

УДК 621.928.8:622.807

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ОСАДИТЕЛЬНЫХ КАМЕР ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ ПЫЛИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Мулявко В.И.¹, д.т.н., профессор кафедры физики (muwali2012@yandex.ru)

*Олейник Т.А.¹, д.т.н., профессор, заведующая кафедрой обогащения
полезных ископаемых (taoliynik@gmail.com)*

*Ляшенко В.И.², к.т.н., начальник научно-исследовательского отдела,
старший научный сотрудник (vi_lyashenko@mail.ru)*

¹ **Криворожский национальный университет**
(50027, Украина, г. Кривой Рог, ул. Виталия Матусевича, 11)

² **ГП «УкрНИПИПромтехнологии»**
(52204, Украина, Днепропетровская обл., г. Желтые Воды, Бульвар Свободы, 37)

Аннотация. Приведены основные научные и практические результаты повышения эффективности работы вертикальных осадительных камер для утилизации пыли металлургического производства на основе разработки и внедрения аппаратов нового поколения, способных улучшить охрану окружающей среды и условия труда рабочих, уменьшить потери полезного продукта. Проанализированы технические и эксплуатационные характеристики существующих пылеуловителей и средств для снижения выбросов пыли в атмосферу и современные методы пылеочистки. Созданы теоретические основы инерционного пылеулавливания и определены параметры дополнительных осадительных поверхностей, обеспечивающих выход пылевых частиц из турбулентного потока в ламинарный, для исключения вторичного выноса пыли из аппарата. Описаны научно-технические основы выбора и разработки вертикальной конструкции пылеосадительной камеры с волоконными шторами и экономического обоснования замены циклонов на пылеосадительную камеру. Даны теоретическое обоснование механизма осаждения пыли в осадительных камерах и результаты лабораторных исследований, их эффективности с волоконными шторами и инерционном осаждении аэрозоля на волоконную штору. Доказано, что вертикально направленный очищаемый поток, взаимодействуя вверху камеры с отраженным от дискообразной перегородки потоком, перенаправляется в горизонтальном направлении вдоль радиусов корпуса камеры с уменьшающейся скоростью по мере удаления от центра к периферии в интервале от 0,35 до 0,035 м/с. При производительности аспирационной установки 7500 м³/ч, диаметре внутренней шторы 0,5 м, высоте камеры 3,8 м и скорости фильтрации газа через эту штору 0,35 м/с скорость фильтрации через штору диаметром 5 м равна 0,035 м/с. Предложен новый механизм осаждения пыли в осадительных камерах, а также определено влияние электрического заряда частицы и волокна на эффективность осаждения пыли в камере. Разработана конструкция новой вертикальной пылеосадительной камеры с волоконными шторами, в которой скорость радиального потока уменьшается при переходе от одной шторы к другой, что обеспечивает условия перехода от инерционного осаждения частиц к диффузионному. Это увеличивает степень улавливания тонкодисперсной пыли до 95 % при начальной скорости воздушного потока в камере 0,35 м/с.

Ключевые слова: пылеосадительные камеры, металлургическое производство, пыль, утилизация, эффективность, механизм осаждения.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-4-276-284

Процесс получения готовой продукции горнорудными предприятиями связан с выделением большого количества пыли, объемы которой резко возрастут с вынужденным переходом к добыче и обогащению бедных кварцитов. Последние содержат повышенное количество свободного диоксида кремния и имеют высокую прочность. Переход к добыче бедных концентратов связан с предпочтением сухих технологий переработки горной массы, снижающий использование пресной воды. Мокрое извлечение уловленной пыли и выбросы ее в атмосферу приводят к потерям (5 – 10 % от исходного материала) полезного продукта на обогатительных фабриках [1 – 3]. Поэтому повышение эффективности работы вертикальных осадительных камер для утилизации пыли металлургического производства на основе разработки и внедрения аппаратов нового поколения,

способных улучшить охрану окружающей среды и условия труда рабочих, уменьшить потери полезного продукта, – важная научная, практическая и социальная задача, требующая неотлагательного решения [4, 5].

В ходе исследований были поставлены следующие задачи:

– проанализировать технические и эксплуатационные характеристики существующих пылеуловителей и средств для снижения выбросов пыли в атмосферу и современные методы пылеочистки;

– создать теоретические основы инерционного пылеулавливания и определить параметры дополнительных осадительных поверхностей, обеспечивающих выход пылевых частиц из турбулентного потока в ламинарный, для исключения вторичного выноса пыли из аппарата;

– обосновать процесс фильтрации запыленного газа через волоконную штору и влияние электрического заряда частицы и волокна на эффективность осаждения пыли в камере;

– разработать и испытать в промышленных условиях пылеосадительную камеру с волоконными шторами.

Для решения поставленных задач использовали комплексный метод, включающий анализ литературных источников, методы теоретических обобщений физических свойств пыли, физическое и математическое моделирование, результаты лабораторных и промышленных исследований, выполнение расчетов и технико-экономических обоснований, промышленные и экспериментальные исследования на полигонах по стандартным методикам.

Для исследований выбрали вертикальную конструкцию пылеосадительной камеры с волоконными шторами, включающей анализ «сухих» пылеуловителей. Показано, что для эффективной и надежной работы аспирационной сети необходимо в качестве первой ступени очистки применять предлагаемые пылеосадительные камеры с волоконными шторами [6]. На практике часто весьма существенную роль играет рациональное использование промплощадки (из-за ограничения рабочих площадей предприятий). В таких случаях возникают затруднения при установке довольно громоздких по габаритам пылеосадительных камер. Известны компактные вертикальные пылеосадительные камеры с центральной подачей очищаемого газа, в которых за счет радиального уменьшения скорости запыленного потока улавливаются частицы, имеющие скорость оседания, которая выше скорости пылегазового потока. Эти аппараты применяются для улавливания крупных частиц из газов небольших вагранок. Более сложными являются камеры рефлекторного типа, в которых пыль собирается в кольцевом коллекторе, окружающем дымовую трубу [7]. Основным показателем при разработке конструкции вертикальной пылеосадительной камеры является допустимая максимальная скорость воздушного потока в ней. При этом следует учитывать возможность вторичного уноса пыли. Скорость осаждения пыли зависит от диаметра частиц и их плотности. Поэтому считаем одним из важнейших вопросов эффективной работы вертикальной камеры определение оптимальной скорости воздушного потока в ней при максимальной степени улавливания пылевых частиц. Исходя из требуемой производительности фильтра, определяется площадь фильтрующего слоя камеры.

Многочисленные исследования и наблюдения, работа научно-исследовательских институтов, анализ проектной документации, опыт эксплуатации аспирационных систем позволяют с достаточной степенью точности определить необходимые расходы воздуха для обеспечения нормальных санитарных условий в

цехах промышленных предприятий. При расчете различных аспирационных систем количество аспирируемого воздуха из укрытий составляет от 7–7,5 до 13–14 тыс. м³/ч. Поэтому наиболее целесообразно вертикальные пылеосадительные камеры конструировать на расход воздуха 7,5 тыс. м³/ч с учетом 10 %-ной добавки на потери воздуха в воздуховодах и в аппарате очистки. Это позволит изготавливать их серийно и легко транспортировать автомобильным или железнодорожным транспортом, не нарушив габаритного ограничения при перевозке.

Опыт использования на предприятиях пылеосадительной камеры с волоконными шторами подтвердил, что такие камеры могут с успехом заменять центробежные аппараты на первой стадии газоочистки. Однако результаты лабораторных и промышленных испытаний показали, что в этих камерах эффективность инерционного осаждения очень мелких (менее 1 мкм) частиц ничтожно мала. Поэтому необходимо изучить влияние диффузионного механизма осаждения частиц на волокно и волоконную штору при скорости фильтрации 0,35 м/с [8–15]. Принимаем, что за время t на поверхность волокна осаждаются все частицы, находящиеся от нее на очень малом расстоянии (рис. 1)

$$\delta = 2(Dt\pi^{-1})^{0,5}; \quad (1)$$

здесь D – коэффициент диффузии, м²/с.

Распределение скоростей вблизи цилиндрической поверхности при установившемся ламинарном течении приближенно можно представить в виде [8]

$$v = 3v_{\infty} \frac{\delta(R+l)}{l^2}, \quad (2)$$

где R – радиус волокна, м; l – расстояние между волокнами, м.

Поскольку непосредственно у поверхности волокна скорость потока равна нулю, то средняя скорость течения в рассматриваемом слое равна

$$\langle v \rangle = 1,5\delta v_{\infty} \frac{R+l}{l^2}. \quad (3)$$

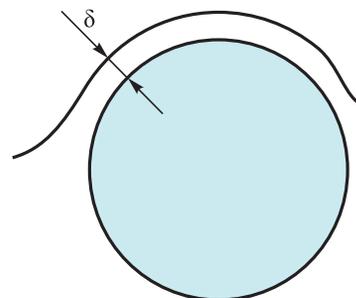


Рис. 1. Диффузионное осаждение частиц (радиус волокна 25 мкм)

Fig. 1. Diffusion precipitation of particles (fiber radius of 25 μm)

За время t находящаяся в этом слое частица может пройти максимальное расстояние, равное половине длины окружности, т.е.

$$\pi R = 1,5\delta v_{\infty} \frac{R+l}{l^2} t. \quad (4)$$

Исключим время из уравнений (1) и (4) и получим

$$\delta = \left(\frac{8Dl^2R}{3(R+l)v_{\infty}} \right)^{1/3}. \quad (5)$$

Поток аэрозоля у поверхности волокна в очень тонком слое толщиной δ равен

$$n \int_0^{\delta} v d\delta = 1,5\delta^2 n v_{\infty} \frac{R+l}{l^2}; \quad (6)$$

здесь n – концентрация пыли в очищаемом потоке, $г/м^3$.

Так как полный поток частиц составляет $n v_{\infty} (R+l)$, то эффективность диффузионного осаждения частиц на волокно равна $\eta_d = 1,5\delta^2 l^{-2}$, или после подстановки в это уравнение значения толщины слоя (5) получаем

$$\eta_d = 2 \left(\frac{3DR}{l^2 v_{\infty}} \right)^{2/3}. \quad (7)$$

Выполнив вычисления эффективности осаждения частиц на волоконную штору, такие же как при расчете инерционного осаждения, получим

$$\eta_d = 1 - \exp \left[- \frac{2H}{R+l} \left(\frac{3RD}{l^2 v_{\infty}} \right)^{2/3} \right]. \quad (8)$$

Расчеты эффективности диффузионного осаждения выполнены согласно формуле (8) для шторы толщиной 10 см с радиусом волокон 5 и 25 мкм и расстоянием между ними 0,4, 0,8 и 1,2 мм при двух скоростях течения 0,35 и 0,035 м/с. Пользуясь полученными формулами диффузионного (8) и инерционного

$$\eta_{ш} = 1 - \exp \left\{ -H \frac{R+d_q}{2\sqrt{3}(R+l)^2} \left[1 - \exp \left(- \frac{0,1\tau v_{\infty}}{R+0,5d_q} \right) \right] \right\} \quad (9)$$

осаждения частиц пыли на волоконную штору, предложили использовать суммарную эффективность улавливания пылевой камеры с волоконными шторами:

$$\eta_{ш} = 1 - \exp \left(- \frac{0,1\tau v_{\infty}}{R+0,5d_q} \right). \quad (10)$$

Был выполнен расчет пылеулавливания монодисперсной пыли плотностью 2544 $кг/м^3$ одной шторой толщиной 10 см при расстоянии между волокнами от 0,8 до 2,4 мм и радиусами волокон 5, 25 и 50 мкм (табл. 1). Из расчетов видно, что волоконная штора с диаметром волокон в 5 мкм способна улавливать и мелкие частицы (5 мкм) с эффективностью до 66 %, но необходимо поддерживать постоянными (на уровне 1 мм) расстояния между волокнами. Этого можно достичь, ограничивая штору жесткой сеткой с двух сторон [16, 17].

Провели расчет эффективности осаждения частиц в интересующем нас размерном интервале (от 1 до 10 мкм) для частиц пыли, плотность которых соответственно равна 2544 $кг/м^3$ и 4957 $кг/м^3$. Причем, расчет выполнен для разных по размеру цилиндрических поверхностей радиусом 5, 15, 25 и 50 мкм и скорос-

Таблица 1

Расчетная эффективности осаждения пыли одной волоконной шторой

Table 1. Estimated efficiency of the dust precipitation from one fiber curtain

d, мкм	Эффективность осаждения, %, при								
	l = 0,4 мм			l = 0,8 мм			l = 1,2 мм		
	радиусе волокна, мкм			радиусе волокна, мкм			радиусе волокна, мкм		
	5	25	50	5	25	50	5	25	50
1	5,11	4,43	3,92	1,32	1,19	1,11	0,59	0,54	0,52
2	18,95	16,65	14,92	5,18	4,72	4,43	2,34	2,17	1,30
3	36,47	33,39	30,31	10,84	10,22	9,63	5,23	4,77	2,07
4	52,74	50,82	47,09	17,28	17,16	16,34	8,12	8,19	7,00
5	69,66	66,00	62,4	27,70	24,90	24,02	11,37	12,18	11,93
6	75,04	77,68	74,95	29,62	32,83	32,16	14,51	16,52	14,17
7	81,50	85,80	84,13	34,84	40,50	40,30	17,40	20,98	16,42
8	86,15	91,23	90,35	39,36	47,58	48,07	20,01	25,39	26,40
9	89,35	94,60	94,31	43,25	53,90	55,22	22,34	29,62	31,03
10	91,63	96,65	96,72	46,62	59,40	55,9	24,43	33,56	35,70

ти потока 0,35 м/с (рис. 2). Из формул (8) – (10) следует, что эффективность инерционного осаждения растет при увеличении размера и плотности частиц и скорости потока, а диффузионного осаждения – уменьшается. При очень больших значениях диаметра частиц и очень малых значениях диаметра волокна суммарная эффективность улавливания пылевой камеры с волоконными шторами стремится к 100 %. Кроме того, кривая эффективности как функция диаметра части-

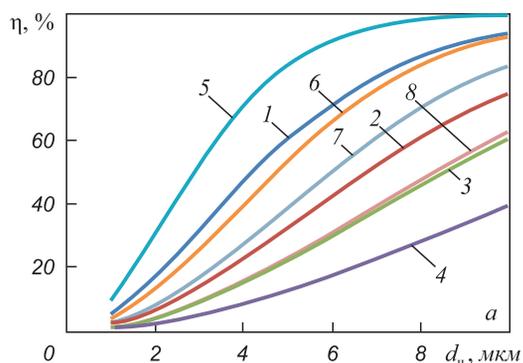


Рис. 2. Результаты расчета эффективности инерционного осаждения частиц на одиночный цилиндр от диаметра частицы d_p и радиуса волокна, мкм, по рядам при плотности частицы $\rho = 2544 \text{ кг/м}^3$: ряд 1 – $R = 5$; ряд 2 – $R = 15$; ряд 3 – $R = 25$; ряд 4 – $R = 50$; при $\rho = 4957 \text{ кг/м}^3$: ряд 5 – $R = 5$; ряд 6 – $R = 15$; ряд 7 – $R = 25$; ряд 8 – $R = 50$

Fig. 2. Results of calculating the efficiency of inertial precipitation of particles on a single cylinder from the diameter of a particle d_p and the radius of a fiber, μm in rows at a particle density $\rho = 2544 \text{ kg/m}^3$: row 1 – $R = 5$; row 2 – $R = 15$; row 3 – $R = 25$; row 4 – $R = 50$; at $\rho = 4957 \text{ kg/m}^3$: row 5 – $R = 5$; row 6 – $R = 15$; row 7 – $R = 25$; row 8 – $R = 50$

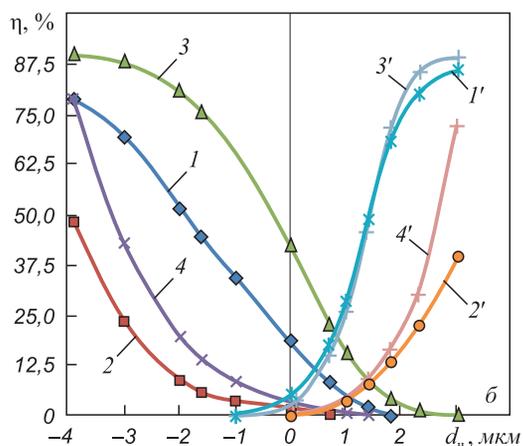


Рис. 3. Эффективность диффузионного (графики слева) и инерционного (номера кривых отмечены штрихами) осаждения частиц, размеры которых лежат в интервале 0,02 – 10 мкм, на волоконной шторе толщиной 10 см при скорости фильтрации 0,35 м/с

Fig. 3. The efficiency of diffusion (the graphs on the left) and inertial (the number of the curves are marked with dashes) deposition of particles, dimensions of which lie in the interval 0.02 – 10 μm , on a fiber curtain of 10 cm thickness at a filtration rate of 0.35 m/s

цы имеет минимум. Причем при увеличении скорости фильтрации хорошо просматривается смещение минимума в сторону уменьшения диаметра частицы (рис. 3). Дополнительные параметры расчета эффективности диффузионного и инерционного осаждения частиц приведены в табл. 2.

Разработали вертикальную цилиндрическую камеру с волоконными шторами [18]. Эта камера состоит из цилиндрического корпуса 1, снабженного с двух сторон конусным диффузором 2 для выхода очищенного воздуха и бункером 3 для сбора и выпуска уловленной пыли (рис. 4). Внутри (в верхней части) размещена платформа 4, имеющая форму диска, диаметр которого меньше внутреннего диаметра корпуса 1. На этой платформе,

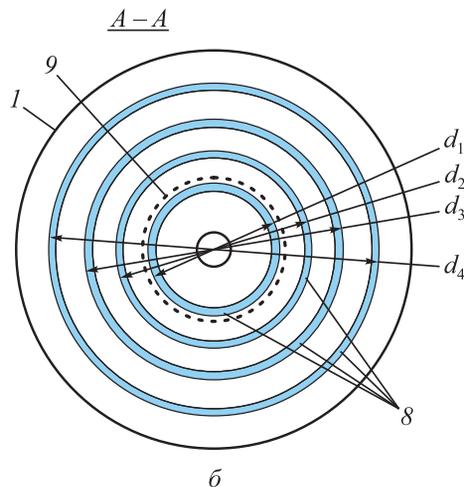
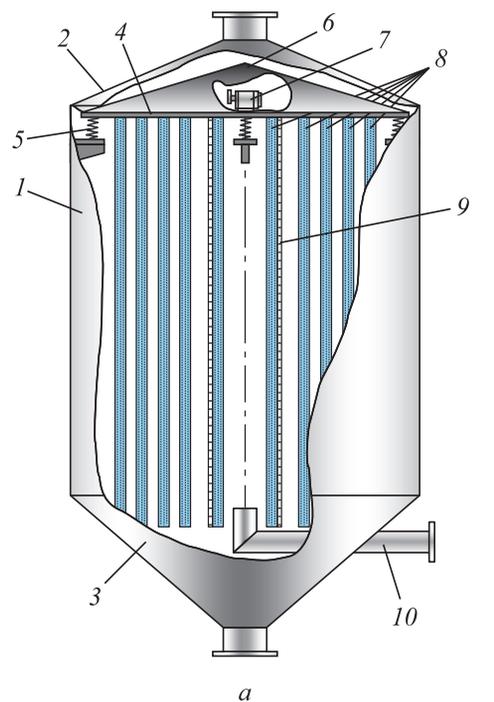


Рис. 4. Вертикальная пылесадительная камера с волоконными шторами:
а – общий вид; б – сечение по А-А

Fig. 4. Vertical dust-collecting chamber with fiber curtains:
а – general view; б – cross section along A-A

Таблица 2

Дополнительные параметры расчета

Table 2. Additional calculation parameters

Номер кривой	Радиус волокна, мкм	Расстояние между волокнами, мм
1 и 1'	5	0,8
2 и 2'	5	2,4
3 и 3'	25	0,8
4 и 4'	25	2,4

укрепленной в корпусе при помощи пружин 5, размещен под укрытием 6 вибратор 7. Снизу к этой платформе прикреплены пряди свободно свисающих волокон, образующих шторы 8, коаксиально расположенные в корпусе, жесткая сетка 9, фиксирующая первую (наименьшую) штору с внешней стороны, и отбойный диск из износостойкого материала. Для подачи очищаемого газа в аппарат служит патрубок 10, размещенный в нижней части камеры и направляющий газовый поток вверх по оси корпуса.

Аппарат работает следующим образом. Поток очищаемого газа, движущийся в трубопроводе со скоростью v_0 , через патрубок 10 поступает в цилиндрическое пространство, образованное первой зафиксированной сеткой шторой диаметром d_1 . Отразившись от отбойного диска, он смешивается с выходящим потоком из патрубка 10, что обеспечивает выравнивание давления в цилиндрическом пространстве. Очень крупные частицы под действием гравитационной силы выпадают из потока в бункер 3. Равномерность давления в этом пространстве обеспечивает одинаковую скорость фильтрации аэрозоля через первую штору. Эту скорость можно определить из уравнения

$$v_1 = v_0 \frac{S_T}{\pi d_1 H} = \frac{q}{\pi d_1 H}, \quad (11)$$

где S_T – площадь сечения трубопровода, m^2 ; Q – производительность аспирационной системы, m^3/c ; d и H – диаметр и высота шторы, m .

Работа этого аппарата не отличается от работы уже описанной выше камеры с волоконными шторами. Отличие заключается лишь в том, что скорость фильтра-

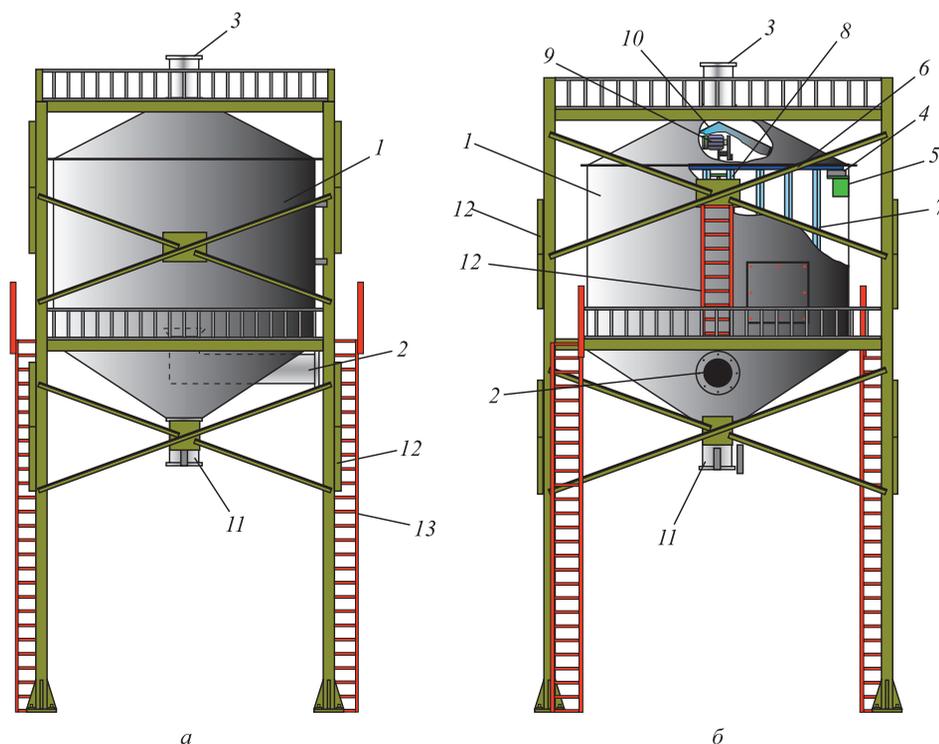


Рис. 5. Модуль вертикальной камеры с волоконными шторами: со стороны заезда транспорта для разгрузки уловленной пыли (а) и с противоположной стороны (б):

1 – корпус; 2 и 3 – патрубки введения запыленного и отвода очищенного газа; 4 и 5 – гибкое крепление платформы с волоконными шторами; 6 – платформа в форме диска; 7 – волоконные шторы; 8 – металлическая сетка; 9 и 10 – устройство для стряхивания пыли и его укрытие; 11 – затвор для выпуска пыли с бункера; 12 и 13 – металлический каркас аппарата и лестницы для его обслуживания

Fig. 5. Module of the vertical chamber with fiber curtains: on the side of the transport arrival for unloading of the trapped dust (a) and from the opposite side (b):

1 – body; 2 and 3 – nozzles for the introduction of dusty and discharge of the purified gas; 4 and 5 – flexible platform fastening with the fiber curtains; 6 – platform in the shape of a disk; 7 – fiber curtains; 8 – metal grid; 9 and 10 – device for dust shaking and its shelter; 11 – breech for dust discharge from the chamber; 12 and 13 – metallic body of the unit and ladder for its servicing

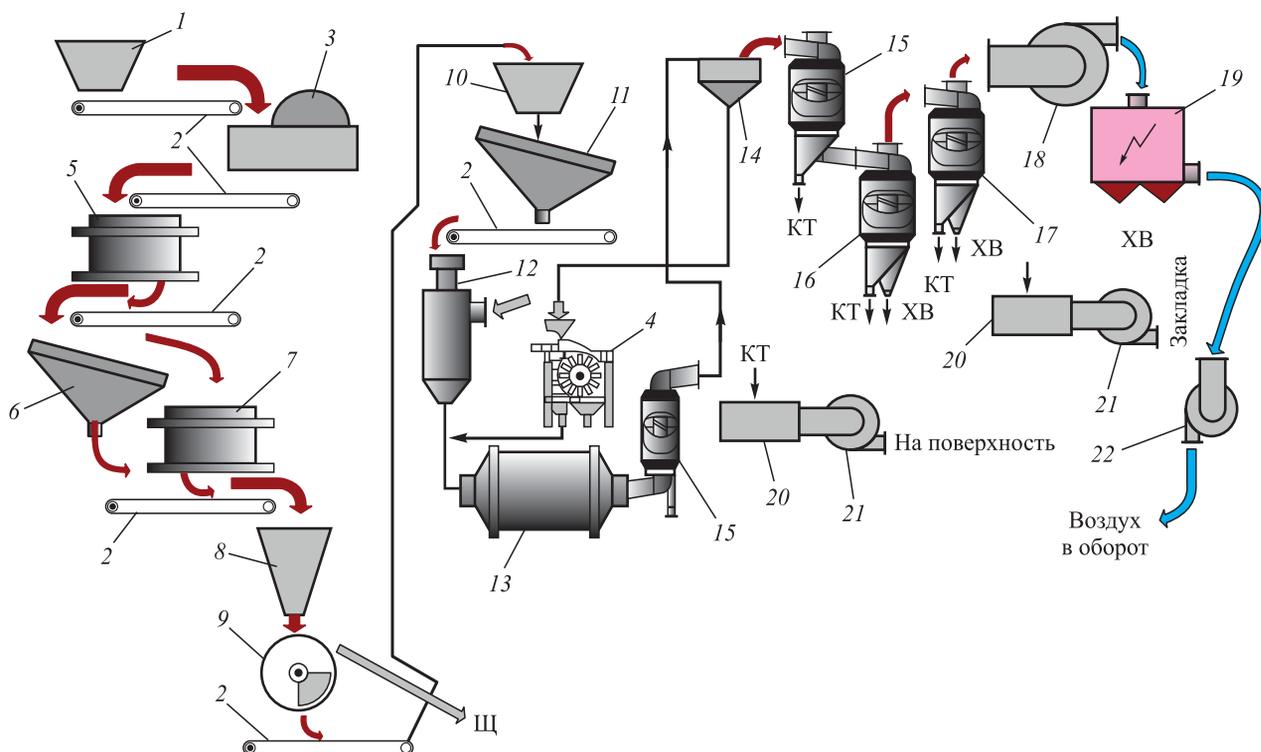


Рис. 6. Схема цепи аппаратов опытно промышленной установки сухого обогащения магнетитовых кварцитов: 1, 8, 10 и 20 – бункера; 2 – конвейер; 3 – щековая дробилка; 4 и 9 – магнитные сепараторы; 5 и 7 – дробилки; 6 и 11 – грохота; 12 – сушилка; 13 – мельница; 14 – классификатор; 15 – сепараторы циклонного типа; 16 и 17 – магнитные циклоны; 18, 21 и 22 – вентиляторы; 19 – электрофильтр

Fig. 6. Scheme of the devices circuit for a pilot industrial installation for dry enrichment of magnetite quartzites: 1, 8, 10 and 20 – bunkers; 2 – conveyor; 3 – jaw crusher; 4 and 9 – magnetic separator; 5 and 7 – crusher; 6 and 11 – sizing screens; 12 – dryer; 13 – mill; 14 – classifying screen; 15 – cyclone separators; 16 and 17 – magnetic cyclones; 18, 21 and 22 – fans; 19 – electrostatic precipitator

ции через последующие шторы значительно уменьшается обратно пропорционально отношению диаметров штор (рис. 5), т.е.

$$v_{i+1} = v_i \frac{d_i}{d_{i+1}}. \quad (12)$$

Очищенный от пыли газ сквозь кольцевую щель, образованную корпусом 1 и платформой в форме диска 4, выходит в диффузор 2. Вертикальный цилиндрический корпус камеры 1, ограниченный с двух сторон диффузорами с выходным патрубком 3 вверху, входным патрубком 2 для подачи очищаемого воздуха и затвором для выпуска уловленной пыли 11 вниз, установлен на металлический каркас с лестницами 12 и 13 для его обслуживания. Такая камера эффективна и компактна, особенно при малых объемах очищаемого газа, поэтому ее можно устанавливать непосредственно рядом или над источником пылевыделения, а хорошо очищенный воздух выбрасывать непосредственно в цех. Таким образом, можно отказаться от двух стадий пылеочистки и нерентабельной (в основном не работающей) централизованной аспирационной установки [19 – 22].

Оценку экономической эффективности замены циклонов на пылеосадительную камеру осуществляли

путем сравнения затрат на очистку равного количества аспирируемого воздуха циклонами и камерой. При этом предполагалось, что качество очистки воздуха от пыли той или другой установкой одинаково, хотя в производственных условиях стабильная очистка воздуха в циклонах может быть достигнута только при соблюдении проектных аэродинамических параметров аспирационной системы. Затраты на сооружение установок и обслуживавший персонал практически одинаковы. Сравнение провели по стоимости расходуемой электроэнергии, считая что затраты на капитальное строительство почти одинаковые. Установочная мощность N электродвигателя для обеспечения проектной производительности пылеосадительной камеры составила 28 кВт. Расход электроэнергии на 1000 м³ аспирируемого воздуха при производительности камеры $Q = 15$ тыс. м³/ч составит

$$A_k = \frac{N}{Q} = \frac{28}{15} = 1,436 \text{ кВт}\cdot\text{ч}. \quad (13)$$

Учитывая большое аэродинамическое сопротивление циклонов, которое более чем в 20 раз превышает сопротивление камеры, установочная мощность электропривода циклонов должна быть не

менее 40 кВт. Расход электроэнергии на 1000 м³ очищаемого воздуха составит $A_k = 2,666$ кВт·ч. Годовой экономический эффект при замене четырех циклонов ЦН-15-500 на пылесадительную камеру определяется по формуле

$$\xi = \frac{A_{ц}}{A_k} = \frac{2,666}{1,436} = 1,857. \quad (14)$$

Таким образом, применение пылесадительной камеры вместо групповых циклонов позволит увеличить в 7 – 10 раз срок службы пылеулавливающей установки и уменьшить в 1,9 – 3,0 раза расход электроэнергии.

Была разработана схема цепи аппаратов [23], согласно которой исходная руда с бункера поступает в щековую дробилку, где она последовательно дробится в двух дробилках, предварительно пройдя через грохот (рис. 6). Дробленый материал на сепараторе разделяется на пустую породу (щебень) и магнитную фракцию, которая поступает в бункер грохота. Подрешеточный материал грохота после сушки в сушилке идет на измельчение в сухой мельнице. Для очистки от пыли аспирационных выбросов аппаратов предлагается вертикальная пылесадительная камера [7].

Измельченный материал в виде дисперсного потока поступает в нижний патрубок сепаратора циклонного типа [24]. В этом сепараторе магнитным полем извлекаются раскрытые рудные частицы, а остальной материал выносится воздушным потоком в инерционный классификатор, из которого крупные частицы самотеком поступают в барабанный сепаратор [25]. С целью выделения из потока немагнитной компоненты его магнитная система вращается с рабочим барабаном с некоторым эксцентриситетом. Извлеченный в сепараторе слабомагнитный материал направляется на доизмельчение в мельницу, а пустая порода – в хвосты, т.е. в соответствующий бункер. Достаточно измельченный материал поступает из классификатора на сепарацию сначала в сепараторе (через верхний патрубок), а затем на последовательную сепарацию в двух циклонных сепараторах различного диаметра [26]. Продукты обогащения на трех сепараторах направляются в приемные бункеры вакуумнасосов в соответствующие бункеры для концентрата и хвостов. Запыленный воздушный поток посредством вентилятора направляется на очистку от пыли в электрофильтр с магнитным полем для извлечения из нее пылеобразных остатков магнитной компоненты [27]. Очищенный воздух вентилятором подается на вход мельницы, тем самым измельчение и обогащение выполняется в замкнутом по воздуху цикле. Возможна схема аппаратов, в которой очищается от пыли в электрофильтре только часть воздушного потока, которая выбрасывается в атмосферу, компенсируя возможные подсосы, поскольку система аппаратов работает под разрежением. Аспирационные выбросы от дробилок и грохотов можно очищать в два этапа: сначала

ла в циклонах соответствующей производительности, а затем в вертикальной осадительной камере с волоконными шторами.

Выводы. Вертикально направленный очищаемый поток, взаимодействуя вверху камеры с отраженным от доскообразной перегородки потоком, перенаправляется в горизонтальном направлении вдоль радиусов корпуса камеры с уменьшающейся скоростью в интервале от 0,35 до 0,035 м/с по мере удаления от центра к периферии. Поэтому каждый последующий ряд нитей улавливает все более мелкие частицы. Возможность применения вертикальных пылесадительных камер в системах аспирации позволит обеспечить нормальные санитарные условия на рабочих местах, предупредить выбросы запыленного воздуха в атмосферу и обеспечит возможность рекуперации, т.е. безотходного процесса, а также использование уловленной пыли, например, в строительной индустрии. Так, при производительности аспирационной установки 7500 м³/ч, диаметре внутренней шторы 0,5 м, высоте камеры 3,8 м и скорости фильтрации газа через эту штору 0,35 м/с скорость фильтрации через штору диаметром 5 м равна 0,035 м/с. Разработана конструкция новой вертикальной пылесадительной камеры с волоконными шторами, в которой скорость радиального потока уменьшается при переходе от одной шторы к другой, что обеспечивает условия перехода от инерционного к диффузионному осаждению частиц. Такое поочередное включение механизмов осаждения увеличивает степень улавливания тонкодисперсной пыли до 95 % при начальной скорости воздушного потока в камере 0,35 м/с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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. P. 65140-1–165140-14.
3. Environmental Engineeris, Handbook. Air Pollution / Liptak B.G. ed. Radnor, Pennsylvania, Chilton Book Company, 1974. Vol. 2. 1340 p.
4. Мулявко В.И., Олейник Т.А., Ляшенко В.И., Кириченко А.М., Олейник М.О. Повышение эффективности работы осадительных камер для улавливания пыли металлургического производства // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. Том 59. № 7. С. 456 – 464.
5. Davies C.N. Air Filtration. London – New York, Academic Press, 1973. 172 p.
6. Пат. 16983. А. Украина. Пылеуловитель / А.М. Кириченко, В.И. Мулявко, И.С. Багрий, В.И. Бережной и др. Опубл. 29.08.97. Бюл. № 4.
7. Пат. 16963. А. Україна. Вертикальна пилоосаджувальна камера / А.М. Кириченко, В.І. Мулявко. Опубл. 14.11.99. Бюл. №7.
8. Kirsch A.A., Stechkina I.B. The theory of aerosol filtration with fibrous filters. In: Fundamental of Aerosol Science / Shaw D. ed. – New York, Wiley, 1978, pp. 165 – 256.
9. Aguilera G., Arismendy J. Rheological characterization of parameters inside a hydrocyclone through variables obtained from

- CFD simulation // Proceedings of XXVII International Mineral Processing Congress, Santiago, Chile, 2014. Chapter 16. P. 41–49.
10. Dündar H., Kalugin A., Delgado M., Palomino A., Türkistali A., Aquino B., Lynch A. Screens and cyclones in closed grinding circuits. Proceedings: XXVII International Mineral Processing Congress, Santiago, Chile, 2014. Chapter 16. P. 65–75.
 11. Ballif J., Greenberg L., Stern A. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 1948. Vol. 9. P. 85–91.
 12. Strauss W. Industrial Gas Cleaning. 2nd ed. Oxford, Pergamon Press, 1975. 622 p.
 13. Справочник по обогащению руд. Специальные и вспомогательные процессы / Под ред. О.С. Богданова, В.И. Ревнищева. – М.: Недра, 1983. – 376 с.
 14. Алиев Г.М. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов. Справочник. – М.: Metallurgia, 1986. – 544 с.
 15. Govender D., Lelinski D., Traczyk F. Hybrid Energy Flotation™ – on the optimization of fine and coarse particle kinetics in a single row // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 2013. Vol. 113. No. 3. P. 383–410.
 16. Мулявко В.И., Олейник Т.А., Ляшенко В.И., Михно С.В., Олейник М.О. Новые технологии и технические средства для сепарации слабомагнитных руд // Обогащение руд. 2014. № 2. С. 43–49.
 17. Козин В.З. Опробование минерального сырья. – Екатеринбург: изд. УГГУ, 2011. – 316 с.
 18. Хопунов Э.А. Селективное разрушение руд и техногенного сырья. – Екатеринбург: УИЦО, 2013. – 429 с.
 19. Чантурия В.А., Козлов А.П., Вайсберг Л.А. Приоритетные направления исследований в области переработки минерального сырья // Обогащение руд. 2014. № 2. С. 3–9.
 20. Юшина Т.И., Петров И.М., Авдеев Г.И., Валавин В.С. Анализ современного состояния добычи и переработки железных руд и железорудного сырья в Российской Федерации // Горный журнал. 2015. № 1. С. 41–47.
 21. Мулявко В.И., Олейник Т.А., Ляшенко В.И., Олейник М.О. Повышение эффективности утилизации графитосодержащей пыли металлургического производства // Бюл. Черная металлургия. 2015. № 11. С. 67–75.
 22. Мулявко В.И., Олейник Т.А., Ляшенко В.И. Совершенствование технологий и технических средств для пылеулавливания при переработке железной руды // КАЗАНТИП–ЭКО–2016. Инновационные пути решения актуальных проблем базовых отраслей, экологии, энерго- и ресурсосбережения: Сб. тр. XXIV Международной науч.-практ. конф., 6–10 июня 2016 г., г. Харьков. – Харьков: ГП «УкрНТЦ «Энергосталь», 2016. С. 147–158.
 23. Пат. 1701375. РФ. Измельчительно сепарационная установка / В.Ф. Бызов, Г.В. Губин, В.И. Мулявко и др. Опубл. 30.12.91. Бюл. № 48.
 24. Пат. 48631. А. Украина. Відцентровий магнітний сепаратор / В.Ф. Бызов, В.І. Мулявко, А.М. Кириченко та інші. Опубл. 15.08.02. Бюл. № 8.
 25. Пат. 2060829. РФ. Магнитный сепаратор для разделения сыпучих материалов / В.Ф. Бызов, Г.В. Губин, В.И. Мулявко и др. Опубл. 27.05.96. Бюл. № 15.
 26. А.с. 1130404. СССР. Циклон / А.П. Янов, Г.А. Жовтуха, В.И. Мулявко и др. Опубл. 23.12.84. Бюл. № 47.
 27. А.с. 1835305. СССР. Электрофильтр / В.Ф. Бызов, В.С. Харламов, В.И. Мулявко и др. Опубл. 23.08.93. Бюл. № 31.

Поступила 12 декабря 2016 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. Vol. 60. No. 4, pp. 276–284.

IMPROVEMENT OF THE EFFICIENCY OF VERTICAL SETTLING CHAMBERS FOR RECYCLING OF METALLURGICAL DUST

V.I. Mulyavko¹, T.A. Oleinik¹, V.I. Lyashenko²

¹ Krivoy Rog National University, Krivoy Rog, Ukraine

² Ukrainian Research and Design Institute for Industrial Technology, Zhovti Vody, Ukraine

Abstract. The main scientific and practical results of improving the efficiency of the vertical collecting chambers for processing the dust of metallurgical industry are described through the development and implementation of a new generation of devices capable to improve environmental protection and working conditions, to reduce the loss of useful product. The authors have analyzed the technical and operational characteristics of the existing precipitators and means to reduce dust emissions into the atmosphere, and modern methods of dust cleaning. The theoretical basis of inertial dust collection was established and the parameters of additional precipitation surfaces were determined, providing output of the dust particles from turbulent laminar flow, to eliminate the secondary dust removal from the apparatus. The authors have described the scientific and technical basis for the selection and development of vertical construction of dust-collecting chamber with fiber curtains and a feasibility study on the replacement of the cyclone dust-collecting chamber. Theoretical study of the mechanism of dust deposition in the dust-collecting chambers and the results of laboratory studies of their efficiency with fiber curtains and inertial deposition of aerosol optic curtain are proposed. It is proved that the vertical-directional but erasable flow interacting with the top of the disc-shaped partitions reflected flow is redirected in a horizontal direction along radii of chamber's body at a decreasing rate as the distance from the center to the periphery in the range is from 0.35 to 0.035 m/s. When the performance of the aspiration unit is $Q = 7500 \text{ m}^3/\text{h}$, diameter of inner

curtains is $d = 0.5 \text{ m}$, the chamber height $H = 3.8 \text{ m}$ and the filtration rate of gas through the curtain is 0.35 m/s, the filtration rate through the curtain with 5 m diameter is 0.035 m/s. The authors have proposed new mechanism of dust deposition in the dust-collecting chamber and the influence of the electric charge of the particle and fiber on the effectiveness of dust deposition in the chamber. The design of a new vertical dust-collecting chamber is described with fiber curtains, in which the radial flow velocity decreases during the transition from one curtain to another, providing conditions for transition from inertial deposition of particles to the diffusion. It increases the collection efficiency of fine dust up to 95 % at initial airflow within the chamber of 0.35 m/s.

Keywords: dust-collecting chamber, metallurgical production, dust, waste, efficiency.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-4-276-284

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. *Environmental Engineering, Handbook. Air Pollution*. Liptak B.G. ed. Radnor, Pennsylvania: Chilton Book Company, 1974, vol. 2, 1340 p.
4. Mulyavko V.I., Oleinik T.A., Lyashenko V.I., Kirichenko A.M., Oleinik M.O. Improving the efficiency of collecting chambers for

- capture of metallurgical dust. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no. 7, pp. 456–464. (In Russ.).
5. Davies C.N. *Air Filtration*. London – New York: Academic Press, 1973, 172 p.
 6. Kirichenko A.M., Mulyavko V.I., Bagrii I.S., Berezhnoi V.I. etc. *Pyleulovitel'* [Dust collector]. Patent no. 16983 A (UA). Byul. 1997, no. 4. (In Russ.).
 7. Mulyavko V.I. *Vertikalna pileosadguvalna kamera* [Vertical dust-collecting chamber]. Patent no. 16963 A (UA). Byul. no. 7. (In Ukr.).
 8. Kirsch A.A., Stechkina I.B. The theory of aerosol filtration with fibrous filters. In: *Fundamental of Aerosol Science*. Shaw D. ed. New York: Wiley, 1978, pp. 165–256.
 9. Aguilera G., Arismendy J. Rheological characterization of parameters inside a hydrocyclone through variables obtained from CFD simulation. *Proceedings of XXVII International Mineral Processing Congress, Santiago, Chile, 2014*. Chapter 16, pp. 41–49.
 10. Dündar H., Kalugin A., Delgado M., Palomino A., Türkistali A., Aquino B., Lynch A. Screens and cyclones in closed grinding circuits. *Proceedings of XXVII International Mineral Processing Congress, Santiago, Chile, 2014*. Chapter 16, pp. 65–75.
 11. Ballif J., Greenberg L., Stern A. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 1948, vol. 9, pp. 85–91.
 12. Strauss W. *Industrial Gas Cleaning. 2nd ed.* Oxford: Pergamon Press, 1975, 622 p.
 13. *Sravochnik po obogashcheniyu rud. Spetsial'nye i vspomogatel'nye protsessy* [Directory of enrichment of ores. Special and supporting processes]. Bogdanov O.S., Revnivtsev V.I. eds. Moscow: Nedra, 1983, 376 p. (In Russ.).
 14. Aliev G.M. *Tekhnika pyleulavlivaniya i ochistki promyshlennykh gazov. Spravochnik* [Technique of dust collection and purification of industrial gases. Directory]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 544 p. (In Russ.).
 15. Govender D., Lelinski D., Traczyk F. Hybrid Energy Flotation™ – on the optimization of fine and coarse particle kinetics in a single row. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2013, vol. 113, no. 3, pp. 383–410.
 16. Mulyavko V.I., Oleinik T.A., Lyashenko V.I., Oleynik, M.O., Mikhno, S.V. Innovation technologies and machinery for separation of feebly magnetic ores. *Obogashchenie Rud*. 2014, no. 2, pp. 43–49. (In Russ.).
 17. Kozin V.Z. *Oprobovanie mineral'nogo syr'ya* [Testing of mineral resources]. Ekaterinburg: UGGU, 2011, 316 p. (In Russ.).
 18. Khopunov E.A. *Selektivnoe razrushenie rud i tekhnogenogo syr'ya* [The selective destruction of ore and technogenic raw materials]. Ekaterinburg: UITsO, 2013, 429 p. (In Russ.).
 19. Chanturiya V.A., Kozlov A.P., Vaysberg L.A. Promising trends in investigations aimed at all-round utilization of mineral raw materials. *Obogashchenie Rud*. 2014, no. 2, pp. 3–9. (In Russ.).
 20. Yushina T.I., Petrov I.M., Avdeev G.I., Valavin V.S. Analysis of state-of-the-art in iron ore mining and processing in Russian Federation. *Gornyi Zhurnal*. 2015, no. 1, pp. 41–47. (In Russ.).
 21. Mulyavko V.I., Oleinik T.A., Lyashenko V.I., Oleinik M.O. Improving the efficiency of utilization of graphite dust of metallurgical production. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2015, no. 11, pp. 67–75. (In Russ.).
 22. Mulyavko V.I., Oleinik T.A., Lyashenko V.I. Improvement of technologies and equipment for dust collection in the processing of iron ore. In: *KAZANTIP-EKO-2016. Innovatsionnye puti resheniya aktual'nykh problem bazovykh otraslei, ekologii, energo- i resurso-sberezheniya: Sbornik trudov XXIV Mezhdunarodnoi nauch.-prakt. konf. 6-10 iyunya 2016 g., Khar'kov* [Kazantip-ECO-2016. Innovative solutions to urgent problems of basic industries, the environment, energy and resource conservation: Proceedings of the XXIV International Sci.-Practical Conf. 6-10 June 2016 in Kharkiv]. Kharkiv: GP "UkrNTTs "Energostal", 2016, pp. 147–158. (In Russ.).
 23. Byzov V.F., Gubin G.V., Mulyavko V.I. etc. *Izmel'chitel'no-separatsionnaya ustanovka* [Crushing separation plant]. Patent RF no. 1701375. *Byulleten' izobretenii*. 1998, no. 48. (In Russ.).
 24. Bizov V.F., Mulyavko V.I., Kirichenko A.M. etc. *Vidtsentrovii magnitnii separator*. Patent no. 48631. A (UA). *Byul.* 2002, no. 8. (In Ukr.).
 25. Byzov V.F., Gubin G.V., Mulyavko V.I. etc. *Magnitnyi separator dlya razdeleniya sypuchikh materialov* [Magnetic separator for bulk materials separation]. Patent RF no. 2060829. Opubl. 27.05.96. *Byulleten' izobretenii*. 1996, no. 15. (In Russ.).
 26. Yanov A.P., Zhovtukha G.A., Mulyavko V.I. etc. *Ziklon* [Cyclone]. Certificate of authorship USSR no. 1130404. *Byul.* 1984, no. 47. (In Russ.).
 27. Byzov V.F., Kharlamov V.S., Mulyavko V.I. etc. *Elektrofil'tr* [Electrofilter]. Certificate of authorship USSR no. 1835305. *Byul.* 1993, no. 31. (In Russ.).

Information about the authors:

V.I. Mulyavko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Physics (muwaliz012@yandex.ru)

T.A. Oleinik, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Mineral Processing (taoliynik@gmail.com)

V.I. Lyashenko, Cand. Sci. (Eng.), Head of Research Department, Senior Researcher (vi_lyashenko@mail.ru)

Received December 12, 2016