

УДК 622.807 : 621.928.8

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ПЫЛЕУЛАВЛИВАНИЯ НА ГОРНО-ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

© 2014 г. **А.А. Гурин, В.И. Мулякко, В.И. Ляшенко**

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

ГП «УкрНИПИИпромтехнологии», г. Желтые Воды, Украина

Статья поступила в редакцию 3.02.13 г., доработана 23.04.14 г., подписана в печать 25.04.14 г.

Приведены основные научные и практические результаты создания и внедрения технологий и технических средств для пылеулавливания на горно-обогатительных предприятиях. Определены механические, электрические, магнитные свойства пыли и отдельных ее частиц. Теоретически обоснованы, разработаны и внедрены аппараты сухого пылеулавливания. Результаты исследований использованы в промышленности с положительным эффектом и интересны для специалистов цветной, горнорудной, угольной и других горнодобывающих отраслей.

**Ключевые слова:** пыль, свойства, аппарат, сепарация, утилизация, окружающая среда, охрана труда

There were presented the main scientific and practical results of formation and implementation and engineering tools for capture of dust at mining and concentrating mills. There were defined mechanical, electric, magnetic properties of dust and individual particles of its. There was theoretically substantiated, developed and implemented apparatus of dry cleaning. Results of research were used in the industry with a positive effect, and these results of interest to professional from non-ferrous, coal and other ore mining industry.

**Key words:** dust, properties, apparatus, separation, recovery, environment, job safety.

### ВВЕДЕНИЕ

Процесс получения готовой продукции горнорудными предприятиями связан с выделением большого количества пыли, объема которой резко возрастает с вынужденным переходом к добыче и обогащению бедных кварцитов, содержащих повышенное количество свободного диоксида кремния и имеющих высокую прочность, а также с предпочтением сухих технологий переработки горной массы, что связано с тенденцией снижения использования пресной воды в промышленности. 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 совершенствование пылеулавливания на горно-обогатительных предприятиях на основе разработки и внедрения аппаратов нового поколения, способных улучшить охрану окружающей среды и условия труда рабочих, уменьшить по-

тери полезного продукта, — важная научная, практическая и социальная задача.

### СУЩЕСТВУЮЩИЕ ПЫЛЕУЛАВЛИВАЮЩИЕ СИСТЕМЫ НА МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

На территории Кривбасса (Украина) ежегодно образуется более 400 млн т промышленных отходов, из которых 390 млн т вывозится в отвалы, шламо- и хвостохранилища, где находится более 2,5 млрд м<sup>3</sup> пород и 1 млрд м<sup>3</sup> отходов обогащения руд. За период промышленного освоения железорудных месторождений Кривбасса отчуждено более 34 тыс. га плодородных земель. Максимальные выбросы пыли наблюдаются на металлургическом заводе ОАО «Арселор Митал Кривой Рог» (350 т/ч) и агломерационных фабриках (50–60 кг на 1 т агломерата).

**Гурин А.А.** – докт. техн. наук, проф., зав. кафедрой рудничной аэрологии и охраны труда КНУ (60027, Украина, Днепропетровская обл., г. Кривой Рог, ул. XXII Партсъезда, 11). E-mail: raop35@gmail.com.

**Мулякко В.И.** – докт. техн. наук, профессор кафедры физики КНУ. E-mail: muwali2012@bk.ru.

**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.

При этом потери полезных компонентов составляют ~2 млн т/год, содержание железа в пыли доходит до 60 %. Теряется также много других минералов, в частности графита, который образуется при остывании чугуна. Отсутствие аспирационных систем и механизированного сбора графитовой пыли вызывает загрязнение окружающей среды, рабочих мест и профессиональные заболевания рабочих, а отсутствие надежной технологии извлечения железа из графитовой пыли ведет к выбрасыванию его в отвалы.

Существующие пылеулавливающие средства позволяют снизить выбросы пыли в атмосферу на 70—80 %, однако запыленность воздуха превышает санитарные нормы как на рабочих местах, так и в населенных пунктах. Не защищают воздух от чрезмерного пыления и высокие трубы предприятий. Назрела необходимость разработки методов математического и физического моделирования турбулентного рассеяния этих выбросов для прогнозирования загрязнения атмосферного воздуха в зависимости от метеорологических условий, а также создания точных и надежных аппаратов контроля. Анализ современных методов очистки газов от пыли показал, что для повышения эффективности работы аппаратов необходимо в более полной мере использовать их физические свойства, которые позволяют включить дополнительные механизмы осаждения и коагуляции частичек.

Работа карьеров, шахт, горно-обогатительных комбинатов (ГОК), заводов и других вспомогательных цехов цветной и черной металлургии сопровождается выбросами большого количества пыли, газов, мокрых «хвостов» и высокоминерализованной воды. Количество этих вредных выбросов зависит от содержания их в перерабатываемом сырье, принятого технологического процесса и эффективности работы очистных аппаратов (пыле- и газоуловителей).

**Дробильно-сортировочные фабрики (ДСФ) и шахтные комплексы.** Загрязнителями окружающей среды являются аспирационные выбросы из укрытий пылящего оборудования и перегрузочных узлов: приемных и промежуточных бункеров, пластинчатых и ленточных питателей, дробилок, грохотов и сухих магнитных сепараторов. Объемы этих выбросов определяются степенью обеспечения рабочих мест нормальными санитарно-гигиеническими условиями, а запыленность — процессами, протекающими в узлах и оборудовании. На одну ДСФ в среднем приходится 10 аспирационных систем, которые отсасывают запыленный воздух от 3—10 ук-

рытий. Для очистки воздуха от пыли применяются центробежные (мокрые скрубберы, циклоны-промыватели, батарейные циклоны и пр.) и контактные (рукавные фильтры) пылеуловители: их эффективность не превышает соответственно 90 и 98 % [4].

**Дробильные и обогатительные фабрики горно-обогатительных комбинатов.** Интенсивными источниками загрязнения окружающей среды являются сушильные барабаны руды и концентрата. Количество газов, выбрасываемых из одного барабана, доходит до 90 тыс. м<sup>3</sup>/ч при температуре 70 °С. Общее количество пыли, выносимое из барабана, составляет 1,5 т/ч. Использование двухступенчатой системы очистки (мультициклон — мокрый скруббер) позволяет снизить запыленность до установленных норм. Для очистки от пыли остальных аспирационных выбросов дробильных и обогатительных фабрик ГОК применяются мокрые скрубберы с угловыми коагуляторами и циклоны-промыватели СИОТ, работу которых считают удовлетворительной. На ОАО «СевГОК» (Кривбасс, Украина) достаточно эффективно работает рукавный фильтр, в Югославии — электрофильтр [5].

**Агломерационные фабрики.** Процесс получения агломерата сопровождается интенсивным выделением в атмосферу запыленного газа. Основными источниками загрязнения являются: агломерационные машины, на которых осуществляются спекание и охлаждение агломерата; обжиговые печи; барабанные и чашечные охладители агломерата; узлы по подготовке, транспортировке и пересыпке руды, кокса, известняка и других материалов, входящих в состав шихты. Агломерат спекается на ленте машины, где через него при помощи эксгаустеров просасывается воздух, который уносит с собой образовавшиеся при спекании газ и пыль. Вся машина оборудована укрытием, откуда газы через вакуум-камеры поступают в общий коллектор, уложенный под агломерационной машиной по всей ее длине. В коллекторе осаждаются до 50—70 % крупной пыли.

На фабриках агломерации и окомкования приняты разные по составу и конструкции аппараты и системы для очистки газа. В состав этих систем входят скрубберы Вентури, центробежные скрубберы, инерционные пылеуловители и центробежные циклоны. Недостатком мокрых способов улавливания и удаления уловленной пыли являются пылевые отложения на стенах газоходов, аппаратов очистки и на роторе эксгаустера.

Таблица 1

**Количество пыли, выделяемой основными источниками горно-обогатительных комбинатов Кривбасса**

Название предприятия	Производство	Источники выделений	Общее выделение пыли, т/год	Выбросы пыли в атмосферу, т/год	Официальное пылеулавливание, %
ОАО «СевГОК»	Дробильная и обогатительная фабрики окомкования	Корпуса дробления и обогащения	73132	5509	92,47
	Цех подготовки шихты	Перегрузочные узлы Корпуса окомкования и обжига	134614	40654	69,80
	Фабрика металлизации	Зона сушки Обжиговая печь Корпус окомкования	191083	34782	81,79
			<b>398829</b>	<b>80945</b>	<b>79,70</b>
ОАО «ЦГОК»	Обогатительная фабрика	Корпуса дробления, обогащения и обжига	160000	16740	90,16
	Окомковательная фабрика	Корпус приготовления шихты и обжига	158987	39042	75,44
	Опытно-промышленная фабрика	Корпуса сепарации и обжига	155176	9691	93,75
			<b>474163</b>	<b>65473</b>	<b>86,40</b>
ОАО «НКГОК»	РОФ-1 и РОФ-2	Зона спекания, корпус агломерации	253761	48121	81,04
		Корпус подготовки шихты	58652	8115	86,16
		Корпус дробления Литейный цех	161367	13858	91,41
			<b>473780</b>	<b>70094</b>	<b>83,41</b>
ОАО «ЮГОК»	Аглоцех 1	Агломерационный корпус 1 и зона спекания	57748	13807	72,14
	Аглоцех 2	Агломерационный корпус 1 и зона спекания	87034	24246	76,10
	Дробильно-обогатительный комплекс 1	Корпус дробильной и обогатительной фабрик	81419	7166	88,01
	Дробильно-обогатительный комплекс 2	Корпус дробильной и обогатительной фабрик	115023	12726	88,94
	Аглоцех 3 Ремгормаш	Корпус дробления кокса, электропечи, литейный цех	114883	13569	88,19
	Тракт подачи руды	Корпуса дробления	86557	9755	88,73
			<b>542664</b>	<b>81269</b>	<b>85,02</b>
			<b>1889436</b>	<b>297781</b>	<b>83,8</b>

Основная проблема состоит в безвозвратной потере в шламохранилищах огромного количества уловленной пыли (табл. 1).

### РАЗРАБОТКА И ВНЕДРЕНИЕ ЦИКЛОННЫХ АППАРАТОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

В используемых аппаратах пылеулавливания слабо применяются магнитные свойства пылевых частиц, которые позволяют включить дополнительные механизмы их осаждения и коагуляции. Измерения магнитных свойств пылей ГОК показали, что большинство из них являются сильномагнитными (табл. 2), поэтому для эффективного их улавливания необходимо использовать магнитное поле — это открывает возможность сепарации уловленной пыли на компоненты, которые отличаются физическими свойствами частичек. Для изучения этих свойств разработан способ определения магнитных моментов ферромагнитных частиц [6]. Для разработки аппаратов, в рабочей зоне которых предполагается создать магнитное поле, необходимо знать его характеристики (напряженность и градиент поля). Для магнитов, у которых ширина полюса менялась в пределах от 1 до 16 см, а толщина — от 1,4 до 11,2 см, выполнен расчет характеристик поля в 100 точках, что позволило определить относительный градиент поля для каждой из магнитных систем, шаг полюсов и их необходимое количество, а также разработать два варианта непрерывной регенерации магнитных полюсов:

— двигающееся магнитное поле транспортирует по рабочей поверхности осевшую против полюса магнитную пыль к препятствию (так называемой ловушке), установленному на этой поверхности, где магнитная пыль останавливается, при этом магнитный полюс, который освободился от пыли, готов улавливать ее снова;

— оси вращения осаждающей поверхности и магнитной системы, размещенной внутри этой поверхности, имеют эксцентриситет осей вращения  $x$ , величину которого можно вычислить согласно выражению, полученному из условия равенства силы, удерживающей магнитные частицы на барабане, сил тяжести и инерции, которые отрывают частицы от поверхности барабана [7]:

$$x = 0,5 \left( \frac{\pi}{S} + \frac{1}{R} \right)^{-1} \ln \left[ \mu_0 \chi H_x^2 \left( \frac{\pi}{S} + \frac{1}{R} \right) / (9,8 \rho_{\text{ч}}) \right], \quad (1)$$

где  $S$ ,  $R$  — соответственно шаг полюсов и радиус магнитной системы, м;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  — магнитная по-

Таблица 2  
Магнитные свойства пыли, кА/м

Коэрцитивная сила	Остаточная намагниченность	Максимальная магнитная восприимчивость	Намагниченность насыщения
5,0	2,5	0,565	69,0
27,0	2,8	0,145	16,0
8,3	1,6	0,220	29,4
7,5	1,4	0,187	26,6
4,2	1,0	0,197	27,5
10,0	1,5	0,160	21,6
6,5	1,1	0,154	20,6
5,0	1,0	0,135	17,7
6,5	1,1	0,151	20,2
7,0	2,1	0,288	37,1
4,5	0,7	0,175	22,2
10,8	2,4	0,226	30,4
24,2	4,0	0,220	29,6
15,0	2,0	0,162	23,0
4,2	1,0	0,256	32,5
11,7	2,4	0,225	30,0
7,2	2,0	0,290	33,8
8,3	2,3	0,247	33,8
8,0	2,1	0,325	38,8
13,0	0,6	0,047	6,3
5,8	5,0	0,260	40,0
12,5	4,5	0,450	61,0
4,2	0,8	0,184	25,0
4,2	1,0	0,305	37,5
5,0	1,5	0,350	45,0
3,3	1,3	0,410	53,0
4,2	1,5	0,370	49,0
—	—	0,006	0,7
—	—	0,017	2,3
—	—	0,007	0,8
—	—	0,003	0,3
5,0	1,2	0,202	25,0
5,0	0,8	0,160	20,0
4,2	0,6	0,118	14,6

стоянная, Гн/м;  $H_x$  — напряженность магнитного поля на рабочей поверхности барабана, А/м;  $\chi$ ,  $\rho_{\text{ч}}$  — относительная магнитная восприимчивость и плотность частички, кг/м<sup>3</sup>.

**Повышение степени сухого улавливания пыли аппаратами.** Низкая эффективность работы аспирационных систем предприятий, наблюдаемая на практике, обусловлена не только эксплуатационными причинами (нарушение технологии, абразивный износ, слипание пыли), но и несовершенством применяемых аппаратов. Действительная степень очистки газа от пыли в центробежных аппаратах типа циклон значительно меньше рассчитанной по формуле, полученной согласно теории вероятности и законам турбулентного движения воздуха:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\pi\tau U_0 H}{0,72S_{\text{вх}}}\right), \quad (2)$$

где  $\tau = d_q^2 \rho_q (18\mu_r)^{-1}$  — инерционный параметр частички, с;  $d_q, \rho_q$  — соответственно ее диаметр и плотность;  $\mu_r$  — динамическая вязкость газа, Па·с;  $U_0, S_{\text{вх}}$  — скорость потока во входном патрубке, м/с, и его сечение, м<sup>2</sup>;  $H$  — высота цилиндрической части циклона, м.

Вторичный вынос пыли из циклона, являющийся причиной снижения эффективности его пылеулавливания при увеличении скорости входного потока, объясняется сильной турбулентностью образованных внутри вихрей. Если в рабочей зоне циклона с помощью коаксиальных обечайек создать кольцевые каналы с ламинарным течением воздуха, то выражение для расчета степени улавливания пыли новым циклоном будет следующим:

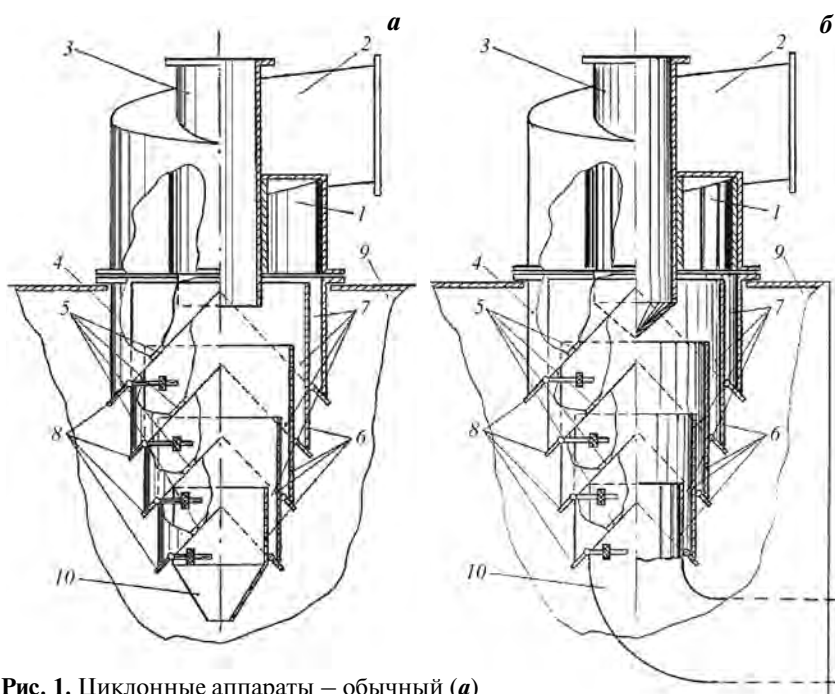
$$\eta = 1 - \exp\left(-79,7\pi\tau U_0 S_{\text{вх}} \sum_{i=1}^n h_i D_i^{-4}\right), \quad (3)$$

где  $h, D$  — высота и диаметр обечайек, м;  $n$  — их количество.

Расчет по формуле (3) показал, что обычный циклон, который улавливает определенную пыль с вероятностью, например, 80 %, после реконструкции будет иметь эффективность 98 %. Авторами предлагаются две конструкции циклонного аппарата [8, 9]: прямоточный и с верхним расположением выхлопного патрубка (рис. 1). В них исключается любая возможность вторичного выноса пыли, поскольку частички, достигающие осаждающих поверхностей циклона, сразу выводятся из вихря, который очищается, в лами-

нарный поток. Уменьшение времени пребывания частичек в нисходящем вихре сокращает их контакт со стенками циклона до минимума, что значительно снижает его абразивный износ. Отличие предложенных циклонов заключается в том, что пыль, которая получила вместе с потоком во входном патрубке 2 тангенциального входа 1 вращательно-поступательное движение, попадает в кольцевые щели 7. Размер щели (ее ширина) выбирается таким, чтобы поток в ней был ламинарным. Пыль, которая туда попала, коагулирует и оседает на днища 5, нагружая выпускные мигалки 8. В один из моментов ее масса становится достаточной для срабатывания мигалки и пыль разгружается в бункер 9. Такой процесс поэтапного удаления пыли из потока, который очищается, исключает вынос его в исходный патрубок 3 и абразивное разрушение корпуса аппарата.

Результаты расчета критических (при которых зависимость (3) имеет точку перегиба) диаметров ( $d_{об}$  и  $d_{пр}$ ) частиц пыли, улавливаемой с вероятностью 62 % соответственно в обычном и предлагаемом циклонах диаметром  $D$ , представлены в табл. 3. Эффективность работы предлагаемого циклона почти в 2 раза выше, чем обычного тех же размеров. Она может быть увеличена еще на 30—40 % путем удержания и коагуляции пыли на его осаждающих по-



**Рис. 1.** Циклонные аппараты — обычный (а) и прямоточный (б)

1 — футерованная входная улитка; 2, 3 — входной и выхлопной патрубки; 4 — корпус; 5 — наклонные днища; 6 — коаксиальные обечайки; 7 — кольцевые щели для отвода пыли; 8 — мигалки; 9 — приемный бункер; 10 — конус

Таблица 3

**Критические диаметры частиц в обычном и предлагаемом циклонах**

$D$ , м	$d_{об}$ , МКМ	$d_{пр}$ , МКМ
0,2	3,5	1,6
0,3	4,3	1,9
0,4	5,0	2,2
0,5	5,5	2,5
0,8	7,0	3,2
1,0	7,8	3,5
1,5	9,5	4,3
2,0	11,0	5,0

верхностях с помощью магнитного поля [6, 10]. Это утверждение вытекает из выражения, полученного тем же путем, что и (3), но с учетом магнитной силы  $\langle F_M \rangle$ , которая действует на частицы пыли в неоднородном магнитном поле [11]:

$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\pi\tau U_0 H}{0,72S_{вх}} - \frac{C\langle F_M \rangle}{\mu_r d_q U_0}\right), \quad (4)$$

где  $C = (\partial H/\partial x)H^{-1}$  — постоянная величина, зависящая от формы циклона.

Из формулы (4) видно, что степень магнитного улавливания пыли практически не зависит от размеров циклона и возрастает с уменьшением диаметра частицы и скорости пылегазового потока, что подтверждается лабораторными и промышленными испытаниями. Кроме того, уловленный магнитный компонент может содержать до 66 % железа при высоких показателях извлечения (попутно можно извлечь сродки с содержанием железа до 50 %). Его реализация как железного концентрата может окупить процесс очистки газов от пыли и на 20–40 % сократить объемы шламов, которые складываются [12].

Инерционные пылеуловители (рис. 2), в отличие от циклонов, могут иметь небольшой диаметр и любую длину, чтобы сконцентрировать и вывести в бункер практически всю пыль. Эффективность такого пылеуловителя в основном определяется используемым в бункере аппарата механизмом осаждения. Особенность разработанного инерционно-

го электростатического пылеуловителя [13] состоит в том, что в нем созданы условия для полной зарядки всех пылевых частичек (см. рис. 2). Это обеспечит максимальное осаждение их в бункере аппарата под действием гравитационных, инерционных и электростатических сил зеркального отображения.

Пылеуловитель работает следующим образом. По инерции все частички сталкиваются с футеровкой корпуса, приобретая при этом электрический заряд  $q$ , величина которого зависит от времени контакта частицы с поверхностью, а потом попадают в бункер с вероятностью, равной

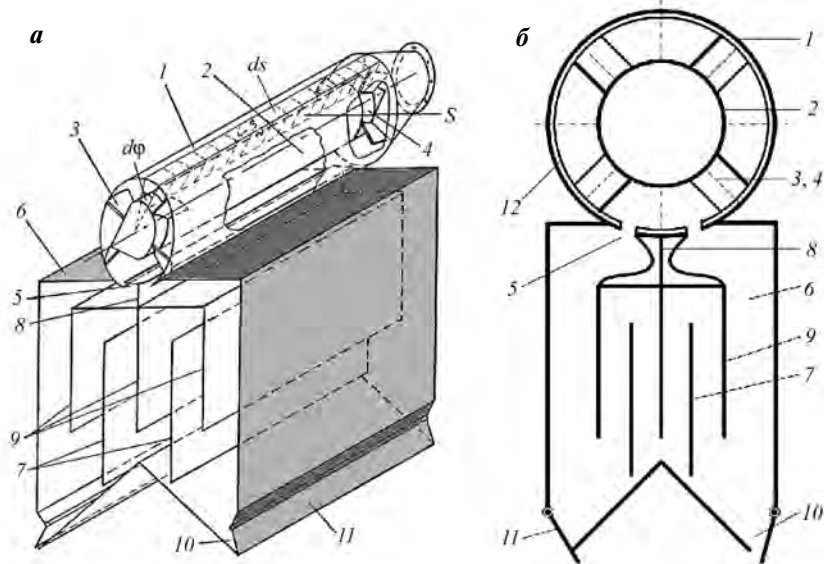
$$\eta = 1 - \exp\left(-\frac{\tau U_0 L}{0,72(D^2 - d^2)}\right), \quad (5)$$

где  $L, D$  — длина и диаметр инерционного отделителя пыли, м;  $d$  — диаметр обтекателя, м.

Из уравнения движения частички пыли в электрическом поле получено выражение, которое связывает время ее пребывания в бункере ( $t$ ) с эффективностью ее электростатического осаждения ( $\eta_э$ ) на заземленных поверхностях:

$$t = \frac{2\pi d_q}{q_t} \sqrt{\frac{1}{6}\epsilon_0 h \eta_э d_q} \left( \sqrt{h \eta_э - d_q} + h \eta_э \arcsin \sqrt{1 - \frac{d_q}{h \eta_э}} \right), \quad (6)$$

где  $h$  — длина пути, который частичка проходит в бункере, м.



**Рис. 2.** Инерционный электростатический пылеуловитель

*a* — общий вид; *б* — схема

1 — газоход-пылеотделитель, футерованный изнутри износостойчивым полупроводниковым материалом (например, полимером П29С-1); 2 — обтекатель; 3, 4 — пропеллеры; 5 — вырез, который соединяет внутреннюю часть 1 и бункер 6; 7 — успокаивающая решетка со вставкой 8; 9 — отбойные пластины; 10 — накопитель; 11 — мигалки; 12 — футеровка заряжающих поверхностей

Расчеты по этой формуле были выполнены для аппарата диаметром 0,25 м, высотой бункера 0,2 м и шириной 0,6 м при скорости потока 10 м/с для частичек плотностью 2,6 г/см<sup>3</sup> и диаметром 5 мкм, имеющих заряд  $q_i = ne$  (где  $n = (0,6 \div 2,5) \cdot 10^5$ ). Частички с зарядом  $> 2,5 \cdot 10^5 e$  улавливаются за определенное время на 100 %, а имеющие в 4 раза меньший заряд — на 40 %. Эти данные показывают важность зарядки частичек. Результаты всесторонних испытаний этого аппарата подтвердили правильность теоретических выводов и определили пути расчетов его размеров и выбора материала для футеровки.

Из всех простейших аппаратов наиболее стабильными в работе и в то же время самыми дешевыми в изготовлении и эксплуатации являются гравитационные камеры. К их недостаткам относится низкая степень улавливания мелкодисперсной пыли. Для увеличения степени пылеулавливания необходимо удлинять камеру или уменьшать высоту падения частичек и скорость очищаемого потока, однако возможен и другой путь — коагуляция частичек. Одним из способов ускорения процесса коагуляции является размещение на пути частиц разных пронцаемых препятствий, которые, к тому же, могут электризоваться. В качестве таких препятствий авторами предлагаются шторы из свободно подвешенных волокон. Получая электрический заряд, штора замедляет движение одноименно с ней заряженных частичек и ускоряет — разноименно заряженных, что обеспечивает условия для градиентной коагуляции пыли. Лабораторные испытания камеры показали, что она эффективно улавливает промышленную пыль при 5—6 шторах и скорости фильтрации 30—35 см/с. Насыщение заряда на первой шторе наступает через 1 ч работы, а его поверхностная плотность составляет 4,8 мкКл/м<sup>2</sup>. Используя результаты решения дифференциального уравнения Навье—Стокса, описывающие движение частичек в потенциальном потоке, который обтекает одиночный цилиндр, выведена формула для расчета вероятности инерционного осаждения их на этой поверхности, предельное значение которой отвечает механизмам зацепления и прикосновения [12]:

$$\eta_{и} = 1 - \exp\left(-\frac{0,1\tau U_{\infty}}{R + 0,5d_{ч}}\right), \quad (7)$$

где  $U_{\infty}$  — скорость потока, удаленного от волоконной шторы, м/с;  $R$  — радиус волокна, м.

Для расчета степени улавливания монодисперсной пыли волоконной шторой толщиной  $H$ , которая

составляется из равномерно распределенных в пространстве цилиндрических поверхностей, авторами получено выражение [14]

$$\eta_{ш} = 1 - \exp\left\{-H \frac{R + d_{ч}}{2\sqrt{3}(R + l)^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{0,1\tau U_{\infty}}{R + 0,5d_{ч}}\right)\right]\right\}, \quad (8)$$

где  $2l$  — расстояние между поверхностями волокон, м.

Расчет по формуле (8) согласуется с результатами экспериментов.

Изучено влияние электрических зарядов частичек и шторы на эффективность работы фильтра [15]. Получено выражение для определения величины заряда частички, одноименного с зарядом шторы, при котором она останавливается перед шторой:

$$q = \pi^2 \epsilon_0 \mu_{г} d_{ч} U_{\infty} (R + l) (R\sigma)^{-1}, \quad (9)$$

где  $\sigma$  — поверхностная плотность заряда на шторе, Кл/м<sup>2</sup>;  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная, Ф/м.

Численное решение дифференциального уравнения движения частички близ заряженного волокна с учетом инерционного и электростатического механизмов осаждения, в случае их разноименных зарядов, показало, что эффективность электростатического осаждения на 20—30 % больше, чем инерционного.

Эффективность процесса диффузного осаждения мелких частичек на волокно из обтекающего его приграничного пласта потока вычисляется следующим образом [16]:

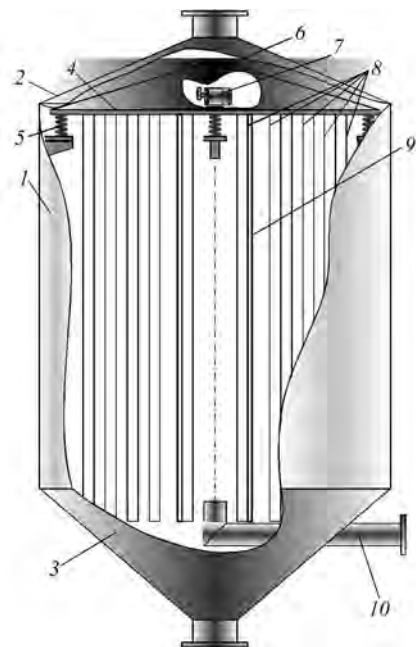
$$\eta_{д} = 2\sqrt[3]{3D^2 R^2 l^{-4} U_{\infty}^{-2}}, \quad (10)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии, м<sup>2</sup>/с.

Эффективность  $\eta_{д}$  будет возрастать с уменьшением расстояния между волокнами, снижением скорости фильтрации и увеличением радиуса волокна. По теории вероятности авторами выведено уравнение для расчета степени диффузного осаждения частичек на волоконной шторе:

$$\eta_{дш} = 1 - \exp\left[-2 \frac{H}{R + l} (3D^2 R^2 l^{-4} U_{\infty}^{-2})^{1/3}\right]. \quad (11)$$

Авторами разработана конструкция вертикальной цилиндрической камеры с волоконными шторами [9] (рис. 3). Ее цилиндрический корпус  $I$  снабжен с двух сторон конусным диффузором  $2$  для выхода очищенного воздуха и бункером  $3$  для сбора и выпуска уловленной пыли. Внутри, в верхней части, размещена платформа  $4$  в форме диска, диаметр которой меньше внутреннего диаметра корпуса  $I$ .



**Рис. 3.** Вертикальная пылеосадительная камера

1 – корпус; 2 – диффузор; 3 – бункер; 4 – платформа; 5 – пружины; 6 – обтекатель; 7 – вибратор; 8 – волоконные шторы; 9 – сеть-стабилизатор; 10 – входной патрубок

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

На первой стадии очистки газа от пыли пылегазовый поток, поступающий из патрубка 10 в центральную часть корпуса 1 аппарата, ограниченную первой шторой 8 и стабилизирующей сеткой 9, расширяется радиально, что предопределяет уменьшение скорости его фильтрации через следующие шторы. Снижение скорости дает возможность выявлять сначала инерционный механизм осаждения, а потом диффузионный. Эффективность пылеулавливания такой камеры позволяет рекомендовать ее как фильтр тонкого очищения газа от пыли.

Во второй стадии очистки применяются электрофилтры, которые имеют и положительные качества, и недостатки: ненадежное улавливание как проводящей пыли (перезарядка и вторичный вынос частиц), так и непроводящей (образование обратной короны), а также разрушение конструкций ударными механизмами регенерации электродов.

Анализ работы электрофилтра показал, что в нем не используются инерционный и магнитный (для магнитной пыли) механизмы осаждения пыли. Получена формула с учетом этих механизмов для расчета степени пылеулавливания:

$$\eta = 1 - \exp \left[ - \frac{8\omega L}{VD} - \frac{6 \cdot 10^4 \rho_r d_q L V}{D} - \frac{1,63 \cdot 10^{10} \chi d_q^2}{V} \right], \quad (12)$$

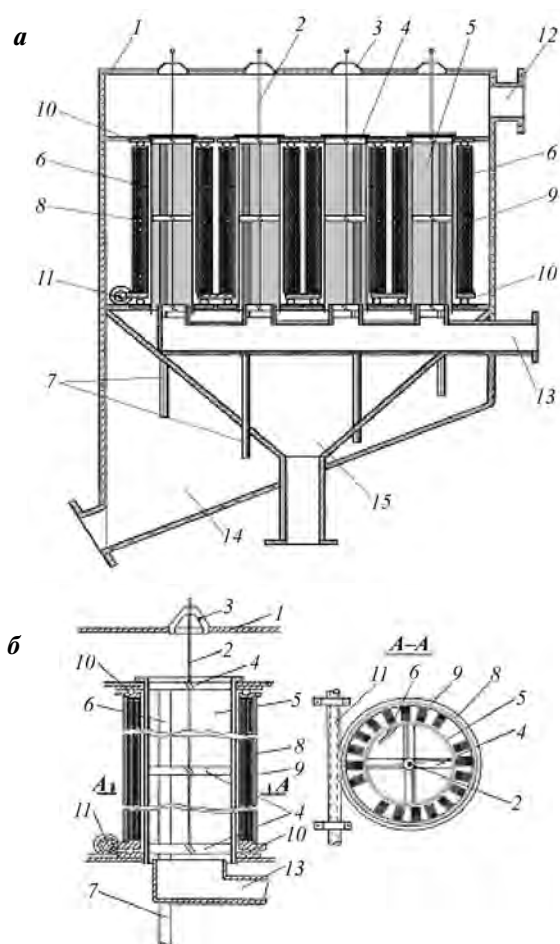
где  $V$ ,  $\omega$  – скорости соответственно воздуха и дрейфа частицы, м/с;  $L$ ,  $D$  – длина и диаметр осаждающего электрода, м;  $\chi$  – магнитная восприимчивость пыли;  $\rho_r$  – плотность газа.

Присутствие трех слагаемых в показателе экспоненты свидетельствует о высокой эффективности разработанного аппарата.

Авторами предлагается новый трубчатый электрофилтр [17] (рис. 4), который позволяет повышать скорость фильтрации в несколько раз (при этом будет отсутствовать вибрация коронующего электрода). Электрофилтр оборудован нетрадиционной системой регенерации осаждающего электрода [18], эффективно улавливает сильномагнитную проводящую пыль и способен сепарировать ее на два компонента: магнитный и немагнитный. Пылегазовый поток, поступающий из патрубка 12, разделяется на несколько потоков. Тот, что приходится на один трубчатый элемент, закручивается завихрителями 4, что стабилизирует коронующий электрод 2, закрепленный в корпусе 1 проходным изолятором 3. Под действием центробежных, кулоновских и магнитных сил частицы осаживаются на внутреннюю поверхность электрода 5. Вращательное движение магнитной системы в корпусе 8, благодаря опорным подшипникам 10 и редуктору 11, заставляет двигаться магнитные частицы, осевшие напротив полюсов магнитов 9, и они соскребают с поверхности электрода 5 пылевые агрегаты, которые обрушаются в бункер 15. Магнитные же частицы транспортируются к ловушкам 6 и тоже удаляются из электрофилтра в бункер 14 через патрубки 7. Очищенный воздух выходит из филтра благодаря коллектору 13.

Пылеосадительная камера с волоконными шторами, на изготовление которой разработана рабочая документация, установлена в цехах комбината «Дирит» (г. Клесов, Ровенская обл., Украина), где она показала высокую степень очистки воздуха от пыли (в среднем 95 % при объемах аспирации 7,6 м<sup>3</sup>/с и скорости воздушного потока в камере 0,35 м/с). Камера заложена в проект реконструкции аспирационных систем ряда предприятий.





**Рис. 4.** Электрофильтр с инерционным и магнитным улавливаниями пыли  
*а* – общий вид, *б* – конструкция магнитной системы  
 1, 8 – корпуса; 2, 5 – электроды; 3 – изолятор; 4 – завихритель; 6 – магнитная ловушка; 7, 12 – патрубки; 9 – магниты; 10 – опорные подшипники; 11 – редуктор; 13 – коллектор; 14, 15 – бункеры магнитного и немагнитного продуктов

Прямоточный циклон применяется для очистки аспирационного воздуха обрубочного цеха Криворожского центрального рудоремонтного завода (КЦРЗ).

Способ определения магнитных моментов отдельных частичек, методика расчетов магнитного циклона и рабочая документация на его изготовление использованы при реконструкции вентиляции фабрики окомкования ОАО «СевГОК». Ожидается, что годовой экономический эффект (из уловленной пыли будет извлекаться полезный продукт с содержанием железа до 65 %) составит 7,65 тыс. гривен с 1 м<sup>2</sup> полезной площади обжиговой машины.

Магнитные циклоны использовались также во время очистки аспирационных выбросов цеха обжиги гематитовой руды в ОАО «Центральный ГОК»

и сталеплавильного цеха на КЦРЗ, а также в виде основного оборудования технологии сухого магнитного обогащения кварцитовых руд шахты «Гигант» (Кривбасс, Украина).

Таким образом, разработка и внедрение аппаратов нового поколения на базе теоретических основ сухого улавливания пыли позволяют снизить запыленность воздуха на рабочих местах и в выбросах в атмосферу, а также повысить экономическую эффективность процессов переработки горной массы [19–21].

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что степень улавливания пыли циклонным аппаратом нового поколения, экспоненциально зависящая от скорости очищаемого потока, числа и размеров коаксиальных обечаек, а также диаметра частичек пыли, по сравнению с ранее используемым циклоном того же размера и производительности, будет больше в 1,23 раза.

2. Доказана эффективность магнитного улавливания пыли, которая экспоненциально возрастает с увеличением размера циклона и магнитной силы, действующей на частички пыли, и снижается с ростом его производительности и укрупнением этих частичек. Суммарная инерционно-магнитная эффективность от размеров циклона почти не зависит и в среднем составляет 92 %.

3. Показано, что время движения частички пыли к заземленной поверхности обратно пропорционально заряду, который она получает при соприкосновении с футерованными конструкциями аппарата, поэтому для увеличения степени улавливания пыли их материал должен обладать максимально большим заряжающим свойством (для пыли аглофабрик это может быть полупроводниковый полимер типа П29С-1).

4. На основании теоретических и экспериментальных исследований разработаны аппараты, применение которых на промышленных предприятиях позволит снизить запыленность воздуха до безопасного уровня и уменьшить затраты на пылеулавливание за счет утилизации уловленной и разделенной по физическим свойствам пыли. Степень улавливания мелких частичек в них увеличена на 60 %. Подвижное магнитное поле позволяет улавливать магнитную пыль с эффективностью до 95 %, причем с ее одновременной сепарацией на магнитную составляющую (с содержанием железа до 65 %) и не-

магнитную (до 12 % Fe) при исходном содержании общего железа до 33 %.

*Работа выполнена по материалам доклада с участием авторов на XII международной конференции «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр» [22].*

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Гурин А.А., Бересневич П.В., Немченко А.А. и др.* Аэрология горных предприятий. Кр. Рог: Изд. центр КТУ, 2007.
2. *Бересневич П.В., Вилкул Ю.Г., Голишев О.М. и др.* Экология горного производства. Кр. Рог: Минерал, 1998.
3. *Янов А.П., Желтуха Г.А., Мулявко В.И., Колесник А.П.* // Снижение уровня вредных факторов на горнорудных предприятиях. М.: Недр, 1985. С. 37.
4. *Андоньев С.М., Филиппев О.В.* Пылевые выбросы предприятий черной металлургии. М.: Металлургия, 1973.
5. *Шеваленко И.С., Мирзабекян Г.З.* Защита окружающей среды от выбросов предприятий черной металлургии. М.: Черметинформация, 1981.
6. А.с. 1782939 (СССР). Способ определения магнитных моментов ферромагнитных частиц / Г.А. Желтуха, В.И. Мулявко, В.С. Харламов. 1990.
7. *Мулявко В.И., Олейник Т.А., Кушнирук Н.В., Кулаков Е.В.* Применение магнитного циклона при обогащении отходов горно-обогатительного и металлургического комплексов. Днепропетровск: Нац. горн. ун-т, 2004. № 20, вып. 61. С. 71.
8. Пат. 2060829 (РФ). Магнитный сепаратор для разделения сыпучих материалов / В.Ф. Бызов, Г.В. Губин, В.И. Мулявко и др. 1996.
9. Пат. 16963 А (Укр.). Вертикальная пылеосаждающая камера / А.М. Кириченко, В.И. Мулявко. 1999.
10. Пат. 28626 А (Укр.). Газоочиститель типа циклон / В.Ф. Бызов, А.О. Гурин, Ю.Г. Вилкул и др. 1999.
11. Пат. 47025 А (Укр.). Газоочиститель типа циклон / Ю.Г. Вилкул, В.И. Мулявко, А.М. Кириченко и др. 2002.
12. Пат. 48631 А (Укр.). Центробежный магнитный сепаратор / В.Ф. Бызов, В.И. Мулявко, А.М. Кириченко, Л.П. Думанская. 2002.
13. А.с. 1562026 (СССР). Инерционный электростатический пылеуловитель / А.М. Кириченко, Г.А. Жовтуха, В.И. Мулявко. 1990.
14. *Бызов В.Ф., Мулявко В.И., Жовтуха Г.А.* Расчет эффективности циклона, в котором, помимо сил инерции, действуют другие силы. Кр. Рог: КГРИ, 1989. Деп. в УкрНИИТИ № 1294-Ук 89.
15. *Мулявко В.И., Вилкул Ю.Г., Панова С.Н., Кириченко А.М.* // Разработка рудных месторождений. Кр. Рог: Изд-во КТУ, 1997. № 60. С. 116.
16. *Мулявко В.И., Вилкул Ю.Г., Панова С.Н., Кириченко А.М.* // Разработка рудных месторождений. Кр. Рог: Изд-во КТУ, 1996. № 58. С. 103.
17. *Мулявко В.И., Панова С.Н., Кириченко А.М.* // Охорона праці та навколишнього середовища на підприємствах гірничо-металургійного комплексу. Вип. 1. Кр. Ріг: НД ІБП, 1999. С. 97.
18. А.с. 1835305 (СССР). Электрофильтр / В.Ф. Бызов, В.И. Мулявко, В.С. Харламов. 1993.
19. *Гурин А.О., Мулявко В.И., Ляшенко В.И.* // Экология и пром-сть. 2013. № 2. С. 50.
20. *Гурин А.А., Мулявко В.И., Ляшенко В.И.* // Безопасность труда в пром-сти. 2013. № 9. С. 54.
21. *Мулявко В.И., Олейник Т.А., Ляшенко В.И. и др.* // Обогащение руд. 2014. № 2. С. 43.
22. *Гурин А.А., Мулявко В.И., Ляшенко В.И.* // Тез. докл. XII междунар. конф. «Ресурсовоспроизводящие, малоотходные и природоохранные технологии освоения недр» (Занджан, Иран, 16–22 сент. 2013 г.). М.: РУДН, 2013. Т. 1. С. 210.