

УДК: 622.03:628.511:349.5 (088.8)

DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-3-75-82

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ЗОЛОШЛАКОВ ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

© 2016 г. В.И. Мулявко, Т.А. Олейник, В.И. Ляшенко, А.М. Кириченко, С.Н. Панова, Л.В. Скляр

Криворожский национальный университет (КНУ), г. Кривой Рог, Украина

ГП «УкрНИПИИпромтехнологии», г. Желтые Воды, Украина

Статья поступила в редакцию 15.04.14 г., доработана 11.11.15 г., подписана в печать 21.12.15 г.

Приведены основные научные и практические результаты исследований новых технологий и технических средств для утилизации золошлаков тепловых электростанций. Рассмотрены вопросы обеспечения экологической безопасности районов расположения тепловых электростанций и предложены технологии по магнитному извлечению из их золошлаков ценных металлов. Полученные данные реализованы в методических документах, технических средствах и внедрены в промышленность с экономическим эффектом.

Ключевые слова: природоохранные технологии, технические средства, утилизации золошлаков, магнитное извлечение, ценные металлы.

Мулявко В.И. – докт. техн. наук, профессор кафедры физики КНУ (50027, Украина, Днепропетровская обл., г. Кривой Рог, ул. XXII Партсъезда, 11). E-mail: muwali2012@bk.ru.

Олейник Т.А. – докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой обогащения полезных ископаемых КНУ. E-mail: taoliynik@gmail.com.

Ляшенко В.И. – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., нач. отдела ГП «УкрНИПИИпромтехнологии» (52204, Украина, Днепропетровская обл., г. Желтые Воды, ул. Петровского, 37). E-mail: vi_lyashenko@mail.ru.

Кириченко А.М. – канд. техн. наук, доцент кафедры экологии КНУ. E-mail: legus_1984@mail.ru.

Панова С.Н. – канд. техн. наук, доцент кафедры экологии КНУ. E-mail: gef_knu@ukr.net.

Скляр Л.В. – канд. техн. наук, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых КНУ. E-mail: lyuda.cuclina@yandex.ua.

Для цитирования: Мулявко В.И., Олейник Т.А., Ляшенко В.И., Кириченко А.М., Панова С.Н., Скляр Л.В. Новые технологии и технические средства для утилизации золошлаков тепловых электростанций // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2016. No. 3. С. 75–82. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-3-75-82.

Mulyavko V.I., Oliiynik T.A., Lyashenko V.I., Kirichenko A.M., Panova S.N., Sklyar L.V.

New technologies and technical facilities for disposal of ash and slag waste produced by thermal power plants

The study describes main scientific and practical results obtained when researching new technologies and technical facilities for disposal of ash and slag wastes produced by thermal power plants. The issues of environmental safety provision in the area of thermal power plants are discussed and technologies for magnetic recovery of precious metals from ash and slag wastes are proposed. The data obtained is implemented in methodological documents, technical facilities and introduced into the industry with an economic effect.

Keywords: environmental technologies, technical facilities, disposal of ash and slag wastes, magnetic recovery, precious metals.

Mulyavko V.I. – Dr. Sci. (Tech.), prof., Department of physics, Kryvyi Rih National University (KRNU) (50027, Ukraine, Dnipropetrovsk region, Krivoy Rog, str. of XXII Party Congress, 11). E-mail: muwali2012@bk.ru.

Oliiynik T.A. – Dr. Sci. (Tech.), prof., head of Department of mineral processing, KRNU. E-mail: taoliynik@gmail.com.

Lyashenko V.I. – Cand. Sci. (Tech.), State enterprise «Ukrainian scientific-research and design Institute of industrial technology» (52204, Ukraine, Dnipropetrovsk region, Yellow Water, Petrovsky str., 37). E-mail: vi_lyashenko@mail.ru.

Kirichenko A.M. – Cand. Sci. (Tech.), associate prof., Department of ecology, KRNU. E-mail: legus_1984@mail.ru.

Panova S.N. – Cand. Sci. (Tech.), associate prof., Department of ecology, KRNU. E-mail: gef_knu@ukr.net.

Sklyar L.V. – Cand. Sci. (Tech.), associate prof., head of Department of mineral processing, KRNU.

E-mail: lyuda.cuclina@yandex.ua.

Citation: Mulyavko V.I., Oliiynik T.A., Lyashenko V.I., Kirichenko A.M., Panova S.N., Sklyar L.V. Novye tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya utilizatsii zoloshlakov teplovykh elektrostantsii. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2016. No. 3. P. 75–82. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-3-75-82.

Введение

Тепловые электростанции (ТЭС) Украины выработывают до 40 % электроэнергии. Концентрируясь в промышленных центрах или близко к ним, они загрязняют окружающую среду и формируют

техногенные геохимические аномалии. Кроме того, на ТЭС отсутствуют системы пыле- и газоочистки выбросов в атмосферу от твердых частиц, оксидов серы, азота и других вредных газов.

На Криворожской ТЭС в среднем ежегодно формируется более 500 тыс. т золошлаков. Вследствие их гидравлического удаления происходит интенсивное загрязнение воды солями тяжелых металлов, образующихся при сжигании углей. При этом общий ежегодный объем сбрасываемой воды в открытые водоемы колеблется от 6,5 до 7,5 млн м³. Основные негативные воздействия золоотвала на окружающую среду состоят в фильтрационных утечках воды из чаши сооружения и пылении подсыхающих отложений, занимающих площадь около 430 га. Поэтому разработка и внедрение новых технологий и технических средств для утилизации золошлаков тепловых электростанций на основе изучения особенностей поведения частиц при магнитном и гравитационном извлечении из них ценных металлов, а также за счет использования точных и надежных средств контроля, обеспечения непрерывности процесса разделения и упрощения конструкции — важная научная, практическая и социальная задача, требующая неотлагательного решения.

Обсуждение и оценка результатов исследований

Был проведен анализ существующего состояния в решении рассматриваемой проблемы с учетом мирового опыта [1–4].

Золоотвал является мощным источником влияния на уровневый режим и качество подземных вод прилегающей территории. На его площадь подается значительный объем воды, часть которой фильтруется через золошлаковые отложения к пруду-осветлителю и затем используется в технологическом цикле. Другая часть воды через гидравлические окна в основании золоотвала, а также путем перетока через слабопроницаемые отложения основания поступает в подземные водоносные горизонты, приводя к развитию процессов подтопления и вытеснению природных подземных вод водами золоотвала с изменением их гидродинамического и гидрохимического режимов. Частично фильтрационные воды перехватываются дренажными сооружениями. Учитывая, что качество дренажного стока не соответствует требованиям, предъявляемым к водам, сбрасываемым в поверхностные водоемы, отбираемые дренажные воды направляют в золоотвал. Зона их влияния на подземные воды, определяемая по результатам режимных наблюдений, охватывает

значительные площади с максимальным радиусом в 2–3 км от границ сооружения по направлению распространения подземного потока (в сторону базиса разгрузки — р. Ингулец, Украина).

Почвенно-экологические исследования вокруг золоотвала Криворожской ТЭС как источника загрязнения окружающей среды показали, что основные загрязняющие вещества зольных отложений — это тяжелые металлы. Опасными составляющими отходов производства, потенциальными загрязнителями воды являются в первую очередь Pb, Zn, Mg, Cu, Cd, Cr, Ni и Ti. Загрязнение подземных вод выше ПДК составляет: по Li — в 1,17 раза, Ba — в 6,6, Ti — в 6,4, Mn — 7,7 раза, поверхностных вод по Cr — в 1,32 раза. Поступление фильтрационных вод золоотвала в подземные водоносные горизонты приводит к метаморфизации их химического состава и ухудшению условий водопользования населения, проживающего как вблизи сооружения, так и в зоне его влияния (п. Великая Костромка, с. Добрянка, с. Потемкино, п. Высокополье, Украина). Объем фильтрационных потерь из чаши золоотвала в подземные водоносные горизонты определен как расходная статья водного баланса сооружения и составляет более 1,0 млн м³ в год. Ущерб, нанесенный природным подземным водам в результате хозяйственной деятельности, должен быть компенсирован в соответствии с действующим природоохранным законодательством.

В золоотвале Криворожской ТЭС накоплено более 43,5 млн т золошлаков. Резерв первоначальной емкости отвала практически исчерпан. Дальнейшее наращивание сооружения может привести к нарушению устойчивости ограждающих дамб либо переливу через гребень дамбы воды с последующим ее разрушением и выносом золошлаковой смеси. Химический состав золошлаков Криворожской ТЭС (содержание, %: SiO₂ — 45,7, Al₂O₃ — 19,8, Fe₂O₃ + FeO — 13,67, CaO — 2,0, MgO — 1,57, TiO₂ — 0,8, K₂O — 0,49, SO₃ — 0,4, P₂O₅ — 0,15, прочие — 14,27) показал, что они являются не только сырьем для строительной индустрии, но и ценным источником соединений железа и алюминия. На основании результатов химического состава золошлаков, а также детального технико-экономического обоснования возможна организация перерабатывающего производства на базе нижеприведенных технологических схем, разработанных авторами.

Недостатками известных сепараторов является их малая производительность, большая энерго-

емкость и низкая эксплуатационная надежность при обогащении тонкоизмельченного материала, в состав которого входят как сильно-, так и слабомагнитные продукты, а также необходимость периодически выполнять регенерацию магнитных полюсов. Для их использования требуются дополнительные производственные помещения и финансовые затраты.

Для максимального извлечения полезных компонентов из твердой составляющей пульпы, текущей по трубам гидротранспорта в его начальной части, нами предлагается магнитный сепаратор с неподвижным рабочим барабаном, изготовленным из немагнитного материала, и внешней магнитной системой, медленно вращающейся вокруг горизонтально расположенного барабана (рис. 1) [5]. Магнитный сепаратор имеет рабочую камеру 1 из немагнитного материала, размещенную в середине магнитной системы 2 коаксиально с ней, в которой закреплены устройства 3 для выделения магнитного продукта (ловушки), имеющие вид изогнутой в противоположные стороны трубы из немагнитного металла. Во внутренней части этих труб выполнены продольные щели 4 разной длины, которые открыты в сторону, обратную движению магнитной системы 2, и имеют такую же длину, как и созданное магнитное поле. Магнитные системы сепаратора состоят из ферромагнитного цилиндрического кожуха 2, на внутренней поверхности которого закреплены полоски постоянного магнита 5 и 6 (с чередующимися полюсами), создающие в рабочей зоне аппарата соответственно слабое и сильное магнитные поля. Магнитные системы коаксиально закреплены на корпусе 1 аппарата с помощью подшипников 7. Медленное вращение магнитных систем обеспечивается редуктором и двигателем через ролики 8. Движение жидкостного носителя 9 в камере 1 осуществляется с глубиной h . Изъятые магнитные продукты удаляются из сепаратора через патрубки 3. Конструкция сепаратора позволяет последовательно удалять из материала, который сепарируется, сначала сильномагнитный, а затем слабомагнитный продукт и в конце процесса получить немагнитный продукт.

Питание аппарата материалом сепарации осуществляется согласно рис. 1, б. Сильномагнитные частицы материала оседают на нижнюю часть поверхности камеры 1 против полюсов магнитов 5, где градиент поля имеет наибольшее значение, и создают на ней агрегаты в виде нитей, которые мед-

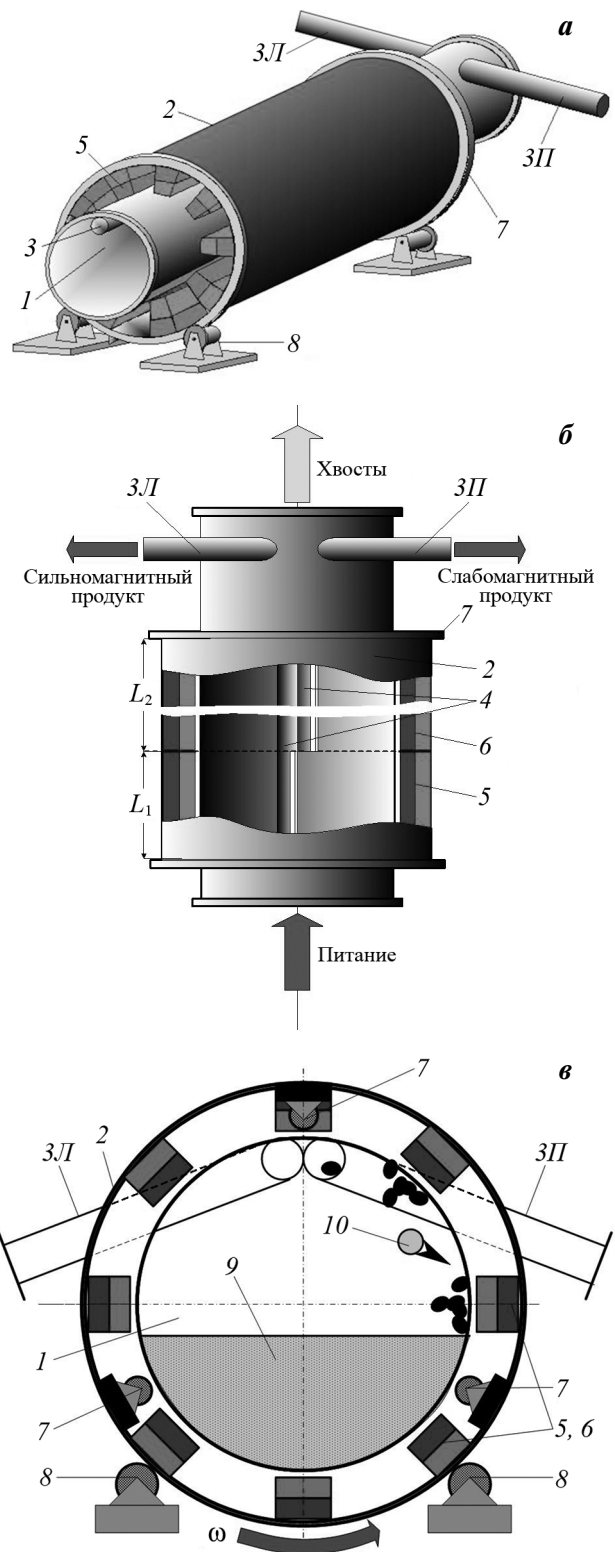


Рис. 1. Магнитный сепаратор

а – общий вид; б – поперечный разрез; в – вид сверху
 1 – рабочая камера; 2 – магнитная система; 3 – ловушки (3П, 3Л – соответственно правая и левая); 4 – продольные щели; 5, 6 – полоски постоянного магнита с чередующимися полюсами; 7 – подшипники; 8 – ролики; 9 – жидкостной носитель; 10 – форсунки

ленно движутся за полюсами в сторону магнитных ловушек 3. Во время этого движения на частицы, которые осели, действует разрушающая гидродинамическая сила потока носителя и воды из форсунок 11, что обеспечивает извлечение из их среды слабомагнитных и немагнитных частиц. Частицы продукта, которые попали в ловушки, удаляются через левый патрубок 3Л (например, гибким шнеком). Поток частиц материала, что остались, поступает в рабочую зону, в которой магнитами 6 создано максимально интенсивное магнитное поле. В этой части аппарата повторяется уже описанный процесс. Отличие заключается в том, что изымаются из потока все слабомагнитные частицы материала, которые попадают в ловушку, а из нее удаляются через правый патрубок 3П. Неизвлеченные немагнитные частицы выводятся потоком из аппарата в хвостовой его части.

Методы математического моделирования

Расчет количества полюсов магнитов, которые составляют магнитные системы аппарата, и промежутков между ними, а также частоты вращения магнитной системы можно выполнить следующим образом. Для определения шага полюсов пользуются расчетами или измерениями значений средней проекции силы, которая должна действовать на магнитную частицу в данной точке поля, и строят график ее зависимости от расстояния до полюса магнита (рис. 2). Полученная кривая всегда близка к экспоненте, поэтому ее можно аппроксимировать уравнением [6]

$$F_x = F_0 e^{-2Cx}, \quad (1)$$

где F_0 — сила у поверхности полюса; C — относительный градиент поля, результат от деления градиента поля на его напряженность:

$$C = \frac{\partial H}{\partial x} H^{-1}. \quad (2)$$

Величину C еще называют коэффициентом неоднородности поля. Для полюсов магнитов, расположенных по цилиндрической поверхности, он равен

$$C = \frac{\pi}{S} + \frac{1}{R}. \quad (3)$$

Пример расчета среднего значения удельной магнитной силы по методу наименьших квадратов дает выражение вида

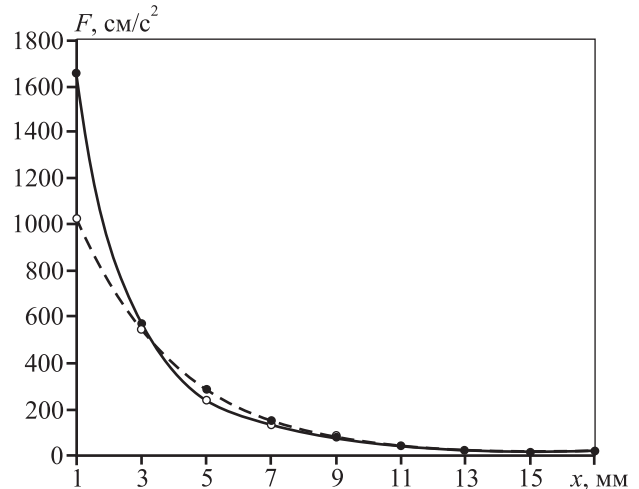


Рис. 2. Зависимость магнитной силы, действующей на частицу, от расстояния до полюса магнита
Штриховая кривая – расчет по формуле (1)

$$F_x = 1640 \exp(-0,268x).$$

Здесь величина x измеряется в мм (см. рис. 2). Тогда $C = 0,134 \text{ мм}^{-1}$ для магнитов, индукция поля которых на поверхности полюса равна $B = 0,1 \text{ Тл}$, что подходит для первой магнитной системы. Подстановкой в выражение (3) значений C и $R = 200 \text{ мм}$ (радиус установки) получим шаг полюсов $S = 0,0244 \text{ м}$.

Для магнитов с другой индукцией поля (B_H) на поверхности полюса значение коэффициента C_H определяется по формуле

$$C_H = 0,134 B/B_H. \quad (4)$$

Отношение шага полюсов к ширине полюса равно

$$\xi = S/(2b) = 2,44. \quad (5)$$

Поскольку стоит задача не только удержать магнитные частицы на внутренней поверхности корпуса 1, но и осуществить их движение за полюсом магнита, величину отношения (5) нужно увеличить на 15–20 %, что позволит избежать переноса частиц с одного полюса на следующий за ним, т.е. остановки их движения к устройству для извлечения магнитной фракции. Если определен шаг полюсов S (или ширина полюса $2b$) и известен радиус магнитной системы, то можно вычислить количество полюсов делением длины круга магнитной системы на величину S . Магнитная система 2 благодаря приводу 8 медленно вращается вокруг корпуса с частотой, которая устанавливается

из следующих соображений. Сильномагнитные частицы сепарируемого материала, оседая на поверхность аппарата против магнитных полюсов, ослабляют энергию магнитного поля. Это может привести к тому, что очередные магнитные частицы материала не смогут удержаться на полюсе магнита, т.е. магнитная система будет работать не в полную силу. В предлагаемом сепараторе ряды магнитов, которые медленно движутся, заводят частицы продукта, что осели против полюсов магнитов, в щель ловушки. Поскольку каналы ловушек открыты только с одной стороны, магнит затем остается чистым, готовым извлекать новую партию частиц.

Из графика зависимости силы, действующей на магнитную частичку в неоднородном магнитном поле, от расстояния до полюса магнита ($B = 0,1$ Тл) видно, что толщина слоя магнитного продукта, который осел на полюс магнита, не должна превышать $\alpha = 3$ мм, поскольку на таком расстоянии магнитная сила, действующая на частицу, уменьшится в 2 раза (см. рис. 2). Поэтому такой магнит надо очищать. Массу продукта плотностью ρ , который удержится на полюсе одного магнита, можно рассчитать по формуле

$$m_i = 6\alpha b\rho L \text{ [г]}, \quad (6)$$

где ρ — плотность материала, г/см³; L — длина магнита, см.

Количество рядов магнитов, которые ежедневно должны находиться в рабочей зоне аппарата, можно определить по формуле

$$n = \frac{c\gamma EQ}{6\rho\alpha b} 10^3 \text{ [с}^{-1}\text{]}, \quad (7)$$

где Q — производительность аппарата, см³/с; c — концентрация сепарируемого материала в носителе (например, воздухе), г/см³; γ — содержание магнитного продукта; E — эффективность извлечения частиц данным аппаратом.

Если известны количество рядов магнитов (n) и шаг полюсов (S), то можно найти необходимую частоту вращения магнитной системы. Длину магнитных полюсов устанавливаем из следующих соображений: за время движения пульпы вдоль магнитного полюса магнитные частицы должны достичь дна корпуса аппарата; при этом на частицу действуют сила притяжения, магнитная сила и, в обратном направлении, сила сопротивления водной среды, которая для мелких частиц подчиняется закону Аллена, а для крупных — закону

Стокса; в первом случае скорость оседания частиц составляет [7]

$$v_{m1} = 0,26d_m\sqrt{[(\mu_0\chi_T H \text{grad} H + g)\rho_m/\sqrt{\eta\Delta_{II}}]^2}, \quad (8)$$

а во втором случае — равна

$$v_{m2} = [d_m^2\rho_m/(18\eta)](\mu_0\chi_T H \text{grad} H + g), \quad (9)$$

где d_m — размер магнитных частиц (или флюкул), м; $\mu_0 = 4\cdot 10^{-7}\pi$ — магнитная постоянная, Гн/м; χ_T — удельная магнитная восприимчивость тела, м³/кг; H — напряженность магнитного поля, А/м; $g = 9,81$ м/с²; ρ_m — плотность материала, кг/м³; η — динамическая вязкость носителя (воды), Па·с; Δ_{II} — плотность материала питания, кг/м³. Тогда

$$L = u_H h/v_{m1}. \quad (10)$$

Здесь h — максимальная толщина слоя носителя в аппарате, м; u_H — скорость течения носителя, м/с².

Для упрощения расчета определим отношение длин сильномагнитной части рабочей зоны сепаратора (L_2) и слабомагнитной (L_1), считая что толщина носителя и его скорость остаются неизменными:

$$\frac{L_2}{L_1} = \frac{v_{m2}}{v_{m1}} = \frac{d_m\sqrt{\rho_m(a+g)\Delta_{II}}}{0,26\cdot 18\sqrt{\eta}}, \quad (11)$$

где a — ускорение частицы, которое создается магнитными силами, м/с².

Методика и результаты внедрения

Считаем, что $a = g$, средний размер частиц материала $d_m = 50\cdot 10^{-6}$ м, их плотность $\rho_m = 5\cdot 10^3$ кг/м³, $\Delta_{II} = 200$ кг/м³, $\eta = 0,001$ Па·с.

Если в уравнение (10) подставить значение скорости сначала из (9), а затем из (8) и найти отношение L_2/L_1 , то получим, что длина магнитной системы для извлечения слабомагнитных частиц должна быть в 1,5–2,0 раза больше, чем у магнитной системы для извлечения сильномагнитных частиц сепарируемого материала.

Второй сепаратор позволяет извлекать магнитные частицы из бункера-накопителя вакуумнасоса гидротранспорта [8]. Предлагаемое устройство для магнитной очистки жидкостей и газов показано на рис. 3. Оно имеет корпус 1, входной патрубок 2 (с распределительным коллектором), патрубки для извлечения магнитной фракции 3 и выпускной патрубок 7. В середине корпуса 1 размещены магнитные сепараторы 4 для выделения магнитного продукта, попарно закрепленные на приемном бун-

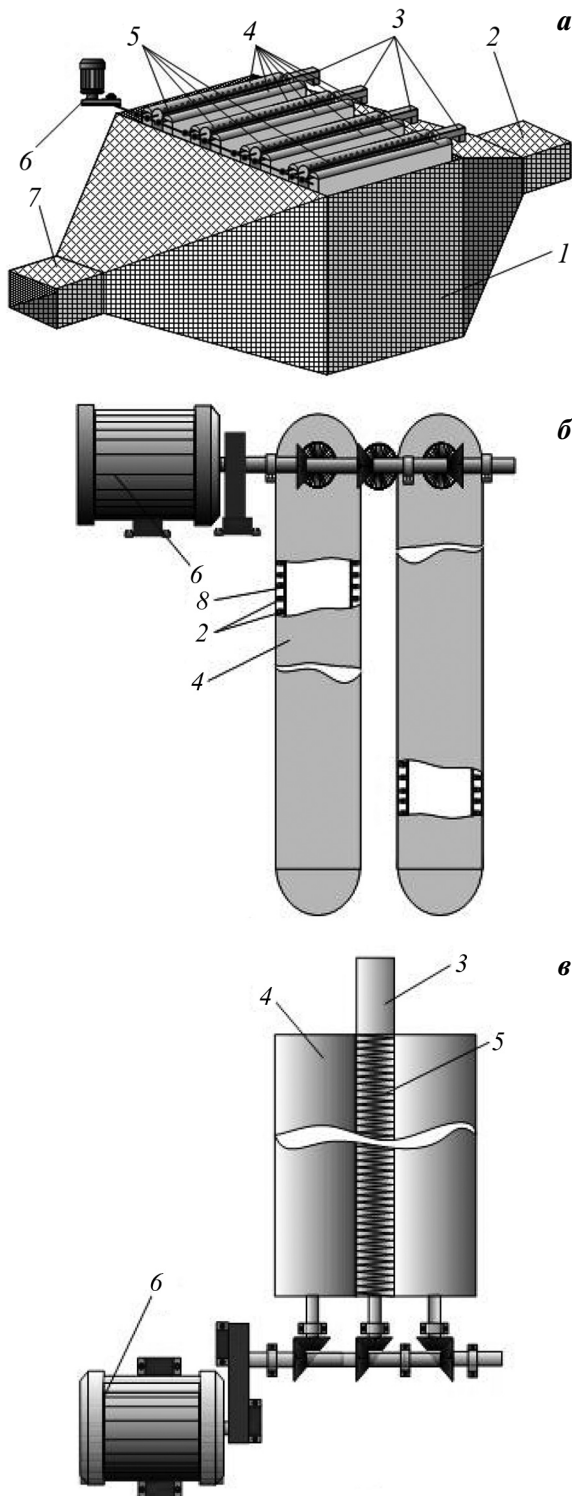


Рис. 3. Устройство для магнитной очистки жидкостей и газов
а – общий вид; *б* – фрагмент строения сепараторов; *в* – вид сверху
1 – корпус; *2, 3, 7* – соответственно патрубок входной, для извлечения магнитной фракции и выпускной;
4 – магнитные сепараторы; *5* – винтовые конвейеры (шнеки);
6 – механизм для создания вращательного движения шнеков и магнитных систем, в состав которого входят двигатель и конусные шестерни; *8* – постоянные магниты

кере транспортирующего магнитную фракцию механизма *5*, который заканчивается в патрубке *3* (все эти элементы и коробчатый корпус сепараторов *4* изготавливаются из немагнитного материала). Вращательное движение конвейеров и магнитных цепей систем осуществляется приводом *6*, в состав которого входят электродвигатель и конические шестерни. Магнитная система набрана из постоянных магнитов, закрепленных на металлических полосах, соединенных с цепным элеватором.

Устройство работает следующим образом. Питание корпуса аппарата *1* материалом сепарации осуществляется через патрубок *2* и равномерно распределяется по всей его ширине. На частицы, движущиеся вдоль поверхности сепараторов *4*, действует высокоградиентное магнитное поле постоянных магнитов. Благодаря этому магнитные частицы оседают на поверхность сепараторов *4* напротив магнитных полюсов, которые, медленно двигаясь, транспортируют их к шнекам *5*. Извлеченная магнитная фракция попадает в патрубки *3*, а очищенная жидкость (или газ) выпускается через патрубок *7*. Расчет количества полюсов магнитов, которые составляют магнитные системы аппарата, и промежутков между ними, а также частоты вращения привода магнитной системы можно выполнить вышеописанным способом. Для определения шага полюсов можно воспользоваться расчетами, приведенными выше (см. ф-лу (3)). Принимая, что $R \rightarrow \infty$, $C = 0,134 \text{ мм}^{-1}$, получаем

$$C = \frac{\pi}{S} + \frac{1}{\infty} = \frac{\pi}{S}, \quad S = \frac{\pi}{C} = 23,4 \text{ мм.} \quad (12)$$

Отношение шага полюсов к его ширине определяем из выражения (5). Зная величину S (или $2b$), можно найти количество полюсов. Для этого длину цепи магнитной системы делим на шаг полюсов. Определив по формуле (7) количество рядов магнитов (n), которые ежесекундно должны находиться в рабочей зоне аппарата, находим частоту вращения магнитных систем:

$$v = Z/n, \quad (13)$$

где Z – высота магнитной системы.

Рассмотрим движение частиц и действующие на них силы во время сухой прямоточной магнитной сепарации в режиме извлечения, когда дисперсный поток движется горизонтально со скоростью v_0 вдоль магнитов сепаратора (вертикальным смещением частиц под действием силы тяжести и вязкостью воздуха пренебрегаем). Время, за кото-

рое частичка пройдет всю длину магнитного полюса, будет равно [9]

$$t = L/v_0. \quad (14)$$

За время t частица должна пройти половину расстояния между соседними сепараторами. Если считать ее движение равноускоренным, то

$$z = at^2/2 = \langle F_x \rangle t^2 / (2m), \quad (15)$$

где m — масса частицы; $\langle F_x \rangle$ — среднее значение магнитной силы, которое можно считать равным

$$\langle F_x \rangle = 0,5F_0. \quad (16)$$

Совместным решением уравнений (14) и (15) относительно длины магнитного полюса получим

$$L = 2v_0 \sqrt{mz / F_0}. \quad (17)$$

Анализ (17) показывает, что уменьшение расстояния между сепараторами ($2z$) и увеличение магнитной силы позволят делать короткими полюса магнитов. Особенностью динамики удаления частиц во время мокрого обогащения является то, что в вязкой среде, которой является водная суспензия, кроме магнитной силы на движущуюся частицу действует сила сопротивления (для мелких частиц — это сила Аллена, для тонких — Стокса). Предположим, что движение частицы к полюсу магнита равноускоренно, тогда с учетом зависимости (14) получим выражение для максимального значения скорости этого движения:

$$v = (2z/L)v_0, \quad (18)$$

а ускорение составит

$$a = (2z/L^2)v_0^2. \quad (19)$$

Тогда формула закона Ньютона принимает вид

$$ma = F_x - F_c, \quad m(2z/L^2)v_0^2 = 0,5F_0 - 3\pi\eta vd. \quad (20)$$

Решая это квадратное уравнение относительно длины полюса магнита, получим

$$L = \left(\sqrt{\frac{9\pi^2\eta^2}{4m^2} + \frac{4F_0}{mzv_0^2}} - \frac{3\pi\eta}{2m} \right)^{-1}. \quad (21)$$

Из формулы (21) вытекают перечисленные ранее зависимости, а также видно заметное влияние на длину полюса магнита вязкости жидкости (носителя твердой фракции). Для снижения диссипативных сил надо уменьшить скорость потока v_0 и расстояние между соседними сепараторами. Первый продукт после сгущения может быть использован как стро-

ительный материал или складироваться совместно с пустой породой. Второй продукт нуждается в грохочении на тонких ситах с целью извлечения из него сростков магнитной и немагнитной фракций для последующего измельчения. Мелкая же фракция, в зависимости от содержания в ней железа, может использоваться после брикетирования, например, как аглоруда или концентрат [10—13].

Выводы

1. Обосновано, что длина магнитной системы для извлечения слабомагнитных частиц должна быть в 1,5—2,0 раза больше длины магнитной системы для извлечения сильномагнитных частичек сепарируемого материала.

2. Установлено, что реализация предлагаемой технологии для утилизации золошлаков в условиях Криворожской ТЭС позволит получить товарную продукцию в виде металлического лома (50—70 тыс. т/год) и обеспечит экологическую безопасность в районе расположения золоотвала, уменьшит загрязнение окружающей среды и платежи за ущерб, нанесенный деятельностью станции, а также сэкономит капитальные затраты на строительство (расширение) отвала и энергоресурсы, затрачиваемые на гидротранспорт золошлаков и осветление воды, возвращаемой в оборотный цикл ТЭС.

3. Разработаны многопродуктовый магнитный сепаратор [11] и устройство для магнитной очистки жидкостей и газов [12] применение которых на промышленных предприятиях позволит повысить производительность и эффективность сепарации, уменьшить количество материала, подлежащего транспортировке в хвостохранилища, т.е. улучшит состояние окружающей среды.

4. Доказано, что увеличение эффективности работы сепаратора во время обогащения пылевидного магнитного материала достигается за счет извлечения сильномагнитного продукта и снижения интенсивности магнитного поля в объеме магнитных ловушек.

Работа выполнена по материалам докладов с участием авторов на 14-й международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохраные технологии освоения недр» [14,15].

Литература

1. Лоусон К. Инфракрасные спектры поглощения неорганических веществ / Пер. с англ. Е.М. Диянова. Под ред. Н.А. Ирисовой. М.: Мир, 1964.

2. *Jagannadham S.* The method of ash disposal of large thermal power plants HES in India // *Irrig. Power J.* 1993. Vol. 50. No. 3. P. 33—42.
3. *Vassilev S.V.* Some elements in the ash wastes HES in Bulgarian // *Fuel.* 1994. Vol. 73. No. 3. P. 367—374.
4. *Ri Jong. Nat.* Characteristics of fly ash thermal power plants in North Korea // *Bull. Acad. Sci. DPR Koreu.* 1998. No. 1. P. 33—37.
5. *Шинкоренко С.Ф.* Справочник по обогащению руд черных металлов. М.: Недра, 1980.
6. Справочник по обогащению руд. Специальные и вспомогательные процессы / Под ред. О.С. Богданова, В.И. Ревнивцева. М.: Недра, 1983.
7. *Кармазин В.И., Кармазин В.В.* Магнитные методы обогащения. М.: Недра, 1978.
8. *Невзлин Б.И., Загирняк М.В.* Устройство для магнитного разделения материалов: А.с. 946677 (СССР). 1982.
9. *Хоров Л.Т., Фавстрицкий В.С., Кузин Н.В.* Сепаратор для извлечения ферромагнитных частиц из потока сыпучего материала: А.с. 927314 (СССР). 1982.
10. *Деркач В.Г.* Специальные методы обогащения полезных ископаемых. М.: Недра, 1966.
11. *Мулявко В.И., Олейник Т.А., Кириченко А.М.* Многопродуктовый магнитный сепаратор: Пат. 68638 (Укр.). 2012.
12. *Мулявко В.И., Олейник Т.А., Кириченко А.М.* Устройство для магнитной очистки жидкостей и газов: Пат. 67185 (Укр.). 2012.
13. *Гурин А.А., Мулявко В.И., Ляшенко В.И.* Инновационные технологии пылеулавливания на горно-обогажительных предприятиях // Безопасность труда в пром-сти. 2013. No. 9. С. 54—59.
14. *Ляшенко В.И., Чекушина Е.В., Олейник М.О., Бондуривская О.И.* Развитие технологий и технических средств обогащения титаносодержащих руд // Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: Матер. 14-й междунар. конф. (г. Бишкек, Кыргызстан, 14—20 сент. 2015 г.). М.: РУДН, 2015. Ч. 2. С. 193—195.
15. *Воробьев А.Е., Мулявко В.И., Ляшенко В.И.* Научно-технические основы экологических технологий обогащения железной руды // Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр: Матер. 14-й междунар. конф. (г. Бишкек, Кыргызстан, 14—20 сент. 2015 г.). М.: РУДН, 2015. Ч. 2. С. 195—198.
3. *Vassilev S.V.* Some elements in the ash wastes HES in Bulgarian. *Fuel.* 1994. Vol. 73. No. 3. P. 367—374.
4. *Ri Jong. Nat.* Characteristics of fly ash thermal power plants in North Korea. *Bull. Acad. Sci. DPR Koreu.* 1998. No. 1. P. 33—37.
5. *Shinkorenko S.F.* Spravochnik po obogashcheniyu rud chernykh metallov [Directory enrichment of ferrous metals]. Moscow: Nedra, 1980.
6. Spravochnik po obogashcheniyu rud. Spetsial'nye i vspomogatel'nye protsessy [Directory of enrichment of ores. Special and supporting processes]. Eds. O.S. Bogdanov, V.I. Revnivitsev. Moscow: Nedra, 1983.
7. *Karmazin V.I., Karmazin V.V.* Magnitnye metody obogashcheniya [Magnetic methods of enrichment]. Moscow: Nedra, 1978.
8. *Nevzlin B.I., Zagirnyak M.V.* Ustroistvo dlya magnitnogo razdeleniya materialov [The device for magnetic separation of materials]: A.s. 946677 (USSR). 1982.
9. *Horov L.T., Favstritsky V.S., Kuzin N.V.* Separator dlya izvlecheniya ferromagnitnykh chastits iz potoka sypuchego materiala [The separator for extraction of ferromagnetic particles from a stream of bulk material]: A.s. 927314 (USSR). 1982.
10. *Derkach V.G.* Spetsialnye metody obogashcheniya poleznykh iskopaemykh [Special methods of mineral processing]. Moscow: Nedra, 1966.
11. *Mulyavko V.I., Oliinyk T.A., Kirichenko A.M.* Mnogoproduktovyi magnitnyi separator [Multiproduct magnetic separator]: Pat. 68638 (Ukr.). 2012.
12. *Mulyavko V.I., Oliinyk T.A., Kirichenko A.M.* Ustroistvo dlya magnitnoi ochistki zhidkostey i gazov [Device for magnetic treatment of liquids and gases]: Pat. 67185 (Ukr.). 2012.
13. *Gurin A.A., Mulyavko V.I., Lyashenko V.I.* Innovatsionnye tekhnologii pyuleulavlivaniya na gorno-obogatitelnykh predpriyatiyakh [Innovative technologies dust at mining and processing enterprises]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti.* 2013. No. 9. P. 54—59.
14. *Lyashenko V.I., Chekushina E.V., Oleynik M.O., Bondurivskaya O.I.* Razvitiye tekhnologii i tekhnicheskikh sredstv obogashcheniya titanosoderzhashchikh rud [Development of technologies and means of enrichment of titanium ores]. In: *Resursovosproizvodyashchie, malootkhodnye i prirodookhrannye tekhnologii osvoeniya rud [Resursovosproducing, low-waste and environmental technology development of mineral resources]*: Mater. 14-th Intern. conf. (Bishkek, Kyrgyzstan, 14—20 Sept. 2015). Moscow: RUDN, 2015. Part 2. P. 193—195.
15. *Vorob'ev A.E., Mulyavko V.I., Lyashenko V.I.* Nauchno-tekhnicheskie osnovy ekologicheskikh tekhnologii obogashcheniya zheleznoi rudy [Scientific-technical basis for environmental technologies iron ore beneficiation]. In: *Resursovosproizvodyashchie, malootkhodnye i prirodookhrannye tekhnologii osvoeniya nedr [Resursovosproducing, low-waste and environmental technology development of mineral resources]*: Mater. 14-th Intern. conf. (Bishkek, Kyrgyzstan, 14—20 Sept. 2015). Moscow: RUDN, 2015. Part 2. P. 195—198.

References

1. *Louison K.* Infrakrasnye spektry pogloshcheniya neorganicheskikh veshchestv [Infrared absorption spectra of inorganic compounds]. Transl. E.M. Diyanov. Ed. N.A. Irisova Moscow: Mir, 1964.
2. *Jagannadham S.* The method of ash disposal of large thermal power plants HES in India. *Irrig. Power J.* 1993. Vol. 50. No. 3. P. 33—42.