

УДК 622.7

**В.П. СОКОЛОВА**, канд. техн. наук,

**А.Д. УЧИТЕЛЬ**, д-р техн. наук

(Украина, Кривой Рог, Криворожский металлургический институт НМетАУ)

## **ПЕРЕРАБОТКА ШЛАМОВЫХ ОТХОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОЙ РУДЫ**

На ГОКах Украины ежегодно образуется около 60 млн т отходов обогащения. Если принять, что среднее содержание железа в их составе 12 мас.%, то в хвостохранилищах к настоящему времени заскладировано 360 млн т железа при ежегодном приросте этого показателя 7,2 млн т. [1].

Горно-обогатительные комбинаты Кривбасса, в частности, имеют большой объем отходов, что вызвано низким содержанием железа в добываемых рудах. В пределах горного отвода Кривбасса накоплено более 6 млрд. т отходов добычи и переработки руд, в том числе около 3 млрд т сосредоточено в шламонакопителях, являющихся по своему вещественному составу техногенными месторождениями железосодержащего сырья. Отходы обогатительных фабрик ГОКов Кривбасса содержат до 25% железа общего и около 12-13% магнитного [2].

По данным работы [3], запасы железорудных шламов в хвостохранилищах Криворожских ГОКов оцениваются в 2,5 млрд т, в которых содержание магнитного железа изменяется в пределах от 3,06 до 7,17%, а общего – от 15,7 до 18,6%. Пять действующих ГОКов Кривбасса за период с 1961 года по настоящее время заскладировали отходы обогащения железистых кварцитов в шести хвостохранилищах: балка "Петрова" (Севгок) – 375 млн м<sup>3</sup>; балка "Лозоватка" (ЦГОК) – 246 млн м<sup>3</sup>; "Войково" (ЮГОК) – 106 млн м<sup>3</sup>; "Объединенное" (ЮГОК, НКГОК) – 250 млн м<sup>3</sup>; балка "Грушеватая" (ЮГОК) – 19 млн м<sup>3</sup>; "Миролюбовка" – 105 млн м<sup>3</sup>; "Николаевка" (ИнГОК) – 283 млн м<sup>3</sup>.

В табл. 1 приведена характеристика хвостохранилищ Кривбасса [4].

*Таблица 1*

Параметры хвостохранилищ Кривбасса

Наименование хвостохранилища	Площадь, га	Емкость, млн м <sup>3</sup>	Годовой объем хвостов, млн м <sup>3</sup>
"Объединенное" ЮГОКа и АрселорМиттал	350-550	320	6,5
"Войково" ЮГОКа	250	156,5	11,5
Хвостохранилище ИнГОКа	–	379	4,52
"Миролюбовка" АрселорМиттал	324	107	10,6
Хвостохранилище ЦГОКа	–	290	7
Хвостохранилище СевГОКа	1293	466	8,84

Как видно, большинство ГОКов свои емкости для складирования отходов уже исчерпали. Использование шламов обогащения железных руд не только

## **Загальні питання технологій збагачення**

разрешает вопрос, связанный с их размещением и хранением, но и значительно уменьшает себестоимость основного продукта обогащения – железорудного концентрата.

Актуальность проблемы заключается в разработке эколого-экономически целесообразных технологий производства с рециклингом образующихся отходов, сокращении объема лежалых промышленных отходов, снижении степени загрязнения окружающей природной среды, сокращении энергозатрат и экономии природных ресурсов.

Разработка технологических решений по переработке тонкодисперсных хвостов обогащения железной руды в настоящее время осуществляется, в основном, по двум направлениям:

- 1) дообогащение с целью доизвлечения железосодержащих минералов и получения дополнительного количества концентрата;
- 2) производство строительных материалов и закладочных смесей для выработанного пространства.

*Дообогащение.* Сегодня в Украине известны лишь два проекта, где дообогащаются отходы обогащения железных руд: переработка лежалых песков шламохранилища Центрального ГОКа и производство концентрата из хвостов железорудного производства на мощностях опытно-промышленного комплекса "Желтые воды" (Днепропетровская область).

Определением запасов, целесообразностью дообогащения лежалых хвостов шламохранилища ЦГОКа в течение ряда лет занимались институты Механобрчермет, Кривбасспроект, НИГРИ. Средний гранулометрический состав лежалых хвостов хвостохранилища ЦГОКа приведен в табл. 2 [5]. Классы крупнее 0,25 мм, выход которых составляет около 40%, наиболее бедные по содержанию железа общего. Содержание железа магнетитового в них также низкое (~3 %).

Таблица 2

Гранулометрический состав лежалых хвостов ЦГОКа (2004 г.)

Классы крупности, мм	Массовая доля фракций, %	Массовая доля железа общего, %	Массовая доля железа магн., %	Извлечение, %	
				железо общее	железо магн.
+1,00	2,9	11,1	1,7	1,1	0,3
-1+0,63	7,1	12,1	2,9	2,8	1,4
-0,63+0,45	11,1	12,7	3,0	4,6	2,3
-0,45+0,25	19,8	16,7	3,8	10,8	5,2
-0,25+0,16	22,1	27,9	10,1	20,2	15,3
-0,16+0,07	12,5	38,3	16,3	15,6	14,0
-0,07+0,05	5,1	42,2	25,1	7,0	8,8
-0,05	19,4	59,7	39,9	37,9	52,7
Итого	100	30,6	14,6	100	100

По результатам исследований лежалых хвостов институтом Механобрчермет была разработана технология их дообогащения [6]. Она предусматривала обесшламливание и предварительное магнитное обогащение исходных хвостов

на борту шламохранилища. Магнитный продукт обогащался непосредственно на обогатительной фабрике по схеме, включающей две стадии измельчения и три стадии магнитного обогащения. Технология позволила сбросить непосредственно на борту шламохранилища около 30% воды и, следовательно, снизить энергозатраты по перекачке пульпы, а также увеличить срок службы трубопроводов. Получено 25,1% по выходу концентрата с массовой долей железа 66,1%. Извлечение железа в концентрат составило 59,2%, магнетитового 90,2%.

ЦГОК начал работы по освоению технологии добычи, транспортировки и переработки хвостов в 2001 г. Производительность установки составляла около 50 тыс. тонн концентрата в месяц. С момента запуска установки в 2001 году было произведено более 5,3 млн. тонн концентрата. Кроме получения дополнительного объема товарной продукции, освобождается емкость для складирования отходов обогащения (до 0,4 млн м<sup>3</sup>) и не приходится расширять площади хвостохранилищ.

В 2005 году компания "Метал Юнион" внедрила проект "Рекультивация техногенных месторождений". В 2007 году в рамках проекта введен в эксплуатацию первый модульный комплекс по производству гематитового концентрата "Желтые Воды". После проведенной в 2011 году реконструкции производительность опытно-промышленного комплекса "Желтые Воды" составила 10 тысяч тонн железорудного концентрата в месяц. Доступная сырьевая база — хвосты железорудного производства в районе г. Желтые Воды в объеме 3,5 млн. тонн [7].

Что касается переработки хвостов обогащения других ГОКов Украины, то этот вопрос разработан лишь на стадии исследований. Так, лежалые хвосты Северного ГОКа подробно изучены и описаны, в частности в исследованиях, выполненных в Криворожском техническом университете [8]. Отмечено, что по состоянию на 2002 год в хвостохранилище заскладировано 433,2 млн м<sup>3</sup> хвостов или около 1 млрд т, выход хвостов в год составляет 6,2 млн м<sup>3</sup>. Размер частиц хвостов текущего производства СевГОКа колеблется от 0,001 до 3 мм и более. Для размера частиц придамбовой части хвостохранилища характерна достаточно высокая вариативность. Однако для техногенного месторождения, как отмечает автор, гранулометрический состав хвостов можно считать стабильным. Средневзвешенный размер частиц составляет 0,167 мм. Основными минералами являются: кварц (58,32 об.%), гематит (8,33), магнетит (7,60), кумингтонит (6,85), рибекит (8,45) и др. Показано, что по магнитной схеме обогащения можно получить концентрат с содержанием железа 65,2 % в количестве 22,5%, по гравитационно-магнитной схеме выход концентрата составил 24,5%, содержание железа на уровне 67,5%. Хвосты дообогащения могут быть использованы как строительный материал или сырье для производства кварца для стекольной промышленности.

В России заслуживают внимания работы по переработке хвостов обогащения железной руды, выполненные на Магнитогорском металлургическом комбинате и Оленегорском ГОКе.

## **Загальні питання технологій збагачення**

Спеціалістами Магнітогорського МК розроблена і введена технологія переробки шламу шламохранилища № 2 для отримання залізорудного концентрату. Так, наприклад, за перше півроку 2016 року перероблено 59 680 т шламу шламохранилища № 2, що дозволило знизити закупку залізо-збагачуючого концентрату на 7960 т. По стану на 2015 рік залишки шламу складають близько 15 млн т. Середнє вміст заліза загального в досліджених шламах становить 28,8%. В результаті збагачення шламу з масовою часткою заліза загального 29,2% в умовах ДОФ-5 отримано концентрат в кількості 12,93% від вихідного з масовою часткою заліза 64,9% [9].

На Оленегорському ГОКі по стану на 1 січня 1998 року кількість накопчених кварц-магнетит-гематитових пісків в хранилищі становило 11 млн. т [10]. Массив залізей хвостів акумуляційного басейну в основному представлений залізистими кварцитами з вмістом заліза загального – 25,3%, магнетитового – 5,6%, гематитового – 18,6%. В табл. 3 наведено гранулометричний склад закладених хвостів.

Таблиця 3

Гранулометрична характеристика і розподіл заліза по класам крупності хвостів акумуляційного басейну

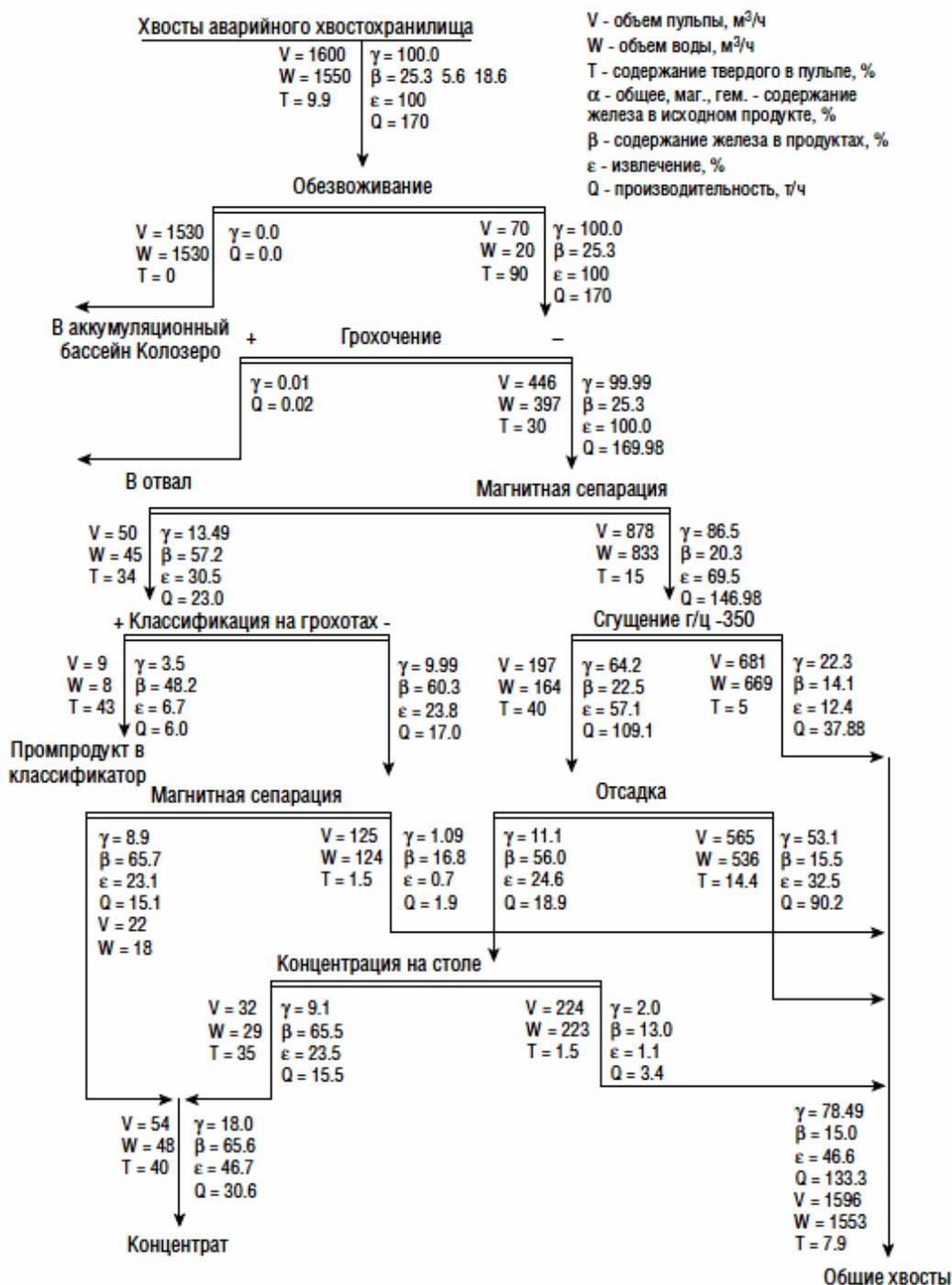
Класи крупності, мм	Вихід, %	Суммарний вихід, %	Вміст, %			Видобуток, %		
			Fe <sub>общ</sub>	Fe <sub>магн</sub>	Fe <sub>гем</sub>	Fe <sub>общ</sub>	Fe <sub>магн</sub>	Fe <sub>гем</sub>
+0,1	2,3	2,3	10,8	1,9	6,4	1,0	0,8	0,8
-0,1+0,6	3,5	5,8	8,1	1,2	4,8	1,1	0,7	0,9
-0,6+0,4	13,2	19,0	9,5	1,9	5,6	5,0	4,5	4,0
-0,4+0,3	9,3	28,3	11,3	3,5	7,4	4,2	5,8	3,7
-0,3+0,2	25,8	54,1	16,8	4,3	11,7	17,1	19,8	16,2
-0,2+0,1	28,6	82,7	36,7	7,4	28,4	41,5	37,7	43,7
-0,1+0,071	7,7	90,4	47,5	7,8	38,8	14,5	10,7	16,1
-0,071	9,6	100	41,1	11,7	28,4	15,6	20,0	14,6
Ітого	100	–	25,3	5,6	18,6	100	100	100

Як видно, основна частина заліза (88,7%) зосереджена в фракції мінус 0,2 мм. По гравітаційно-магнітній схемі отримано концентрат з масовою часткою заліза 65,6-65,8% при виході 18%, видобуток заліза в концентрат становив 46,7% (рисунк).

Необхідно відзначити, що видобуток хвостів здійснюється гідромеханізованим способом. В якості основного обладнання для обробки масиву хвостів на повну глибину залізи було прийнято електричний землесосний снаряд 200-50 БК, який має технічну продуктивність по гідросмісці 1500 м<sup>3</sup>/ч, напір – 73 м, мінімальну і максимальну глибину розробки, відповідно, 1,5 і 8,0 м. Робота земснаряда проводиться на водообороті. Крім того, передбачено відведення в зону роботи земснаряда природних і промислових стоків. Умовою повної обробки техногенної залізи є виїмка рудозбагачуючих пісків в межах всієї розвіданої площі

## Загальні питання технологій збагачення

аварийной емкости хвостохранилища. Что касается влияния данного способа на окружающую среду, то загрязнение взвешенными минеральными частицами акватории Колозера полностью исключается, так как при отработке залежи взвешенные частицы попадают в аккумуляционный бассейн, который выполняет роль замкнутого пруда-отстойника.



Технологическая схема обогащения шламов аварийного хвостохранилища Оленегорского ГОКа

## **Загальні питання технологій збагачення**

Позднее были выполнены исследования по повышению эффективности разделения техногенных отходов железных руд на Оленегорском ГОКе. Исследования показали, что из-за наличия сростков кварца с рудными минералами в крупных фракциях необходимо применить предварительную рудоподготовку (измельчение) исходного материала для обеспечения раскрытия сростков, что позволит повысить извлечение железа из шламов до 63% в концентрат с содержанием железа более 65% [11].

*Производство строительных материалов и закладочных смесей.* Эффективные технологии утилизации отходов мокрой магнитной сепарации реализуются введением их в составы закладочной, бетонной и асфальтобетонной смесей и шихты для производства керамического кирпича в виде гидросмеси и минерального порошка, содержащих фракцию менее  $71 \cdot 10^{-6}$  м не менее 85 и 70%, соответственно [12].

Полученные после классификации отходы фракции 0,63-5 мм и 0,14-0,63 мм имеют однородный гранулометрический состав и представляют искусственный кварцево-железистый песок с модулем крупности 1,7-3,3, средней плотности 1500-1600 кг/м<sup>3</sup>, пустотность которых 43-49%, суммарное содержание пылевидных и глинистых частиц 1,8-3%. По остальным физико-механическим свойствам классифицированные отходы не отличаются от природных кварцевых песков, а по некоторым показателям даже превосходят их. Тонкодисперсные отходы содержат не менее 60% оксида кремния и не более 14% соединений железа. Насыпная плотность отходов фракции менее 0,14 мм и колеблется в пределах 1050-1100 кг/см<sup>3</sup>, удельная поверхность 3000-4000 см<sup>2</sup>/г. Еще одной отличительной чертой искусственных песков в сравнении с естественными является повышенная пустотность первых – 6-9%. Это обстоятельство приводит к увеличению расхода цемента до 20%, но прочностные показатели значительно превосходят добавочные расходы цемента на единицу объема растворов и бетона. В отношении железосодержащих минералов в песках из отходов существует мнение о том, что окислы железа оказывают влияние на повышение прочности и долговечности бетона автоклавного твердения в 2-2,5 раза, по сравнению с бетонами естественного твердения. Обогащенные отходы, имеющие модуль крупности не менее 1,8, используется в асфальтобетонных смесях (для заполнителей); для производства силикатного и шлакового кирпича; в качестве отошающих добавок для изготовления глиняного кирпича; в качестве балластного материала. Тонкодисперсные отходы менее 0,14 мм могут применяться для производства автоклавных и не автоклавных изделий и конструкций из тяжелых и ячеистых силикатобетонных, а также в качестве минерального порошка в асфальтобетонных смесях [13].

В хранилище отходов обогащения Соколовско-Сарбайского горно-обогатительного комбината (г. Рудный, Казахстан), которое считается техногенным месторождением, накоплено свыше 375 млн тонн отходов железных руд. Основными продуктами, получаемыми из отходов обогащения, является щебень и песок различной крупности. Они обладают рядом свойств, сходными

со свойствами природного сырья, что подтверждается исследованиями [14]. Результаты сравнений прочностей тяжелых бетонов на естественном песке и песке из отходов обогащения железных руд показывают, что последние имеют более высокую прочность на осевое растяжение и растяжение при изгибе. Повышение прочности составляет соответственно 22 и 11%. Прочность сцепления с арматурой для бетона марки 200 на песке из отходов обогащения и естественной равны, соответственно 3,3 и 3,1 МПа, а для бетона марки 400-5,2 и 4,3 МПа. Результаты исследований показали, что водопоглощение, плотность, пористость бетона из отходов обогащения руд не отличаются от бетона на природном песке, а по морозостойкости и водонепроницаемости даже их превосходят. При этом 1 м<sup>3</sup> готового изделия из техногенных заполнителей на 20% дешевле изделий на природном сырье, так как исключаются расходы на добычу сырьевых материалов.

В работе [15] для оценки потенциальной возможности использования "хвостов" обогащения железных руд для создания строительных материалов авторами были исследованы составы вяжущих, приготовленных добавлением активизирующих добавок к "хвостам" обогащения железных руд Криворожского железорудного бассейна. В качестве активизирующих добавок использовали портландцемент марки 500 и 400, известь строительную активностью 85%, растворимое стекло. Проведенные исследования показали, что "хвосты" обогащения железных руд при активизации их известью и цементом позволяют получить материал прочностью до 10 МПа, при активизации силикатами натрия – до 40 МПа, а при активации силикатами натрия и техногенными стеклами – до 60 МПа. Роль вяжущего в таких материалах выполняют активизаторы твердения, дисперсные составляющие "хвостов" и продукты окисления сульфидов. Проведенные исследования новообразований при твердении составов активизированных "хвостов" обогащения показывают возможность получения покрытий автомобильных дорог на их основе.

Как показали результаты данных исследований, если производить не полную замену речного песка рядовыми "хвостами" обогащения железных руд, а лишь некоторую его часть в присутствии полиспирта, можно добиться даже значительного увеличения прочности строительных растворов. При этом используются все фракции хвостов обогащения.

Авторы статьи [16] считают, что накопленный опыт применения отходов горного производства для изготовления бетонов положительным признать нельзя. Препятствием для широкого применения хвостов обогащения в качестве строительного сырья, в первую очередь, является наличие неизвлеченных при переработке металлов. Утилизация хвостов без извлечения этих металлов опасна. Наличие в товарной продукции неизвлеченных металлов опасно химическим и радиологическим загрязнением, поскольку содержащиеся в отходах металлы под действием процессов естественного выщелачивания мигрируют в экосистемы окружающей среды.

В работе [16] дается характеристика инновационного направления исполь-

## **Загальні питання технологій збагачення**

---

зования хвостов обогащения для приготовления твердеющих смесей для заполнения техногенных пустот при подземной разработке полезных ископаемых. В последнее время обосновано, что активация хвостов не только способствует извлечению металлов до уровня ПДК, но и улучшает свойства хвостов, создавая условия для применения их в качестве строительных и кладочных материалов. Активации хвостов осуществляется в установках типа дезинтегратор. При обработке в дезинтеграторе в веществе аккумулируется дополнительная энергия, величина которой может достигать 30% от всей затраченной на обработку энергии. Активация хвостов обогащения в дезинтеграторе позволяет мелким фракциям конкурировать с цементом.

Хвосты обогащения, активированные в дезинтеграторе, после извлечения из них металлов до уровня санитарных требований даже без добавления цемента пригодны для изготовления товарной продукции, в том числе массивов из твердеющих смесей, обеспечивающих при определенных геомеханических условиях необходимую прочность. Кладочные смеси на основе хвостов обогащения обеспечивают прочность искусственных массивов при сжатии до 1,5 МПа. Хвосты механохимической активации отходов обогащения представляют собой дисперсную массу, сложенную частицами размерами около 0,1 мм, отличающимися более равномерной структурой, что существенно повышает качество при изготовлении бетонных изделий.

Авторы работы [16] считают, что технологически и экономически целесообразнее использование текущих хвостов обогащения железных руд с увязкой процессов обогащения и приготовления смесей в единую систему.

Таким образом, рассмотренные направления по переработке шламовых отходов обогащения железных руд предполагают их выемку из хвостохранилищ, которая связана с определенными трудностями и затратами. Кроме того, рассматриваемые хвостохранилища являются малоизученными в части распределения по объему полезных компонентов. Инновационным направлением в этом случае может быть разработка на базе теоретических и экспериментальных исследований процесса сгущения и фракционирования шламов текущего производства. Это позволит снизить нагрузку на шламохранилища и использовать шламы текущего производства для их переработки и утилизации.

### **Список литературы**

1. Губина В.Г. Железосодержащие отходы предприятий горно-металлургического комплекса Украины // Геолого-мінералогічний вісник. – 2010. – №1-2 (23-24). – С. 97-100.
2. Фроший Н.В. Эколого-технические аспекты в оценках геологических ресурсов Кривбасса // "Неделя горняка-2003". Семинар № 6. – 2009. Электронный ресурс. Режим доступа: [cyberleninka.ru/.../ekologo-tehnicheskie-aspekty-v-otsenkah-geologicheskikh-resurov-krivbassa](http://cyberleninka.ru/.../ekologo-tehnicheskie-aspekty-v-otsenkah-geologicheskikh-resurov-krivbassa).
3. Перспективы вовлечения в эксплуатацию техногенных месторождений (на примере Украины и Грузии) / П.И.Копач, Л.В.Якубенко, В.Н.Романенко и др. // Екологія і природокористування. – 2013. – Вип. 16. – С. 210-217.
4. Медведева О.А. Хвостохранилища Кривбасса, проблемы и особенности их эксплуа-

таци // Геотехническая механика. – 2012. – Вып.103. – С. 279-285.

5. Габельченко Н.И., Дмитренко М.А. Повторная переработка шламов //Материалы семинара: "Технология вовлечения шламов обогащения железистых кварцитов в повторную переработку и улучшение качества железорудного сырья". – Кривой Рог: "Минерал", 2004. – 109 с.

6. Лободина З.В., Радчук А.Г. Дообогашение лежалых хвостов ЦГОКа // Сборник научных трудов Механообрчермета "Новое в технологии, технике и переработке минерального сырья". – 2005 . – С. 67-73

7. Укррудпром. Желтые воды. О предприятии. Электронный ресурс. Режим доступа: [http://ukrudprom.ua/reference/factory/Geltie\\_Vodi.html](http://ukrudprom.ua/reference/factory/Geltie_Vodi.html)

8. Федорова І.А Технологічна мінералогія відходів збагачення північного гірничозбагачувального комбінату Криворізького басейну: Автореф. дис. ... канд геолог. наук. – Криворізький технічний університет. – Кривий Ріг, 2004. – 20 с.

9. На ММК внедрена новая технология переработки шламов. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://ura.ru/news/1052253759>.

10. Опыт обогащения отвальных хвостов дробильно-обогажительной фабрики Оленегорского ГОКа/ В.А.Лоцманов, А.Н.Дмитриенко, Т.М.Киселева, А.Ю.Марков // Горная промышленность.– №3. – 2003. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://mining-media.ru/ru/article/newtech/1530-opyt-obogashcheniya-otvalnykh-khvostov-drobilno-obogatitelnoj-fabriki-olenegorskogo-goka>.

11. Скороходов В.Ф. Повышение эффективности разделения техногенных отходов железных руд/ В.Ф. Скороходов, М.С. Хохуля//Вестник МГТУ, том 12, 34. – 2009. – С. 619-623.

12. Ермолович Е.А. Разработка и исследование способов утилизации отходов обогащения железистых кварцитов Курской магнитной аномалии: Автореф. дис. ... канд. тех. наук., Ермолович Е.А. – Тула, 2009. – 21 с.

13. Шевченко Б.Н. Конструкции из бетонов на отходах обогащения железных руд. – К.: Выща шк., 1989. – 192с.

14. Песок и щебень из отходов обогащения железной руды для мелкозернистого бетона / Г.М. Рахимова, Д.М. Тажибаев, А.О. Икишева, М.К. Дадиева и др. // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10. – С. 2445-2449.

15. Шишкин А.А. Особенности использования отходов горно-обогажительных комбинатов в производстве строительных материалов / А.А. Шишкин, А.А. Шишкина, В.В. Щерба // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. – 2013. – Вип. 1(99). – С. 9-12.

16. Голик В.И., Комащенко В.И., Морку В.С. Инновационные технологии комплексного использования хвостов обогащения переработки руд // Вісник Криворізького національного університету. – 2015. – Вип. 39 – С. 68-72.

© Соколова В.П., Учитель А.Д., 2017

*Надійшла до редколегії 20.04.2017 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. П.І. Піловим*