



В. И. Ляшенко /к. т. н./

ГП «УкрНИПИИпромтехнологии»,  
г. Желтые Воды, Украина  
e-mail: vi\_lyashenko@mail.ru

А. А. Гурин /д. т. н./

ГВУЗ «Криворожский национальный  
университет», г. Кривой Рог, Украина  
e-mail: raop35@gmail.com

Ф. Ф. Топольный /д. б. н./

ГВУЗ «Центральноукраинский национальный  
технический университет», г. Кропивницкий,  
Украина  
e-mail: topolnij@gmail.com

Н. А. Таран

Академия горных наук, г. Кривой Рог, Украина  
e-mail: taran230452@mail.ru

## Обоснование природоохранных технологий и средств для пылеподавления поверхностей хвостохранилищ гидрометаллургического производства и обогатительных фабрик<sup>1</sup>

V. I. Lyashenko /Cand. Sci. (Tech.)/

HP «Ukrainian scientific-research and design-  
prospecting Institute of industrial technology»,  
Zhelyte Vody, Ukraine  
e-mail: vi\_lyashenko@mail.ru

A. A. Gurin /Dr. Sci. (Tech.)/

GVUS «Kryvyi Rih National University»,  
Krivoy Rog, Ukraine  
e-mail: raop35@gmail.com

F. F. Topolnij /Dr. Sci. (Biolog.)/

GVUS «Central Ukrainian National Technical  
University», Kropivnizkij, Ukraine  
e-mail: topolnij@gmail.com

N. A. Taran

Academy of Mining Sciences, Krivoy Rog, Ukraine  
e-mail: taran230452@mail.ru

## Rationale for environmental technologies and for dust control surfaces tailings hydrometallurgical production and enrichment plants

*Цель.* Исследование и разработка природоохранных технологий и средств пылеподавления поверхностей хвостохранилищ гидрометаллургического производства и обогатительных фабрик за счет связывания хвостов известью, а также закрепления пылящих поверхностей химическими веществами, биологическими гидросмесями и биологической рекультивации.

*Методика.* Анализ ранее выполненных исследований и контрольных наблюдений, математическое и физическое моделирование на аэродинамической модели, анализ и статистическая обработка результатов, установление зависимостей, выполнение расчетов и обоснований, экспериментальные исследования в кюветах с хвостами, натурные измерения на поверхности хвостохранилищ и в зоне их влияния по стандартным методикам.

<sup>1</sup>Основные научные и практические результаты исследований получены в ходе выполнения научно-исследовательской работы (научный руководитель – В. И. Ляшенко): «Исследование и разработка способов пылеподавления при транспортировке, складировании, хранении полезных ископаемых и отходов добычи и переработки руд на объектах урановой промышленности» (№ гос. регистрации 0102U003095). Работа выполнена при содействии В. Н. Пухальского (ГП «ВостГОК»), В. М. Зельниченко, А. Г. Скотаренко, В. Н. Жушмана (ГП «УкрНИПИИпромтехнологии»), Криворожского национального университета и др.

**Результаты.** Рекомендован наиболее эффективный биологический способ закрепления пылящих поверхностей хвостохранилища ГМЗ грунтовыми смесями, состоящими: из воды, удобрений, семян трав, ГИПАН и мульчирующих добавок (глина и опилки); воды, удобрений, семян трав, ГИПАН и мульчирующих добавок (глина, зола ТЭЦ и опилки). Биологическая рекультивация отработанных хвостохранилищ ГОК Кривбасса путем посева семян кохии веничной на черноземе позволит предупредить сдувание пыли хвостов через 4–5 месяцев и обеспечить в последующем активный рост сорняков, семена которых в достаточном количестве находятся в черноземе.

**Научная новизна.** На основе результатов лабораторных исследований и промышленных экспериментов по закреплению хвостов описаны природоохранные технологии и средства для пылеподавления сухих пляжей путем связывания хвостов в общей массе известью, а также закрепления пылящих поверхностей действующего хвостохранилища: химическими веществами; грунтовыми смесями в виде окатышей; специально подготовленным составом, содержащим раствор с добавками ингредиентов, таких как глина, чернозем, опилки, лигносульфонаты, вода, удобрения, семена растений и биологическая рекультивация отработанных хвостохранилищ ГОК Кривбасса путем посева семян.

**Практическая значимость.** Разработанные технологии, средства и способы борьбы с пылением на действующих и законсервированных хвостохранилищах позволят уменьшить уровни загрязнения воздуха рабочей зоны пылью, улучшить условия работы персонала и экологическую обстановку в районах складирования отходов гидрометаллургической переработки руд. (Ил. 5. Табл. 4. Библиогр.: 17 назв.)

**Ключевые слова:** хвостохранилища, пылеподавление, известь, химические вещества, биологические гидросмеси, биологическая рекультивация.

**Актуальность проблемы.** По способу укладки хвостов действующие нормативные документы регламентируют три вида хвостохранилищ: намывные; наливные; комбинированные. При намывных основная часть ограждающей дамбы намывается из переработанного рудного материала. На наливных – дамба возводится из привозных или инертных местных материалов, а пульпа заливается в образуемую чашу. Анализ мировой практики существующих тенденций в обращении с отходами переработки руд показывает, что перспективным способом создания хвостохранилищ является комбинированный, при котором отходы переработки укладываются в специально оборудованное естественное углубление с ограждающей дамбой, часть которой сооружается из инертных грунтов, а часть отсыпается из переработанного рудного материала в смеси с вяжущим. Технологии борьбы с пылью на действующих хвостохранилищах осуществляются вводом закрепителей в поток пульпы и связывания хвостов во всей массе. Результаты лабораторных исследований и промышленных экспериментов по закреплению хвостов водорастворимыми структурообразующими полимерами на основе полиакриламида и полиакрилонитрита показали, что их применение ограничивается высокой стоимостью и дефицитностью [1; 2]. Борьба со сдуванием пыли с поверхности хвостохранилищ ведется недостаточно эффективно из-за отсутствия технологий и средств пылеподавления. Поэтому исследование и разработка природоохранных технологий и средств пылеподавления поверхностей хвостохранилищ гидрометаллургического производства и обогатительных фабрик за счет связывания хвостов известью, а также закрепления пылящих поверхностей химическими

веществами, биологическими гидросмесями и биологическая рекультивация – вот те важные научные и практические задачи, требующие неотлагательного решения [3; 4].

**Методы исследований.** Комплексный, включающий анализ ранее выполненных исследований и контрольных наблюдений, математическое и физическое моделирование на аэродинамической модели, анализ и статистическая обработка результатов, установление зависимостей, выполнение расчетов и обоснований, экспериментальные исследования в кюветах с хвостами, натурные измерения на поверхности хвостохранилищ и в зоне их влияния по стандартным методикам.

**Обсуждение результатов исследований.** *Общая характеристика хвостохранилищ ГМЗ.* 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 намытых 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. Таким образом, на действующих хвостохранилищах имеются обезвоженные участки (надводные пляжи намыва, площади карт, находящиеся на «отстое» внешние откосы дамб и плотин), которые 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  $C \leq 0,07$  мм составляет более 65 %, а частиц фракции  $\geq 0,01$  мм – до 25 %.

Так, с начала эксплуатации Желтореченского железорудного (1895 г.) и уранового (1951 г.) месторождений образовались два карьера: «Габавский» и «Веселоивановский», четыре хвостохранилища: отработанный карьер бурых железняков (КБЖ); балки «Щербаковская» (рис. 1); «Разбери» и «Терновская», а также воронка обрушения – как следствие подземной разработки железорудного месторождения системами с принудительным обрушением руд и вмещающих пород. 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 сегодняшний день частично рекультивированы (рис. 2).

**Исследование образцов хвостов ГМЗ, закрепленных известью.** Для определения ветроэрозионной устойчивости образцы хвостов, закрепленные известью, продували в аэродинамической трубе при скорости воздушного

потока до 15–16 м/с с отбором проб воздуха на запыленность. Установлено, что коэффициент защиты, т. е. отношение прочности на сжатие закрепленных и незакрепленных образцов, должен быть в пределах 4,0–5,0. Кроме ветроэрозионной устойчивости определяли сдвиговые показатели, характеризующие устойчивость плотин и дамб в водонасыщенном состоянии, намываемых из хвостов, а также водопрочность образцов и кислотность пульпы.

Хвосты, отобранные на хвостохранилище, смешивались с водой в соотношении твердого (Т) к жидкому (Ж) Т:Ж = 1:3 [5; 6]. В пульпу вводилась известь в количестве от 2 до 10 % (по весу) по отношению к твердому. Пульпа перемешивалась в течение 20–30 мин, после осаждения хвостов вода сливалась. Обезвоженные хвосты укладывались в разъемные формы-кубики с размером сторон 7 см для испытания их на одноосное сжатие и водопрочность; в поддоны размером 40×30×5 см – для исследования на ветроэрозионную устойчивость; вырезались при помощи режущих цилиндров образцы – для испытания на сдвиг. Сдвиговые характеристики образцов в водонасыщенном состоянии определялись на приборе ГПП–30 по стандартной методике. Водопрочность оценивалась по времени разрушения образца, помещенного в воду. Ионномером ЭВ–74 определяли рН пульпы. Для исследования в лабораторных условиях применялась негашеная кальциевая известь [7; 8]. Время гашения извести – 14 мин (табл. 1).

Прочность образцов интенсивно возрастает с увеличением содержания извести в хвостах до 6,0 %, а коэффициент защиты увеличивается с 5,0 до 15,3 при содержании извести, соответственно, 4 и 6 %. Добавки извести улучшают прочностные показатели, но сокращают полезный объем хвостохранилищ. Поэтому, учитывая необходимость получения прочности складированных хвостов, обеспечивающей их устойчивость ветровой эрозии (не максимальной), оптималь-



Рис. 1. Общий вид хвостохранилища по складированию продуктов гидрометаллургической переработки руд (фото)



Рис. 2. Горнотехническая рекультивация на хвостохранилище КБЖ, г. Желтые Воды (фото)



Результаты лабораторных исследований хвостов ГМЗ, закрепленных известью

Содержание извести в хвостах	Показатели					
	Предел прочности на сжатие, 10 <sup>5</sup> Па	Коэффициент защиты, ед.	Коэффициент внутреннего трения, ед.	Сцепление, 10 <sup>5</sup> Па	Водопрочность, доли ед.	рН смеси, ед.
0,0 (контроль)	0,25	1,00	0,505	0,014	0,01	7,8
2,0	0,68	2,75	0,510	0,016	0,60	11,1
4,0	1,25	5,00	0,520	0,016	1,43	12,2
6,0	3,84	15,36	0,530	0,017	2,40	12,3
8,0	3,96	15,84	0,550	0,018	За 24 ч разрушения не произошло	12,6
10,0	4,05	16,20	0,55	0,018	То же	12,8

ную добавку извести можно принять в количестве 4,0–5,0 % от массы твердого в пульпе.

Однако при таком содержании извести обратная вода, полученная в лабораторных условиях, имеет щелочную реакцию. На действующих хвостохранилищах, где в прудах-отстойниках накапливаются большие объемы воды и происходит ее разбавление дождевыми, паводковыми и техническими водами, а намыв пульпы с известью предполагается производить не непрерывно, а только в верхний слой до 10 см, то кислотность воды в пруде-отстойнике будет близкая к нейтральной. Сдвиговые испытания показали, что добавки извести не ухудшают прочностные свойства массива хвостов во влажном состоянии, а наоборот, несколько улучшают эти показатели [9].

В опытах с известью из оборудования опытного полигона использовался участок выпуска пульпы на пляж намыва. Ввод извести в пульпу осуществлялся непосредственно на заводе. Контролировать весовым способом количество вводимой в пульпу извести не предоставлялось возможным, поэтому контроль над количеством извести в пульпе осуществляли поддержанием концентрации водородных ионов с рН, равным 12 и более, т. к. это соответствовало расходу 50 кг извести на 1000 кг хвостов, т. е. 5 % содержания извести. Контроль над содержанием рН пульпы проводился как на заводе, так и при выпуске ее на пляж намыва. Дальность транспортировки пульпы от завода до ее выпуска на пляж составляла около 13 км [10]. В исходной пульпе не удалось поддержать расчетную щелочность, а сле-

довательно, и процентное содержание извести в пульпе (табл. 2).

Предварительно пляж опытного участка разбит на квадраты со стороной 30 м, в центре которых забивались мерные рейки, с помощью которых определялась высота намывного слоя. Намыв пляжа опытного участка продолжался три часа. При этом израсходовано 60 т извести и уложено около 1400 т хвостов [11].

Для определения эффективности закрепителей, вводимых в поток пульпы на действующем хвостохранилище построен опытный полигон, в состав которого входили:

- пункт приготовления водных растворов закрепителей, включающий бак емкостью 20 м<sup>3</sup>, к которому подведена вода, и мешалку;
- пункт ввода водных растворов закрепителей в поток пульпы, оборудованный насосом и счетчиком жидкости;
- участок выпуска пульпы на пляж намыва, включающий 10 выпускных патрубков диаметром 100 мм с обеих сторон оборудованных задвижками.

Для определения прочности на сжатие и сдвиговые испытания производился забор пульпы (усредненная проба), а после стабилизации поверхности – отбор проб (табл. 3).

Осмотр поверхности пляжа намыва на опытном участке показал, что толщина покрывающего слоя хвостов с известью неравномерна и колебалась от 0 до 5 см. Анализ водных вытяжек образцов хвостов, отобранных в квадратах опытного участка после стабилизации поверхности, показал, что рН изменялась от 8 до 10.

Таблица 2

Значение рН пульпы с добавкой извести (ед.)

Наименование показателей	Время отбора проб, ч									
	8-00	9-00	10-00	10-30	11-00	11-30	12-00	12-30	13-00	13-30
рН на заводе	8,2	21,6	11,8	11,7	12,0	11,8	12,0	11,7	7,9	7,8
рН при выпуске	-	-	8,18	8,62	9,36	10,09	9,88	9,16	10,92	10,89

Результаты испытания образцов хвостов с известью

Исследуемый образец	Предел прочности на сжатие, $10^5$ Па	Коэффициент внутреннего трения, ед.	Сцепление, $10^5$ Па
Хвосты без извести в момент сброса	0,27	0,52	0,13
Хвосты с известью в момент сброса	3,83	0,53	0,17
Пробы хвостов, отобранные на пляже намыва	1,76	0,53	0,17

Прочность образцов с известью, изготовленных из пульпы, отобранной в момент сброса, в 2 раза выше, чем образцов, отобранных на пляже намыва после стабилизации поверхности (через 2 недели после намыва). Меньшая прочность и щелочность образцов, отобранных на пляже намыва, объясняется тем, что часть извести вместе с водой переместилась в прудок-отстойник из-за крутых уклонов пляжа. Наблюдения за опытным участком на действующем хвостохранилище в течение осенне-зимнего периода показали, что при положительных температурах хвосты с 5 % добавкой извести в пульпу не пылят, а при отрицательных температурах вымораживание влаги нарушает структурные связи, что приводит к ветровой эрозии [12].

**Исследование наиболее эффективных закрепителей.** Для этого проведены эксперименты по определению удельной сдуваемости пыли, обработанной различными закрепляющими составами в кюветах, помещенных внутрь аэродинамической трубы. Время продувки выбрано опытным путем равным 30 минутам. По этой же причине выбрана скорость воздушного потока в трубе, равная 15 м/с, т. к. при меньшей сдувание пыли после закрепления исследуемыми составами оказалось незначительным. Для улавливания пыли использованы аналитические фильтры АФА-ВП-20-1 с площадью рабочей поверхности, равной  $20 \text{ см}^2$ , устанавливаемые в аллонжи ИРА-20. Учитывая допустимую нагрузку на фильтр по воздуху, равную  $7 \text{ л/мин} \cdot \text{см}^2$ , принята производительность воздухоудовки  $120 \text{ л/мин}$  на каждый фильтр. Навеска пыли на фильтре определялась как разница между весом фильтра до и после продувки в аэродинамической трубе. При этом вводилась поправка, учитывающая вес пыли, привносимой из окружающей атмосферы, которая соответствовала навеске пыли на фильтре, установленном в контрольном аллонже перед кюветой.

Взвешивание фильтров производилось на равноплечих лабораторных весах второго класса модели ВЛР-200г-М (заводской № А-95, имеющих свидетельство о поверке за № 44/02) со снятием отсчетов с точностью  $0,05 \text{ мг}$  при помощи делительного устройства. При этом наибольшая по абсолютной величине ошибка взвешивания не превышала величины  $0,1 \text{ мг}$ . Перед каж-

дым взвешиванием фильтры выдерживались в течение суток в эксикаторе с высушенным силикагелем для удаления с них влажности. Для исследований закрепляющей способности химических веществ использовали бишофит, полиакриламид, ГИПАН, обладающие вяжущими склеивающими и влагоудерживающими свойствами, лигносульфанаты (ЛСТ). Это побочный продукт производства сульфатной целлюлозы, которые применяются в качестве удобрений, структурообразователей почвы, противэрозийного средства, обеспыливающего материала для обработки пылящих покрытий автомобильных дорог. ЛСТ с содержанием сухих веществ 43–52 % представляют собой однородную вязкую тягучую жидкость темно-коричневого цвета. Плотность –  $1,17\text{--}1,24 \text{ г/см}^3$ ; рН 20; массовая доля транспортируемых веществ –  $0,3\text{--}1,0 \%$ . ЛСТ – высокомолекулярное вещество природного происхождения с широким диапазоном молекулярных масс (2000–10 000). Средний элементарный его состав (%): С – 53–56; Н – 5–6; Na – 0–8; Ca – 0–6 (содержание азота, натрия, кальция зависит от используемого основания кислоты). Вяжущие свойства ЛСТ проверялись визуальным путем. На поверхность размельченной породы (фракция 5 мм) методом распыления наносился 5 % раствор ЛСТ. После высыхания при наклоне поверхности до  $45\text{--}60^\circ$  сыпучести хвостов не наблюдалось. Структурная способность ЛСТ определялась по водопрочности агрегатов, искусственно образованных из размельченной породы. Доля внесения ЛСТ составила  $0,05; 0,1; 0,5; 1,0 \%$  к массе хвостов. Опыты показали, что применение ЛСТ эффективно при дозе более  $0,5 \%$  к массе почвы. Для выявления действия ЛСТ на всхожесть семян, используемых для биологического закрепления пылящих поверхностей, проведены опыты. Действие ЛСТ проверялось на газонной траве и эспарцете в присутствии удобрений – флорэкса и нитроаммофоса. В специальную посуду помещались по  $100 \text{ г}$  семян, и они смачивались раствором ЛСТ концентраций  $0,5$  и  $1,0 \%$  (табл. 4).

Для биологического закрепления проведены вегетационные опыты в специальных емкостях площадью  $0,12 \text{ м}^2$ , куда помещались хвосты ГМЗ с хвостохранилища. Аналогичные опыты проводились с ЛСТ, ГИПАН и бишофитом. ГИПАН

Таблица 4  
 Действие ЛСТ на всхожесть семян

Концентрация ЛСТ, %	Всхожесть, %	
	Газонная трава	Эспарцет
0,0	82	48
0,5	80	32
1,0	76	34

представляет собой пастообразную вязкую массу цвета жидкого стекла, полученную путем омыления сухих и мокрых отходов нитроново-го волокна с помощью раствора технического едкого натра. Соотношение массы ГИПАН и воды подбиралось в лабораторных условиях и составляло 1:20. По физико-химическим свойствам водный раствор природного бишофита (далее бишофит) должен соответствовать нормам ТУ.У.22.52511.003-97. Имеется токсико-гигиенический паспорт на раствор бишофита (ТУ.У.22529511.008-2001). Действие ГИПАН на всхожесть семян растений, используемых для биологического закрепления пылящих поверхностей, аналогичен ЛСТ. После проведения лабораторных исследований и выбора наиболее эффективных способов химического закрепления пылящих поверхностей, исследования продолжены с использованием специальных кювет, находящихся под открытым небом.

Промышленный эксперимент проводился непосредственно на южной части действующего хвостохранилища. На полигоне, включающем 10 участков размером 2,0×1,0 м проведены испытания трех способов закрепления: химический; грунтосмесями в виде окатышей; грунтосмесями в виде специально подготовленного раствора (рис. 3).

Исследования показали, что для кратковременного закрепления поверхности хвостохранилищ в сухую погоду можно использовать закрепители на базе ГИПАН, лигносульфаната, полиакриламида. Биологический способ закрепления пылящих поверхностей **действующих и законсервированных хвостохранилищ ГМЗ**

заключается в укладке закрепляющего материала в виде глинистого раствора с добавками ингредиентов, таких как глина, чернозем, опилки, лигносульфанаты или ГИПАН, вода, удобрения, семена растений. Расход – 12-15 л на 1 м<sup>2</sup>. Таким образом, уменьшение уровня загрязнения воздуха рабочей зоны пылью позволяет улучшить условия работы персонала при эксплуатации хвостохранилищ.

Загрязнения вокруг **хвостохранилищ** требует внедрения природоохранных мероприятий. Так, целесообразно провести озеленение территории санитарно-защитной зоны (СЗЗ) насаждением деревьев и кустов, устойчивых к повышенной загазованности и запыленности, которые являются естественными сорбентами: каштан конский обыкновенный, клен ясенелистный, тополь пирамидальный, липа крупнолистная, дуб великопорошный, береза бородавчатая; кусты – сирень обыкновенная, скумпия, спирея Бумальда, жимолость обыкновенная; декоративные растения – роза, ель и другие [5]. Предполагается также вдоль транспортных путей (авто и железнодорожных) создание защитных лесополос, а территории, где уровень загрязнений превышает допустимые величины, необходимо перевести под посев технических культур. В водоемах с возможным превышением ПДК загрязняющих веществ запретить вылов рыбы, купание и другие мероприятия. Следует проводить более детальные исследования касательно наличия загрязнений в объектах окружающей среды на прилегающих к хвостохранилищам территориях и степени воздействия на окружающую среду и человека.

**Направление дальнейших исследований.** Для сухих законсервированных хвостохранилищ ГОК Кривбасса наиболее приемлема биологическая рекультивация различными видами травянистых растений. Так, сотрудниками Криворожского ботанического сада для закрепления сухих и пылящих участков хвостохранилищ рекомендуется следующие многолетние



а)



б)

Рис. 3. Полигон по закреплению пылящих поверхностей (фото: общий вид):

а – полигон; б – участок на хвостохранилище, закрепленный биологическим способом (грунтосмесями)



растения: колосняк черноморский, колосняк кистистый, пырей удлиненный. Необходимым условием для создания травяного покрова из этих злаков является внесение в хвосты больших доз минеральных удобрений (аммиачной селитры, суперфосфата, калийной соли и др.) как при посеве, так и периодически, через 2–3 года, что требует постоянного ухода за растениями и существенно повышает стоимость рекультивации [13].

Проведенные исследования Криворожским национальным университетом показали, что плотность зарастания и биомасса дикорастущих растений в 3–6 раз меньше кохии веничной. Однако они могут успешно применяться для биологической рекультивации пылящих поверхностей (рис. 4). Прорастание клевера посевного и люцерны посевной, посеянных на черноземе за четырехмесячный период наблюдений, обнаружено в малых количествах. На участках хвостохранилища покрытых глиной, всходы посеянных семян не наблюдались.

Глина считается условно плодородным субстратом из-за нехватки гумуса. В этих условиях процесс самозарастания происходит некоторыми видами бурьянов в трещинах или лугах в течении 5–10 лет. На непокрытом субстрате участка хвостохранилища зарастание посеянными и дикорастущими растениями за период наблюдения не происходило [15].

Кохия веничная – однолетнее двудольное травянистое растение высотой 15–150 см, зеле-

ное, под осень краснеющее, сильно ветвистое. Соцветие взъерошено-колосовидное. Цветки по 1–2 в пазухах прицветников, невзрачные. Цветет в июле – августе. Растет на солончаках, песках, сорное в садах, огородах, вдоль дорог, по мусорным местам, на высоте до 1000 м над уровнем моря, одиночно или группами. Кохия – растение кормовое и экологически безвредное. Она отличается кратчайшим сроком вегетации, большой урожайностью семян, глубоким залеганием корневой системы, что требуется для ускоренного закрепления пылящей поверхности хвостохранилища. Кохия веничная обеспечивает зарастание чернозема через 3–4 месяца. Для создания растительного покрова целесообразно использовать другие сорные растения, которые имеются в черноземе или заносятся на экспериментальные участки естественным путем – животными, водой и ветром. Предлагаемая технология рекультивации пылящих поверхностей позволит в течение 2–3 лет вернуть для хозяйственного использования земли, отведенные под хвостохранилища или отвалы.

Продолжая наблюдения за экспериментальными участками в 2015–2016 гг., авторы установили, что на черноземе произошло исчезновение кохии веничной, а ее место заняли растения лядвенца Ольги (лядвенец рогатый, семена бобовых) (рис. 5). Многолетник, высотой 30–60 см цветет в мае – сентябре на лугах и травянистых склонах. По всей территории Украины – обычно, на юге немного реже. Сроки цветения



**Рис. 4. Общий вид экспериментального участка через 4 месяца посева растений (фото):**

1 – участок чернозема, засеянный кохией веничной; 2 – самозарастание чернозема дикорастущими растениями; 3 – участок глины, засеянный кохией веничной; 4 – хвосты



а)



б)



в)



г)

**Рис. 5. Биологическая рекультивация различными видами травянистых растений для сухих законсервированных хвостохранилищ (фото общего вида экспериментального участка):**

а – плотность зарастания и биомасса дикорастущих растений лядвенца Ольги; б, в – пятна полыни горькой, кудрявца Софии, лебеды белой, единичных растений коровяка скиптровидного и бодяка акантовидного; г – участок покрытый черноземом с деревьями хоха узколистого и кустарника

лядвенца рогатого и вегетация начинаются с мая, что обеспечило полное господство в растительном покрове черноземного участка: покрытие – 70–80 %. Растения, успевшие захватить площадку для эксперимента, не дали прорасти кохии веничной в конце июля – начале августа. Растение неоднократно плодоносящее в течение вегетационного периода, обеспечило себя обширной территорией и дальнейшим распространением.

Исследования показали, что плотность зарастания и биомасса дикорастущих растений лядвенца Ольги ничем не уступают по плотности стояния растениям кохии веничной, сомкнутость составляет 0,9 (см. рис. 5а). Как видим, произошло явление сукцессии, когда один вид растения сменил другой. Следует обратить внимание на появление синузид растений гринделии липкой, которая в последние годы захватывает пространство на экспериментальном участке. Это экспериментальный вид, занимающий степные регионы центральной части Украины. Среди зарослей лядвенца Ольги наблюдаются небольшие пятна полыни горькой (семена астровые), кудрявец Софии (семена крестоцветных), лебеды белой (семена маревые) и единичных растений коровяка скиптровидного (семена

норичниковые), бодяка акантовидного (семена астровые) (см. рис. 5б). Перечисленные виды – потенциальные участники сукцессий на экспериментальной площадке (см. рис. 5в). Кроме травяных растений, на участке покрытом черноземом, начали самопроизвольно приживаться деревья хоха узколистого и кустарника (см. рис. 5г).

На участках хвостохранилища, покрытых глиной, развитие растительности значительно беднее. На фоне открытых площадок глины начинают закрепляться редкие кустики полыни австрийской (семена астровые), молочая татарского (семена астровые), татарника колючего (семена астровые), полыни горькой (семена астровые), из-под глины пробиваются заросли камыша городского (семена злаковые). Появились огромные заросли (сухостоя) донника белого, достигающего 1,5–1,8 м (семена бобовые) и мозаичных пятен сухих растений овсюга пустого (однолетник) (семена мятлиновые). Всходы овсюга ранней весной обеспечат покрытие экспериментальных участков на все лето. Изредка встречаются растения осота розового, живокости полевой [14]. На непокрытом субстрате участка хвостохранилища зарастания дикорастущими растениями за период наблюдений не



происходило, за исключением пробивающихся из-под камней одиноких растений камыша гордского, корневищами глубоко уходящего в водоносные горизонты скальных пород. Таким образом, внедрение разработанных технологий, средств и способов борьбы с пылением на действующих и законсервированных хвостохранилищах позволит уменьшить уровни загрязнения воздуха рабочей зоны пылью, улучшить условия работы персонала, экологическую обстановку в районах складирования отходов гидрометаллургической переработки руд и железорудных ГОК Кривбасса [15–17].

### Выводы

1. Химическое закрепление пылящей поверхности заключалось в обработке поверхности участка на хвостохранилище химическими веществами. Водорастворимые полимеры проявляют стабилизирующие свойства при содержании в грунтах  $10^{-2}$ ... $10^{-1}$  вес %. Отношение твердого к жидкому в исходной пульпе изменялось от 1 до 5. Содержание закрепителей (полимеров) по отношению к воде – 0,5 % полиакриламида и 2 % – ГИПАН и лингосульфата. Расход раствора – 5–6 л на  $1 \text{ м}^2$  поверхности, регулировался с учетом небольших закрепляемых площадей. Участки, закрепленные ГИПАН, полиакриламидом и лигносульфанатом не подтвердили эффективность и не могут быть рекомендованы в качестве закрепителей.

2. Закрепление пылящих поверхностей грунтовыми смесями в виде окатышей заключалось в укладке закрепляющего материала в виде окатышей шарообразной формы по пылящей поверхности, при этом окатыши изготавливались из глины, соломы (камыша), древесных опилок, скрепляющих добавок (ГИПАН, лигносульфанаты) и воды при следующих соотношениях ингредиентов, масс. %: глина – 68–75; дробленая солома, камыш или опилки – 3–8; лигносульфанаты или ГИПАН – 0,3–1; семена растений, вода – остальное. Расход – 8–10 кг окатышей на  $1 \text{ м}^2$ . Солома или камыш резались на кусочки длиной до 2 см, опилки просеивались через сито 1 см. Расход – до 10 кг на  $1 \text{ м}^2$  поверхности.

3. Закрепление пылящих поверхностей специально подготовленным составом заключается в укладке закрепляющего материала в виде глинистого раствора с добавками ингредиентов. В качестве ингредиентов использовали глину, чернозем, опилки, лигносульфанаты или ГИПАН, воду, удобрения, семена растений. Расход – 12–15 литров на  $1 \text{ м}^2$  поверхности.

4. Рекомендован наиболее эффективный биологический способ закрепления пылящих поверхностей хвостохранилища ГМЗ грунто-

месями состоящими: из воды, удобрения, семян трав, ГИПАН и мульчирующих добавок (глина и опилки); воды, удобрения, семян трав, ГИПАН и мульчирующих добавок (глина, зола ТЭЦ и опилки).

5. Установлено, что на месте, покрытом черноземом, проявляется явление сукцессии. Это дает основание считать, что процесс восстановления природного покрова, свойственного степным условиям, набирает силу и доказывает, что природная среда помогает реконструкции биотоннов. Развитие искусственного экотона происходило на четвертом году эксперимента, хотя на других хвостохранилищах процесс сукцессий наблюдается после 10–30 лет без подсыпки чернозема, который имеет большую обсеменяемость сорняками, является мощным источником зарождения растительных группировок, в том числе и древесных кустарников.

6. Показано, что биологическую рекультивацию обработанных хвостохранилищ железорудных ГОК Кривбасса необходимо начинать путем посева семян кохии веничной на чернозем в апреле – мае для условий центральной части Украины, что благодаря интенсивному ее росту позволит предупредить сдувание пыли хвостов уже через 4–5 месяцев и обеспечить в последующем активный рост сорняков, семена которых в достаточном количестве находятся в черноземе. Через 3–4 года рекультивируемые земли могут быть возвращены для хозяйственного использования.

### Библиографический список / References

1. Young C. A., Luttrell G. H. (Eds.). Separation Technologies for Minerals, Coal, and Earth Resources: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. (SME), Englewood, Colorado, USA, 2012, 739 p.
2. Peil O. E., Ruban A. V., Johansson B. *Self-consistent supercell approach to alloys with local environment effects*. Physical Review B, 2012, vol. 85, no. 16, pp. 165140-1-165140-14.
3. Hickel T., Grabowski B., Körmann F., Neugebauer J. *Advancing density functional theory to finite temperatures: methods and applications in steel design*. Journal of Physics: Condensed Matter, 2012, vol. 24, no. 5, pp. 053202-1-053202-17.
4. Idczak R., Konieczny R., Chojcan J. *Study of defects in Fe-Re and Fe-Mo alloys by the Mössbauer and positron annihilation spectroscopies*. Solid State Communications, 2012, vol. 152, no. 20, pp. 1924-1928.
5. Справочник по обогащению руд. Специальные и вспомогательные процессы / под ред. О. С. Богданова, В. И. Ревнивцева. – М.: Недра, 1983. – 376 с.

- Bogdanov O. S., Revnivitsev V. I. (1983). *Spravochnik po obogashheniju rud. Special'nye i vspomogatel'nye processy* [Directory of enrichment of ores. Special and supporting processes]. Moscow, Nedra, 376 p. (In Russian).
6. Янов А. П. Временные рекомендации по борьбе с пылью, выделяющейся при отвалобразовании и с поверхности отвалов, с применением латексов / А. П. Янов, Ф. И. Данченко, А. И. Лебеда. – Кривой Рог: ВНИБТГ, 1984. – 20 с.
- Janov A. P., Dantchenko F. I., Lebeda A. I. (1984). *Vremennije rekomendazii po borbe s pilij, vidikjjshejsj pri otvalobrasovanii I s poverchnosti otvalov, s primeneniem lateksov* [Time recommendations to combat the dust released during stacking and surface dumps, with the use of latex]. Krivoy Rog, VNIBTG, 20 p. (In Ukrainian).
7. Кретинин А. В. Способ борьбы с пылью на действующих хвостохранилищах / А. В. Кретинин, В. Г. Борисов, В. Н. Жушман // Цветная металлургия. – 1988. – № 12. – С. 56–88.
- Kretinin A. V., Borisov V. G., Guschman V. N. (1988). *Sposob borbi s pily na dejstvujschich chvostochranilischach* [A method for controlling dust on existing tailings]. *Zvetnaja metallurgija*, no. 12, pp. 56-88. (In Russian).
8. Бересневич П. В. Охрана окружающей среды при эксплуатации хвостохранилищ / П. В. Бересневич, П. К. Кузьменко, Н. Г. Неженцева. – М.: Недра. – 1993. – 128 с.
- Beresnevitch P. V., Kusmenko P. K., Nezenzeva N. H. (1993). *Ochrana okruschajschej sredi pri ekspluatazii chvostochranilisch* [Environmental protection in the operation of tailings]. Moscow, Nedra, 128 p. (In Russian).
9. Домнічев М. В. Розробка технології знепилення хвостосховищ гірничо-збагачувальних комбінатів Кривбасу / М. В. Домнічев. – Кривой Рог: Видавничий центр КТУ, 2010. – 138 с.
- Domnitchev M. V. (2010). *Rosrobka tehnologii sne-pilennij chvostoschovisch hirnitchesbahatchuvatelnich kombinatov Krivbasu* [Tailings dust control technology of mining and processing enterprises Kryvbas]. Krivoy Rog, KTU, 138 p. (In Ukrainian).
10. Козин В. З. Опробование минерального сырья / В. З. Козин. – Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2011. – 316 с.
- Kosin V. S. (2011). *Oprobovanie mineralnogo sirj* [Testing of mineral resources]. Ekaterenburg, UGGU, 316 p. (In Russian).
11. Адамов Э. В. Основы проектирования обогатительных фабрик: учебник / Э. В. Адамов. – М.: Изд. Дом МИС и С, 2012. – 647 с.
- Adamov E. V. (2012). *Osnovi proektirovanij obogatitelnich fabrick* [Fundamentals of concentrators]. Moscow, MIS i S, 647 p. (In Russian).
12. Хопунов Э. А. Селективное разрушение руд и техногенного сырья: монография / Э. А. Хопунов. – Екатеринбург: УИЦО, 2013. – 429 с.
- Chopunov E. A. (2013). *Selektivnoe rusruschenie rud i technogennoho sirj. Monografij* [The selective destruction of ore and technogenic raw materials. Monograph]. Ekaterenburg, UIZO, 429 p. (In Russian).
13. Рекомендации по биологическому закреплению пылящих поверхностей действующих хвостохранилищ горнообогатительных комбинатов Кривбасса, Кривой Рог. – 1988. – 14 с.
- Rekomendazii po biologicheskomu sakreplenij piljschich poverchnostej dejstvujschich chvostoschovisch hornobahatitelnich kombinatov Krivbasa* (1988) [Recommendations for biological fixation of dusty surfaces existing tailing ore processing plants Kryvbas]. Krivoy Rog, 14 p. (In Ukrainian).
14. Фисюнов Л. В. Сорные растения / Л. В. Фисюнов. – М.: Колос, 1984. – 320 с.
- Fisunov L. V. (1984). *Sornij rastenij* [Weed]. Moscow, Kolos, 320 p. (In Russian).
15. Ляшенко В. И. Новые технологии и средства закрепления поверхностей хвостохранилищ / В. И. Ляшенко, А. А. Гурин, Н. А. Таран // Обогащение руд. – 2014. – № 5. – С. 41–46.
- Lyashenko V. I., Gurin A. A., Taran N. A. (2014). *Novye tehnologii i tehicheskie sredstva sakreplenij poverchnostej chvostochranilisch* [New technologies and means of securing the tailings surface]. *Obogashhenie rud*, no. 5, pp. 41-46 (In Russian).
16. Ляшенко В. И. Совершенствование природоохранных технологий и средств закрепления поверхностей хвостохранилищ / В. И. Ляшенко, Г. Д. Коваленко // Экология и промышленность. – 2015. – № 1. – С. 34–39.
- Lyashenko V. I., Kovalenko G. D. (2015). *Sovershenstvovanie prirodoochranich tehnologii i sredstv sakreplenij poverchnostej chvostochranilisch* [Improving environmental technologies and means of securing the tailings surface]. *Ekolochij I promischlenost*, no. 1, pp. 34-39. (In Ukrainian).
17. Ляшенко В. И. Природоохранные технологии и средства для пылеподавления поверхностей хвостохранилищ / В. И. Ляшенко, А. А. Гурин // Черная металлургия. – 2016. – № 4. – С. 10–17.
- Lyashenko V. I., Gurin A. A. (2016). *Prirodoochranie tehnologii i sredstva dlj pilepodavlenij poverchnostej chvostochranilisch* [Environmental technologies and means of dust suppression tailings surfaces]. *Chernaja metallurgija*, no. 4, pp. 10-17. (In Russian).

**Purpose.** Research and development of environmental technologies and means of dust control

surfaces tailings hydrometallurgical production and enrichment plants by binding lime tailings and secure dusting surfaces with chemical substances, biological and biological reclamation of the slurry.

**Methodology.** An analysis of previous studies and test observations, Mat-matic and physical modeling on wind tunnel models, analysis and statistical processing of the results, the establishment of dependencies, perform calculations and studies, ex-experimental investigations in cells with tails, field measurements on the surface of the HVO-stohranilisch and vliyayaniya their zone according to standard procedures.

**Findings.** Recommend the most effective way to secure the biological dusty surfaces GMZ tailing grontosmesyami, sostoyaschemi: water, fertilizer, grass seed, and mulching GIPAN additives (clay, sawdust); water, fertilizer, grass seed, and mulching GIPAN additives (clay, ash and sawdust CHP). Biological waste reclamation of tailings GOK Krivbass by sowing seeds kohii broomcorn on Jun-nozem will prevent dust blowing through the tails of 4-5 months and subsequently ensure active growth of weeds, the seeds of which are sufficient in Jun-nozeme.

**Originality.** On the basis of the results of laboratory and industrial experiments to consolidate tailings described environmental technologies and means of dust suppression dry tailings beaches by binding to the total weight of lime, as well as securing the existing tailings dusty surfaces: chemicals; grontosmesyami in the form of pellets; specially prepared formulation containing the solution with the addition of ingredients such as clay, mold, dust, lignosulfonates, water, fertilizers, seeds, and biological reclamation of waste tailings GOK Krivbass by sowing seeds.

**Practical value.** The developed technologies, tools and methods for controlling dusting on operating and dormant tailing dumps will reduce the levels of air pollution work area with dust, improve the working conditions of staff and the environment in the areas of waste storage hydrometallurgical processing of ores.

**Key words:** tailings, dust suppression, lime, chemicals, bio-logical slurry, biological reclamation.

Поступила 10.02.2017

