нарушенных территорий, здоровья людей и др.

4. Предложена технология использования ГП «УкрНИПИИПромтехнологии» в технико-экономическом обосновании строительства предприятия на базе Новоконстантиновского рудного месторождения (ГП «ВостГОК», Украина). Так, при производственной мощности предприятия 1500 тыс. т/год 50–55 % хвостов используют для закладки подземного выработанного пространства (830 тыс. т/год), а остальную часть, соединенную с вяжущим материалом складировать в хранилище (670 тыс. т/год).

## **Благодарность**

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

## Литература

1. Yuan, Y., Bolan, N., PrévotEAU, A., Vithanage, M., Biswas, J. K., Ok, Y. S., Wang, H. (2017). Applications of biochar in redox-mediated reactions. *Bioresource Technology*, 246, 271–281. doi: <http://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.154>
2. Lomonosov, G. G., Polonik, P. I., Abdalakh, Kh. (200). Sovershenstvovanie tekhnologii ochistnykh robot na osnove primeneniia pastoobraznykh zakladochnykh materialov. *Gornii zhurnal*, 2, 21–23.
3. Chernov, A. P. (Ed.) (2001). *Dobycha i pererabotka uranovikh rud v Ukraine*. Kyiv: Adef – Ukraina, 238.
4. Kvitka, V. V., Sergeev, V. E., Troter, K. et. al. (2001). Tverdeiuschie zakladochnye smesi povyshennoi plotnosti/ (firma GMSZ, Avstraliia). *Gornii zhurnal*, 5, 33–35.
5. Lottermoser, B. (2012). *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. New York: Springer, 400.
6. Maanju, S. K., Saha, K. (2013). Impact of Mining Industry on Environmental Fabric – A Case Study of Rajasthan State in India. *IOSR Journal Of Environmental Science, Toxicology And Food Technology*, 6 (2), 8–13. doi: <http://doi.org/10.9790/2402-0620813>
7. Chowdhury, S. R., Yanful, E. K., Pratt, A. R. (2014). Recycling of nickel smelter slag for arsenic remediation – an experimental study. *Environmental Science and Pollution Research*, 21 (17), 10096–10107. doi: <http://doi.org/10.1007/s11356-014-2892-x>
8. Modaihsh, A. S., Mahjoub, M. O., Nadeem, M. E. A., Ghoneim, A. M., Al-Barakah, F. N. (2016). The Air Quality, Characterization of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon, Organic Carbon, and Diurnal Variation of Particulate Matter over Riyadh City. *Journal of Environmental Protection*, 7 (9), 1198–1209. doi: <http://doi.org/10.4236/jep.2016.79107>
9. Golik, V., Komashchenko, V., Morkun, V. (2015). Feasibility of using the mill tailings for preparation of self-hardening mixtures. *Metallurgical and Mining Industry*, 3, 38–41.
10. Beiyuan, J., Awad, Y. M., Beckers, F., Tsang, D. C. W., Ok, Y. S., Rinklebe, J. (2017). Mobility and phytoavailability of As and Pb in a contaminated soil using pine sawdust biochar under systematic change of redox conditions. *Chemosphere*, 178, 110–118. doi: <http://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.03.022>
11. Soroka, M. N., Savelev, Iu. Ia. (2004). Perspektivy utilizacii khvostov gidrometallurgicheskogo peredela i droblennykh gornykh porod v vyrabotannoe prostranstvo uranodobyvaiuschikh shakht Ukrainy. *Metallurgicheskaiia i gornorudnaia promyshlennost*, 5, 91–94.
12. Gusev, Iu. P., Berezikov, E. P., Krupnik, L. A. et. al. (2008). Resursosberegaiuschie tekhnologii dobychi rudy na Malevskom rudnike Zyrianovskogo GOKa (AO «Kazcink»). *Gornii zhurnal*, 11, 20–22.
13. Kutepov, Iu. I., Kutepova, N. A., Zharikov, V. P. (2011). Inzhenerno–geologicheskoe i ekologicheskoe obosnovanie rekultivacii gidrootvalov Kuzbassa. *Gornii informacionno-analiticheskii biulleten*, 2, 34–42.
14. Trubetskoy, K. N., Kaplunov, D. R., Ryl'nikova, M. V. (2012). Problems and prospects in the resource-saving and resource-reproducing geotechnology

development for comprehensive mineral wealth development. *Journal of Mining Science*, 48 (4), 688–693. doi: <http://doi.org/10.1134/s1062739148040132>

15. Averianov, K. A., Angelov, V. A., Akhmedianov, I. Kh., Rylnikova, M. V. (2012). Razvitie klassifikatsii tekhnogennogo syria gornyx predpriatii i obosnovanie tekhnologii ego aktivnoi utilizatsii. *Gornii informacionno-analiticheskii biulleten*, 5, 208–213.

16. Liashenko, V. I. (2014). Novye tekhnologii utilizatsii khvostov gidrometallurgicheskogo proizvodstva v vyrabotannye prostranstva i khvostokhranilischa. *Izvestiia vuzov. Cvetnaia metallurgii*, 2, 52–58.

17. Lyashenko, V. I., Gurin, A. A. (2016). The Environmental Protection Technologies and Facilities for the Dust Suppression of the Tailing Dump Surfaces. Ferrous Metallurgy. *Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information*, 4, 10–17.

18. Lyashenko, V. I., Golik, V. I. (2017). Scientific and engineering supervision of uranium production development. achievements and challenges. *Mining informational and analytical bulletin*, 7, 137–152. doi: <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2017-7-0-137-152>

19. *Antofagasta zavershila stroitelstvo khvostokhranilischa na medno-molibdenovom rudnike Los-Pelambres v Chili*. Available at: <http://www.mineral.ru/News/34680.html>

20. Lyashenko, V. I. (2017). Development of the Scientific and Methodical Bases for Assessment of Efficiency of Nature Protection Technologies and Technical Means at the Ore Raw Materials Development and Processing. *Occupational Safety in Industry*, 9, 30–36. doi: <http://doi.org/10.24000/0409-2961-2017-9-30-36>

21. Lyashenko, V. I., Dyatchin, V. Z., Lisovoy, I. A. (2017). Improvement of Safety of Mining Operations on the Basis of Effective Management of Mining Waste and Crude Ore Processing. *Occupational Safety in Industry*, 11, 16–22. doi: <http://doi.org/10.24000/0409-2961-2017-11-16-22>

22. Lyashenko, V. I., Dyatchin, V. Z., Lisovoy, I. A. (2018). Increase of Environmental Safety of Mining Production on the Basis of Waste Utilization of Extraction and Processing of Ore Raw Materials. *Ecology and Industry of Russia*, 22 (4), 4–10. doi: <http://doi.org/10.18412/1816-0395-2018-4-4-10>

23. Dvoretzkyi, A. I., Liashenko, V. I., Stus, V. P., Kovalenko, H. D. (2018). Vplyv uranovoi promyslovosti Prydniprovia na stan dovkillia. Problemy ta shliakhy yikh vyrishennia. *Ekolohichna bezpeka: problemy i shliakhy vyrishennia*. Kharkiv: FOP Stoliarova I. P., 156–165.

24. Lyashenko, V. I., Chekushina, T. V., Lisovoy, I. A., Lisovaya, T. S. (2019). Environmental Safety in the Zone of Influence of Uranium Production. *Ecology and Industry of Russia*, 23 (3), 60–65. doi: <http://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-3-60-65>

25. Krupskaya, L. T., Golubev, D. A., Rastanina, N. K., Filatova, M. Y. (2019). Reclamation of tailings storage surface at a closed mine in the Primorsky Krai by bio remediation. *Mining Informational and Analytical Bulletin*, 9, 138–148. doi: <http://doi.org/10.25018/0236-1493-2019-09-0-138-148>

26. Abashkina, T. S., Borodavko, F. F., Aksenov, S. G. (1991). A.s. No. 1627406 SSSR. *Sposob skladirovaniia otkhodov obogascheniia*. MPK: E02V 7/06; declared: 28.11.1988; published: 15.02.1991.

27. Volkov E. P., Anushenkov A. N. (2019). Developing the technology of mine stowing with processing tailings based hardening blends. *Izvestiya vysshikh*

*The object of research is the technology and technical means for storing the ore processing waste in the underground produced space and tailings with the addition of hardener. One of the most problematic places is the technology of storage of ore processing waste, according to which the tails of the hydrometallurgical plant (HMP) are sent along the pipeline to the tailings in the form of sludge with a ratio by weight of «solid – liquid»: 1:2. Liquid phase of the sludge settling and illumination in the tailing is returned to the technological cycle at the HMP. This storage technology has several disadvantages: high one-time capital costs for the construction of a tailing facility at full design capacity; migration of harmful chemicals into groundwater is likely if the shield screens of the base or tailings are damaged.*

*The data from literature sources and patent documentation in the field of justification of storage parameters, laboratory and production experiments, physical modeling and selection of compositions of solidifying mixtures are used. Analytical researches, comparative analysis of theoretical and practical results by standard and new methods with the participation of the authors are performed.*

*The mechanism of influence of migratory dust and water flows from the array of tailings dams facilities and metallurgical redistribution of metal ores is obtained and formulated. It has been shown that dust migration stops when the fixed compression strength  $(1.0–1.5) \cdot 10^5$  MPa and the airflow velocity of 15 m/s are reached.*

*The possibility of using curing mixtures with the use as a binder of related production is established. The optimal composition of ingredients per 1 m<sup>3</sup> of the mixture is proposed:*

- tails of a hydro-metallurgical plant of 1350–1500 kg;*
- binder (cement) – 50–70 kg;*
- mixing water – 350 l.*

*The proposed technology of storage of waste ore in the underground produced space and tailings dams with the addition of hardener allows the production capacity of the enterprise 1500 thousand tons/year 50–55 % of the tails used to book the produced space (830 thousand tons/year). And the rest connected with cementing material is stored in a storage (670 thousand tons/year). This ensures that the tailings of the entire existing area of the tailings mirror can be filled to a height of 10 m.*

**Keywords:** *ore processing waste, hydrometallurgical production, tailing dams, laying technologies, environmental safety.*