

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ОСАДИТЕЛЬНЫХ КАМЕР ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ ПЫЛИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

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

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

Ляшенко В.И.², к.т.н., старший научный сотрудник (vi_lyashenko@mail.ru)

Кириченко А.М.¹, к.т.н., доцент кафедры экологии (legus_1984@mail.ru)

Олейник М.О.¹, аспирант кафедры обогащения полезных ископаемых (lpumrmax@gmail.com)

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

² ГП «УкрНИПИПромтехнологии»
(52204, Украина, Днепропетровская обл., Желтые Воды, ул. Петровского, 37)

Аннотация. Приведены основные научные и практические результаты повышения эффективности работы камер для улавливания пыли металлургического производства на основе разработки и внедрения аппаратов нового поколения, способных улучшить охрану окружающей среды и условия труда рабочих, уменьшить потери полезного продукта. Описан анализ и дана оценка технологий и технических средств повышения эффективности работы пылеосадительных камер. Дано теоретическое обоснование механизма осаждения пыли в осадительных камерах, получены результаты лабораторных исследований их эффективности с волоконными шторами и инерционного осаждения аэрозоля на волоконную штору. Предложен новый механизм осаждения пыли в осадительных камерах, а также влияние электрического заряда частицы и волокна на эффективность осаждения пыли в камере. Получены выражения для степени инерционного и диффузионного осаждения частиц пыли на тонком цилиндрическом волокне и правильной системе вертикальных волокон (волокна в шторке расположены на одинаковых расстояниях).

Ключевые слова: эффективность, осадительные камеры, пыль, утилизация, металлургическое производство.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-7-456-464

Процесс получения готовой продукции горнорудными предприятиями связан с выделением большого количества пыли, объема которой резко возрастут 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 [1]. Мокрое извлечение уловленной пыли и выбросы ее в атмосферу приводят к потерям (5 – 10 % от исходного материала) полезного продукта на обогатительных фабриках [2 – 4]. Поэтому повышение эффективности работы осадительных камер для улавливания 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.

Задачами исследования являются:

- анализ технических и эксплуатационных характеристик существующих пылеуловителей и средств для снижения выбросов пыли в атмосферу и современные методы пылеочистки;

- создание теоретических основ инерционного пылеулавливания и определение параметров дополнительных осадительных поверхностей, обеспечивающих выход пылевых частиц из турбулентного потока в ламинарный для исключения вторичного выноса пыли из аппарата.

Для решения поставленных задач авторы 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.

Анализ и оценка технологий и технических средств повышения эффективности работы пылеосадительных камер

Авторами установлено, что пыль выносятся в воздух рабочих помещений, а не осевшая в аппаратах пылеосаждения выбрасывается в атмосферу и загрязняет ее. Часть пыли остается в готовом продукте, что

ухудшает его качество и требует дополнительных процессов удаления пылеобразного материала, промывку, дешламацию и т. д. Кроме того, пыль является ценным продуктом, поскольку по своему составу повторяет перерабатываемый продукт (для руды содержание железа в пыли может быть и выше из-за разной крепости ее и пустой породы). Высокая запыленность воздуха в цехах по переработке горной массы не только ухудшает условия труда рабочих, но и в ряде случаев может привести к тяжелым профессиональным легочным заболеваниям, в том числе к силикозу. Из простейших пылеулавливающих аппаратов наибольшей стабильностью в работе обладают гравитационные пылеосадительные камеры. Они могут быть сооружены из общедоступных, не дорогих материалов (металл, дерево, кирпич и т.д.) и экономичны в эксплуатации. Изменение аэродинамических параметров аспирационных систем в процессе их эксплуатации не снижает коэффициент очистки в камерах, как это имеет место в циклонах, а наоборот, повышает его, что объясняется уменьшением скорости воздуха в камере. Ввиду небольших скоростей движения пылевоздушных потоков в камерах, абразивность пыли не влияет на срок их службы (циклоны же истираются уже за 5 – 6 месяцев), а низкое аэродинамическое сопротивление позволяет использовать низконапорные, более экономичные вентиляторы. Имея все перечисленные выше преимущества в сравнении с циклонами, пылевые камеры обладают и существенными недостатками: требуют для размещения больших, чем циклоны, площадей и имеют значительно ниже эффективность очистки, особенно для мелкой пыли [5 – 7].

Механизм осаждения пыли в пылеосадительных камерах

Если запыленный газ, движущийся с определенной скоростью по газоходу, ввести в камеру, имеющую большую, чем газоход площадь поперечного сечения (рис. 1), то в камере скорость газа резко уменьшится, например до величины $U = vbhS_x^{-1}$ (здесь U , v – скорость потока в камере и входном патрубке, м/с; b и h – ширина и высота камеры, м; S_x – площадь поперечного сечения камеры, м² в сечении x).

В этих условиях содержащаяся в газе пыль начинает выпадать под действием силы тяжести. Пусть частицы представляют собой сферы, концентрация которых n в некотором сечении камеры остается постоянной. Тогда поток частиц через некоторую площадку $b dx$ (см. рис. 1) в дне камеры будет равен

$$dI = nb dx v_y dt, \quad (1)$$

где v_y – проекция скорости частицы, обусловленная силой тяжести и силой сопротивления среды движению частицы, м/с, которая определяется уравнением динамики движения частицы

$$\begin{cases} \frac{dv_x}{dt} = \frac{3}{4} \psi \frac{(U - v_x) \rho_r}{d_q \rho_q}, \\ \frac{dv_y}{dt} = \frac{3}{4} \psi \frac{v_y \rho_r}{d_q \rho_q} - g. \end{cases} \quad (2)$$

Используя формулу Стокса

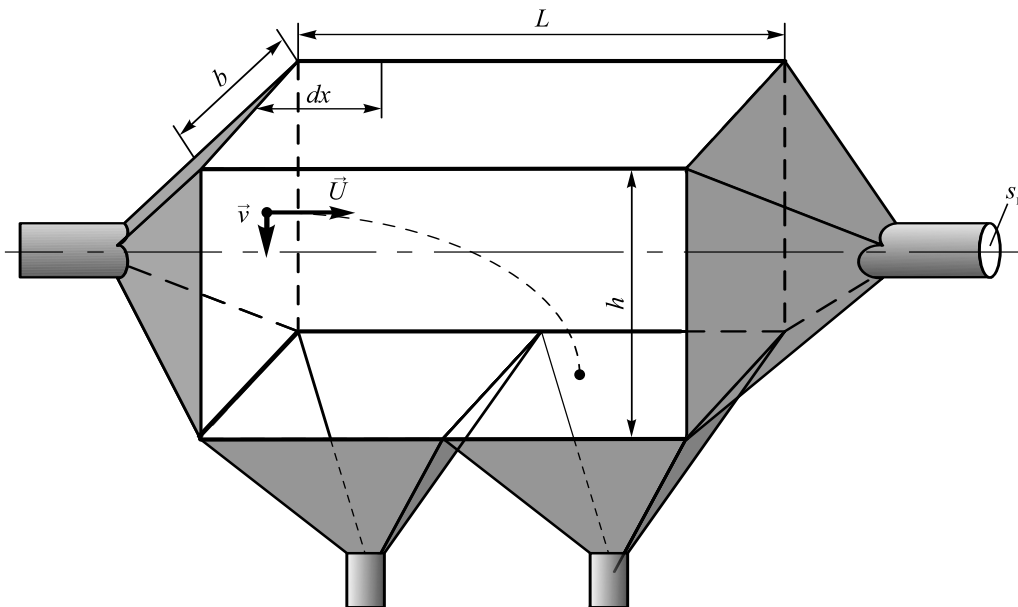


Рис. 1. Схема пылеосадительной камеры:
 L – длина камеры; S_r – площадь сечения газохода (далее обозначения в тексте)

Fig. 1. Scheme of dust collection chamber:
 L – length of the chamber; S_r – sectional area of the duct (notation in text)

$$F_C = 3\pi\mu_r d_q v_q, \quad (3)$$

разделяя переменные в дифференциальном уравнении (2) и интегрируя его, получим для скорости частиц у дна камеры выражение

$$v_x = \tau g \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right], \quad (4)$$

где μ_r – динамическая вязкость среды, Па·с; ψ – коэффициент лобового сопротивления частицы; ρ_q – плотность частицы, кг/м³; τ – инерционный параметр частицы, равный

$$\tau = d_q^2 \rho_q (18\mu_r)^{-1}. \quad (5)$$

Поток частиц через поперечное сечение камеры hb в этом месте

$$I = nhbUdt, \quad (6)$$

тогда эффективность осаждения частиц на участке dx камеры

$$\eta_l = \frac{dI}{I} = \frac{v_x dx}{hU}, \quad (7)$$

а их проскок

$$\xi = 1 - \eta_l = 1 - \frac{v_x dx}{hU}. \quad (8)$$

Преобразовав выражение (8) до вида второго замечательного предела, получим

$$\xi = \exp\left(-\frac{v_x dx}{hU}\right). \quad (9)$$

Суммарный проскок частиц через всю камеру рассчитаем интегрированием с учетом времени полета частицы через всю камеру $t = x/U$

$$\xi = \exp\left[-\frac{\tau g}{hU} \left(L + \tau U \exp\left(-\frac{L}{\tau U}\right) - \tau U \right) \right]. \quad (10)$$

Для частиц диаметром в пределах от 1 до 100 мкм величина $\exp\left(-\frac{L}{\tau U}\right)$ стремится к единице, поэтому эффективность улавливания в этом интервале может определиться выражением

$$\eta = 1 - \xi = 1 - \exp\left(-\frac{\tau g L}{hU}\right). \quad (11)$$

Эффективность камеры зависит от ряда параметров: физико-механических свойств пыли (диаметра частиц, их плотности, формы и т.д.), размеров камеры и скорости очищаемого потока. Изменяя эти параметры,

можно добиться увеличения степени очистки воздуха от пыли в камере. Так, например, при установке внутри камеры горизонтальных или наклонных полок увеличивается отношение длины камеры к высоте падения частиц. В этом случае возникают проблемы с регенерацией этих полок. Подсчитаем по формуле (11) эффективность улавливания пыли различных размеров и плотности (2544 кг/м³ и 7134 кг/м³) пылеосадительной камерой, которая состоит из одинаковых модулей шириной 4,84 м, высотой 4,68 м и длиной 3,0 м. Максимальная длина камеры из четырех модулей составляет 12 м, т. е. четыре последовательно подсоединенных модуля. Кроме того, внутри камеры размещены восемь горизонтальных полок, благодаря чему высота осаждения частиц пыли уменьшается до 0,5 м (табл. 1).

Здесь относительно легкая пыль плотностью 2544 кг/м³ плохо улавливается в камере, даже если ее длина равна 12 м. Наличие полок увеличивает степень улавливания частиц диаметром, например, 8 мкм в 10 раз. Это относится к более тяжелой пыли плотностью 7134 кг/м³. Авторами доказана эффективность пылеулавливания камерой частиц размером 3 – 5 мкм до уровня циклонов. Другим способом увеличения эффективности пылеулавливания камерой является укрупнение частиц пыли путем их коагуляции. Скорость осаждения (витания) частиц пропорциональна квадрату их диаметра:

$$v_y = g d_q^2 \rho_q (18\mu_r)^{-1} = g\tau. \quad (12)$$

Одним из способов ускорения процесса коагуляции пылевых частиц является размещение на пути их движения различных проницаемых преград, которые способны сильно электризоваться и создавать в рабочей зоне аппарата электростатическое поле. Это могут быть шторы из вертикально свисающих, не закрепленных внизу капроновых волокон, для которых характерна высокая механическая прочность. Такая штора, приобретая электрический заряд, замедляет движение одноименно с нею заряженных частиц и ускоряет движение разноименно заряженных, что обеспечивает хорошие условия для градиентной коагуляции. Кроме того, электрическое поле увеличивает эффективность инерционного осаждения частиц, имеющих противоположный по знаку заряд, и ускоряет контактную коагуляцию их на волокне. Образовавшиеся агрегаты частиц попадают в бункер аппарата с большей вероятностью. Регенерацию шторы можно осуществить периодическим встряхиванием [8 – 9].

Не исключена возможность и отскока частицы от волокна, но и в этом случае вероятность осаждения ее в бункер увеличивается, так как, потеряв скорость или изменив ее в противоположном потоку направлении, ей потребуется определенное время для восстановления прежней скорости. За это время она успеет опуститься ниже на некоторое расстояние. Авторами выбраны эти два способа повышения эффективности работы пыле-

Эффективность пылеулавливания гравитационной камерой

Table 1. Efficiency of dust collection by gravity chamber

Диаметр частиц, мкм	Эффективность без полок/ с полками, %											
	Один модуль			Два модуля			Три модуля			Четыре модуля		
	0,25	0,35	0,45	0,25	0,35	0,45	0,25	0,35	0,45	0,25	0,35	0,45
плотность 2544 кг/м ³												
1	0,02	0,01	0,01	0,04	0,03	0,02	0,06	0,04	0,03	0,08	0,06	0,04
	0,19	0,13	0,10	0,38	0,27	0,21	0,56	0,40	0,31	0,75	0,54	0,42
2	0,19	0,06	0,04	0,16	0,11	0,09	0,24	0,17	0,13	0,32	0,23	0,18
	0,75	0,54	0,42	1,50	1,07	0,83	2,24	1,60	1,25	2,97	2,13	1,66
4	0,20	0,23	0,18	0,64	0,46	0,36	0,96	0,69	0,53	1,28	0,92	0,71
	2,57	2,13	1,66	5,85	4,22	3,29	8,65	6,25	4,90	11,36	8,25	6,48
8	1,28	0,92	0,71	2,54	1,82	1,42	3,79	2,72	2,12	5,02	3,61	2,82
	11,36	8,25	6,48	21,43	15,83	12,54	30,36	22,77	18,21	38,27	29,15	23,51
16	5,02	3,61	2,82	9,79	7,10	5,57	14,33	10,46	8,23	18,63	13,69	10,82
	38,27	29,15	23,51	61,90	49,80	41,49	76,48	64,43	55,25	85,48	74,80	65,77
32	18,63	13,69	10,82	33,79	25,51	20,47	45,12	35,71	29,08	56,16	44,51	36,75
	85,48	74,80	65,77	97,89	93,65	88,28	99,69	98,40	95,99	99,96	99,50	98,63
64	56,16	44,51	36,75	80,78	69,21	60,00	91,57	82,92	74,70	96,31	90,52	84,60
	99,96	99,60	98,63	100,00	100,00	99,98	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
плотность 7134 кг/м ³												
1	0,07	0,04	0,03	0,11	0,08	0,06	0,17	0,12	0,09	0,23	0,16	0,13
	0,53	0,38	0,29	1,05	0,75	0,59	1,57	1,26	0,88	2,09	1,50	1,17
2	0,23	0,16	0,13	0,45	0,32	0,25	0,68	0,48	0,38	0,90	0,50	0,64
	2,09	1,50	1,11	4,14	2,97	2,32	6,14	4,43	3,46	8,11	4,59	5,86
4	0,90	0,64	0,50	1,79	1,28	1,00	2,67	1,92	1,49	3,55	1,99	2,55
	8,11	5,86	4,59	15,56	11,38	8,97	22,40	16,57	13,14	28,70	17,13	21,46
8	3,54	2,55	1,99	6,97	5,03	3,94	10,27	7,45	5,84	13,46	9,81	7,72
	28,70	21,46	17,13	49,15	38,32	31,32	63,75	51,55	43,09	74,15	61,95	52,84
16	13,46	9,81	7,72	25,10	18,66	14,84	35,19	26,63	21,41	43,91	27,47	33,83
	74,15	61,95	52,84	93,31	85,52	77,76	98,27	94,49	89,51	99,55	95,05	97,90
32	13,91	33,53	27,47	68,53	56,22	47,76	82,61	71,03	66,76	90,10	80,83	72,33
	99,55	97,90	95,05	100,00	99,96	99,76	100,00	100,00	99,99	100,00	100,00	100,00
64	90,10	80,83	72,33	99,01	96,32	92,55	99,91	99,30	97,95	99,99	99,86	99,41
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Примечание. Верхняя строчка без полок, нижняя с полками при значениях скорости воздушного потока в ней 25, 35 и 45 см/с соответственно.

осадительных камер: уменьшение высоты осаждения пыли за счет установки разделительных поверхностей по высоте и длине рабочей зоны камеры в сочетании с установкой перпендикулярно потоку вертикальных штор из свободно подвешенного капронового волокна на ширину камеры и на всю ее высоту. Такая камера может заменить циклон в первой ступени очистки, обеспечив, тем самым, надежную работу аспирационной сети. Целесообразность выбранного решения

подтверждается и экономическими расчетами замены циклонов на камеру.

Многочисленные исследования и наблюдения работы научно-исследовательских институтов, анализ проектной документации, опыт эксплуатации аспирационных систем позволяет с достаточной точностью определить необходимые расходы воздуха, отсос которых обеспечит нормальные санитарные условия в цехах промышленных предприятий.

При расчете различных аспирационных систем количество аспирируемого воздуха из укрытий составляет от 6 до 26 тыс. м³/ч, но чаще 12 – 13 тыс. м³/ч. Поэтому целесообразно камеры конструировать в виде модулей на 7,5 тыс. м³/ч с учетом 15 %-ной добавки на потери воздуха в воздуховодах и в аппарате очистки. Это позволит изготавливать их серийно и легко транспортировать автомобильным или железнодорожным транспортом, не нарушая при этом габаритные ограничения при перевозке. Необходимая производительность фильтра подбирается соответствующим количеством модулей.

Лабораторные исследования эффективности пылеосадительной камеры с волоконными шторами

Практические работы по повышению эффективности пылеулавливания в пылеосадительных камерах путем использования свободно подвешенных капроновых нитей внутри них дали положительный результат. Для более глубокого изучения влияния подвесок на эффективность работы камеры возникла необходимость

определения качественных и количественных зависимостей этого повышения от количества подвесок, их взаимного расположения, наличия устройства для их стабилизации, а также скорости воздушного потока и дисперсного состава пыли (табл. 2).

Кроме этого, в задачу лабораторных исследований входило определение величины трибозаряда, находящегося на волоконной шторе. Для этого была изготовлена модель, которая являлась частью промышленной камеры, что позволило воспроизводить процессы, происходящие в ней, с максимальным приближением к натурным процессам (рис. 2). Она состоит из корпуса камеры 1 с поперечным сечением 0,25×0,25 м² и длиной рабочей части 1,5 м. Боковые стенки камеры выполнены из стекла, что позволяет визуально наблюдать за процессами, происходящими внутри нее. Верхняя часть камеры выполнена съемной крышкой для свободного доступа к шторам из капронового волокна 2. Вход в камеру представляет собой диффузор, в котором размещены измерительные приборы 3 с анемометром и питатель 4. Через камеру воздух протягивается при помощи вентилятора 5 марки ВЦ-2,5. Отбор пылевых

Таблица 2

Гранулометрический состав пыли

Table 2. Size distribution of the dust

Фракция, мкм	40 – 25	25 – 16	16 – 10	10 – 6,3	6,3 – 4,0	4,0 – 2,5	2,5 – 1,6	1,6
Содержание, %	36,0	27,5	19,5	9,5	2,5	0,5	0,5	4,0

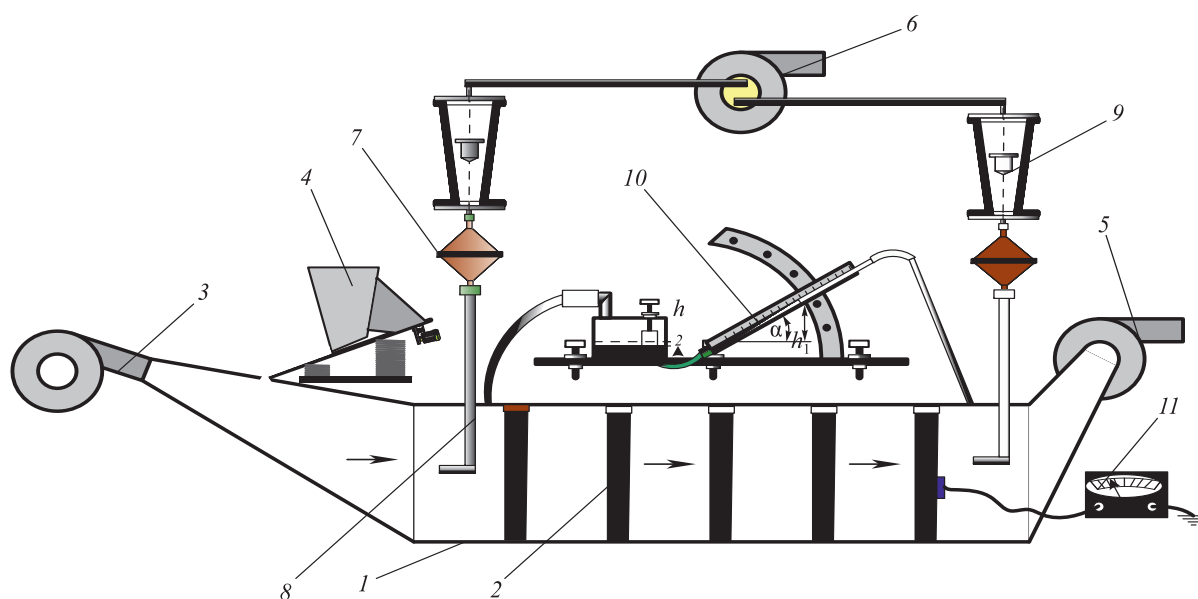


Рис. 2. Схема лабораторной установки пылеосадительной камеры с волоконными шторами:
1 – корпус; 2 – волоконная штора; 3 – анемометр; 4 – бункер-питатель; 5 – вентилятор; 6 – пылесос; 7 – патрон (аллонж); 8 – трубка; 9 – ротаметр; 10 – микроманометр; 11 – прибор для определения электрического заряда

Fig. 2. Scheme of laboratory unit of dust collection chamber with fiber fiber curtains:
1 – case; 2 – optic curtain; 3 – anemometer; 4 – feed bin; 5 – fan; 6 – vacuum cleaner; 7 – holder (allonge); 8 – tube; 9 – variable area flow meter; 10 – micropressure gauge; 11 – device for determining the electric charge

проб производили в начале и конце камеры методом внешней фильтрации путем протягивания запыленного воздуха при помощи воздуходувки 6 через фильтр АФА-БП-10, заключенный в аллонж 7, из пылезабортных трубок 8. Количество протягиваемого воздуха от 18 до 30 л/мин определяли при помощи ротаметров 9. Перепад давления по длине камеры определяли при помощи микроманометра 10 (ММН 10).

Влияние подвесок из капронового волокна на эффективность работы определяли путем пропускания запыленного воздуха через модель камеры без подвесок и с подвесками, изменяя их число от 1 до 8. С учетом того, что стабильность пылеосаждения при помощи подвесок наступает только после полного насыщения их пылью, которое происходит через 58 мин работы при скорости воздуха 0,34 м/с и запыленности до 5 г/м³, принят обратный порядок проведения эксперимента. В начале по рабочей длине камеры через каждые 200 мм установлены восемь подвесок. После их полного насыщения пылью производили замер запыленности в начале и в конце камеры. В дальнейшем производили замеры при каждом снятии одной насыщенной пылью подвески до полного их удаления. По данным промышленной эксплуатации камер установлено, что частицы пыли размером более 40 мкм практически полностью осаждаются в камере при ее длине до 4,5 м без применения каких-либо дополнительных устройств (рис. 3).

Из полученных результатов видно, что при отсутствии подвесок в камере средняя эффективность пылеосаждения не превышает 10 % (рис. 4, а, кривая 2). При одной подвеске коэффициент очистки увеличивается до 16 – 18 %, двух – 65 %, трех – 76 %, четырех – 82 % и т.д.

Темпы роста эффективности пылеосаждения снижаются по мере увеличения числа подвесок и при их числе от 6 до 8 практически происходит стабилизация эффективности на уровне 94 %. Определение влияния взаимного расположения подвесок в камере на эффективность ее работы производили путем изменения расстояния между четырьмя подвесками по длине камеры. Скорость движения воздуха в камере выдерживалась

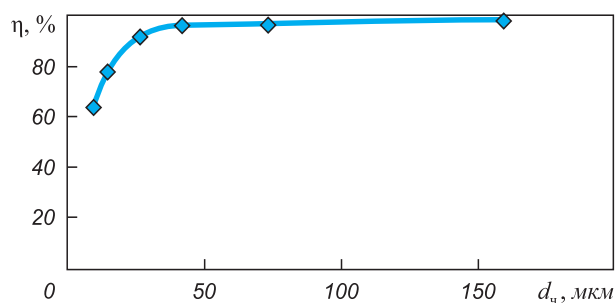


Рис. 3. Зависимость эффективности пылеулавливания в камере от размера частиц

Fig. 3. Dust collection efficiency in dependence in the chamber on the particle size

постоянной – 0,34 м/с. Существенного отличия в значениях коэффициента очистки в зависимости от расстояния между подвесками установить не удалось. Разброс величины коэффициента очистки лежал в пределах точности экспериментов. Визуальное наблюдение за характером работы подвесок показало, что пряди свободно подвешенного капронового волокна неравномерно колеблются под давлением движущегося воздушного потока. Особенно это характерно для первых рядов подвесок. Это приводит к периодическому образованию щелей между отдельными прядями, через которые проходит запыленный воздух.

Авторами выполнен эксперимент по стабилизации первой подвески гибкой капроновой сеткой с размерами ячеек 2×2 см, которая была установлена с задней стороны подвески. Характер работы подвесок изменился, уменьшились взаимные относительные колебания прядей волокна не только в стабилизированной первой подвеске, но и в других, расположенных за ней. Визуальные наблюдения подтверждены результатами инструментальных определений коэффициента очистки в камере с одной, двумя, тремя и четырьмя подвесками (рис. 4, а, кривая 1), из которых первая стабилизирована капроновой сеткой. Использование

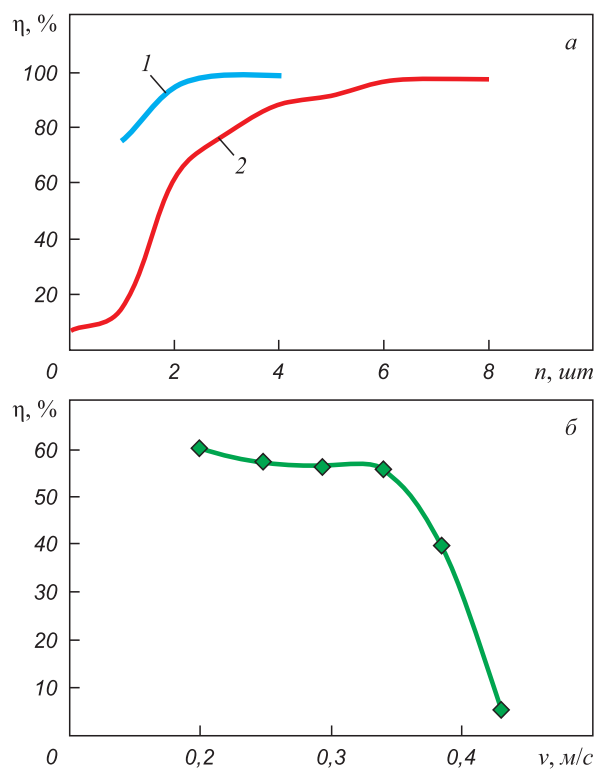


Рис. 4. Зависимость эффективности пылеочистки в камере с волоконными шторами от:

а – числа штор (1 – со стабилизацией шторы, 2 – без стабилизации шторы); б – скорости потока

Fig. 4. Dependence of dust collection efficiency in the chamber with fiber curtains:

а – number of curtains (1 – with curtain stabilization, 2 – without curtain stabilization); б – flow rate

гибкой капроновой сетки позволяет резко увеличить интенсивность роста эффективности работы пылеосадительной камеры, выводя ее на уровень 90 – 92 % уже при двух, трех и четырех подвесках. Очевидно, основную роль в этом играет более равномерное распределение воздуха по сечению камеры и снижение количества проскоков пыли между неравномерно отклонявшимися прядями подвешенного капронового волокна [10 – 12].

Для определения зависимости коэффициента очистки пылеосадительной камеры от скорости движения пылевоздушного потока проводили серию экспериментов на модели камеры с шестью подвесками и стабилизирующей капроновой сеткой на первой из них. Подвески размещали равномерно по длине камеры через каждые 200 мм. Для запыления воздуха использовали ту же пыль с размером частиц 40 – 0 мкм. Эксперименты начинали с минимальной скоростью 0,2 м/с и затем в каждой последующей серии увеличивали ее на 0,05 м/с. Скорость 0,2 м/с выбрали из условий экономичности работы пылеосадительной камеры на практике (рис. 4, б). При скорости пылевоздушного потока 0,2 м/с потери напора по длине камеры составляли 7 мм вод. ст. Запыленность воздуха на входе изменялась от 0,3 до 2,1 г/м³. Эффективность пылеулавливания составила от 98,0 до 95,4 % и в среднем была 96,5 %. Дальнейшее увеличение скорости через интервал 0,05 до 0,35 м/с вело к постепенному уменьшению коэффициента очистки до 95,9 % с увеличением потери напора по длине камеры на 1 мм вод. ст. При скорости 0,4 м/с наблюдалось более резкое падение эффективности пылеосаждения, средний коэффициент очистки снижался до 92,9 %, а при скорости 0,45 м/с – до 87,1 %. Визуальные наблюдения показали, что при скоростях 0,4 м/с и выше происходит неравномерное смещение прядей капронового волокна друг относительно друга. Это приводит к значительному проскоку пылинок через шторы, и, как следствие, резкому падению эффективности пылеулавливания камеры. Для измерения поверхностной плотности заряда, наводимого на волоконных шторах, был использован прибор ПК-2-ЗА с пределами измерения от 0 до 20 МКл/м². Измерения производили таким образом: поверхность специальной насадки, состоящей из металлического диска, запрессованного в изоляционный материал (акрилит), прижимали к волоконной шторе, извлеченной из аппарата. При этом плоскость насадки и заряженная поверхность образуют конденсатор, емкость которого по инструкции равна 8,75 пФ (рис. 5).

Определим площадь воздушного зазора, связанного с одним цилиндром, как разность площадей: прямоугольника $ABCF$ и половины окружности диаметром $2R$ по формуле $S' = 0,5R^2(4 - \pi)$. Тогда среднее значение толщины воздушного зазора рассчитаем по формуле

$$\langle d \rangle = 0,25R(4 - \pi). \quad (13)$$

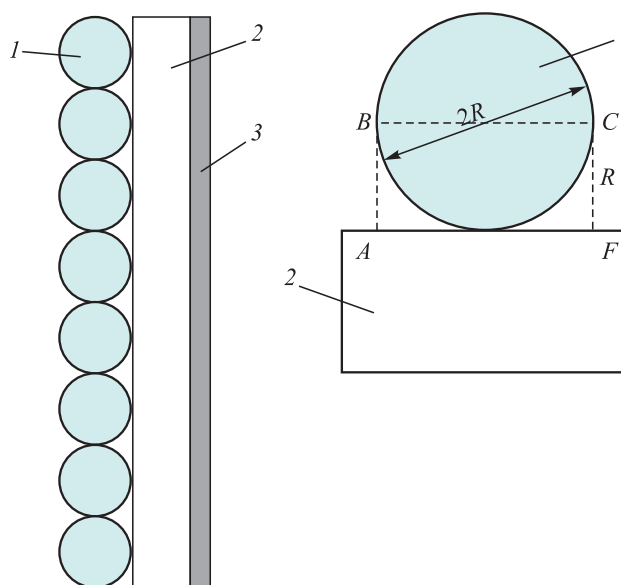


Рис. 5. Измерение поверхностной плотности заряда, индуцируемого на волоконной шторе:

1 – волоконная нить; 2 – акрилитовая прокладка;
3 – металлический диск

Fig. 5. Measurement of surface density of the charge induced on the fiber curtain:

1 – fiber yarn; 2 – acrylate filler; 3 – metal disc

Емкость образованного конденсатора определим как емкость батареи последовательно соединенных конденсаторов, диэлектриками у которых служат воздух и акрилит, а общую емкость рассчитаем по уравнению

$$\frac{1}{C_0} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}, \quad (14)$$

где $C_1 = 8,75$ пФ согласно инструкции; $C_2 = \frac{\epsilon_0 S}{d}$ – емкость конденсатора с воздушным зазором; $S = 7 \cdot 10^{-4}$ м² – площадь металлического диска; $\epsilon_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Ф/м – электрическая постоянная; d – толщина воздушного зазора, м.

Приняв диаметр цилиндра равным 30 мкм и выполнив подстановку в (13), получим для емкости этого конденсатора значение $C_0 = 8,73$ пФ, что составляет ошибку, равную 0,23 %. Таким различием емкости можно пренебречь. Измерения проводили следующим образом. С помощью небольшого зонда измеряли разность потенциалов на обкладках конденсатора ($\Delta\phi$, В), а затем рассчитывали поверхностную плотность заряда по формуле

$$\sigma = \frac{C_0 \Delta\phi}{S}. \quad (15)$$

Для исключения влияния зарастания фильтра пылью, т. е. вторичного фильтрующего слоя на эффективность аппарата, была принята следующая методика эксперимента. Измерения начинали после получасового запыления штор и однократного встряхивания пыли с

них. Продолжительность одного измерения составляла от 10 до 60 мин. При этом одновременно измеряли эффективность очистки воздуха от пыли (рис. 6, а).

Неравномерное распределение заряда по шторам, расположенным по ходу воздуха, подтверждает эффективность работы первой шторы (рис. 6, б). Скорость нарастания заряда убывает со временем, причем за первые 15 мин на шторах накопилось 50 % всего заряда. Наличие заряда на последующих шторах говорит о проскоке мелкодисперсной пыли, который уменьшается со временем, о чем свидетельствует стабилизация заряда на второй и третьей шторе уже через 20 – 30 мин работы аппарата. Уменьшение проскока можно объяснить образованием вторичного фильтрующего слоя пыли, им же объясняется увеличение эффективности пылеулавливания лабораторной установкой от 92,4 до 96,0 %. Следовательно можно сделать вывод о том, что электростатическое взаимодействие частиц и волокон играет большую роль в период образования фильтрующего слоя, а также в ускорении процесса коагуляции [13, 14].

Выводы. Получены выражения для степени инерционного и диффузионного осаждения частиц пыли на тонком цилиндрическом волокне и на шторе с равномерным распределением волокон в ней, которые позволили рассчитать оптимальные параметры очищаемого потока и фильтрующих штор. В частности, первый механизм превалирует при скоростях фильтрации, больших 20, а второй – меньших 5 см/с.

Проведен теоретический анализ вклада в осаждение пыли в камерах с волоконными шторами электрического взаимодействия между естественно заряженными частицами пыли и волокнами штор, который составил около 30 % от общей эффективности.

Разработана и испытана в промышленных условиях пылесадительная камера с волоконными шторами, которая при скорости фильтрации 25 – 35 см/с имеет максимальную степень улавливания гранитной пыли, близкую к 94 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Справочник по обогащению руд. Специальные и вспомогательные процессы / Под ред. О.С. Богданова, В.И. Ревнищева. – М.: Недра, 1983. – 376 с.
2. Алиев Г.М.-Ф. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: Справочник. – М.: Металлургия, 1986. – 544 с.
3. Фукс Н.А. Механика аэрозолей. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 352 с.
4. Расчет эффективности циклона, в котором, помимо сил инерции, действуют другие силы / В.Ф. Бызов, Г.А. Жовтуха, В.И. Мулявко и др. – Кривой рог: Криворожский технический университет, 1989. – 9 с. Деп. в Укр. НИИНТИ. № 1294. Ук. 89.
5. Ламб Г. Гидродинамика. – М.-Л.: Гостехиздат, 1947. – 928 с.

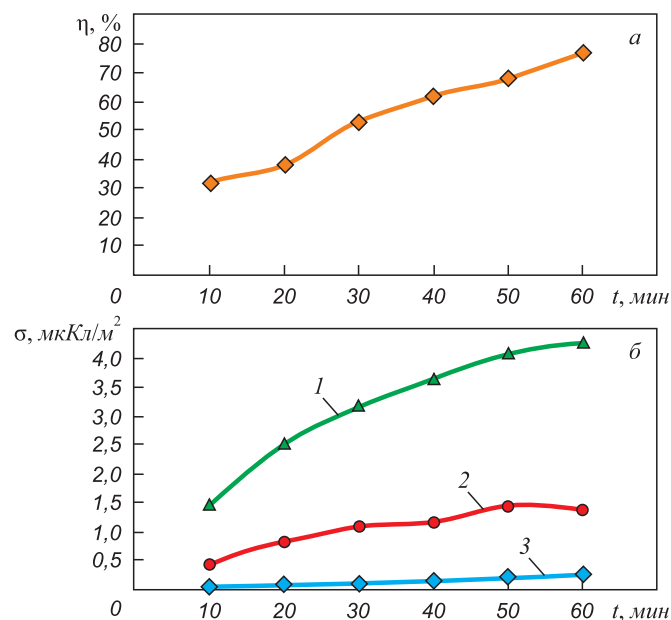


Рис. 6. Лабораторные исследования трибоэффекта: а – влияние на эффективность пылеулавливания камерой с волоконными шторами продолжительности эксперимента; б – распределение заряда по волоконным шторам; 1, 2 и 3 – порядковый номер

Fig. 6. Laboratory studies of triboeffect: а – impact of duration of the experiment on the dust collection efficiency in chamber with fiber curtains; б – charge distribution on the fiber curtains; 1, 2 and 3 – serial numbers

6. Волков Е.А. Численные методы: Учебное пособие. – М.: Наука, 1982. – 334 с.
7. Волкова З.В., Жусь Г.В., Кузьмин Д.В. Диэлектрическая сепарация. – М.: Недра, 1975. – 200 с.
8. Основы электрогазодинамики дисперсных систем / И.П. Верещагин, В.И. Левитов, Г.З. Марзабекян, М.М. Пашин – М.: Энергия, 1974. – 321 с.
9. Пат. 16983 А. Украина. Пылеуловитель / А.М. Кириченко, И.С. Багрий, В.И. Мулявко и др.; опубл. 29.08.1997. Бюл. № 4. С. 2.
10. Мулявко В.И., Панова С.Н., Кириченко А.М. Физические процессы пылесаживания в вертикальной камере с волоконными коагуляторами // Горный журнал. 2002. № 8. С. 50 – 56.
11. Гурин А.О. Мулявко В.И., Ляшенко В.И. Новітні засоби для пиловловлення на гірничих підприємствах // Екологія і промисловість. 2013. № 2. С. 50 – 56.
12. Гурин А.А., Мулявко В.И., Ляшенко В.И. Инновационные технологии пылеулавливания на горно-обогатительных предприятиях // Безопасность труда в промышленности. 2013. № 9. С. 54 – 59.
13. Мулявко В.И., Олейник Т.А., Ляшенко В.И. и др. Новые технологии и технические средства для сепарации слабмагнитных руд // Обогащение руд. 2014. № 2. С. 43 – 49.
14. Мулявко В.И., Олейник Т.А., Ляшенко В.И. и др. // Повышение эффективности утилизации графитосодержащей пыли металлургического производства // Бюл. ин-та «Черметинформация». Черная металлургия. 2015. № 8. С. 16 – 23.

Поступила 4 октября 2015 г.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF COLLECTING CHAMBERS FOR CAPTURE OF METALLURGICAL DUST

V.I. Mulyavko¹, T.A. Oleinik¹, V.I. Lyashenko², A.M. Kirichenko¹, M.O. Oleinik¹

¹Krivoy Rog National University, Krivoy Rog, Ukraine

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

Abstract. The main scientific and practical results improve the efficiency of the cameras for recycling of metallurgical dust through the development and introduction of the units of new generation capable to improve environmental protection and working conditions and to reduce the loss of useful product. The article describes analysis and evaluation of technologies and means of improving the efficiency of dust collection chambers. A theoretical study of the mechanism of dust deposition in the collecting chamber and the results of laboratory studies of its efficiency with fiber curtains and inertial deposition of the aerosol on the fiber curtain are considered. The authors have proposed the new mechanism for dust deposition in the collection chamber and the influence of the electric charge on the particle and fiber deposition efficiency of dust in the camera. The expressions for the degree of inertia and diffusion deposition of dust particles in the thin cylindrical fiber and regular system of vertical fibers were determined.

Keywords: efficiency, collection chamber, dust, waste, metallurgical production.

DOI: 10.17073/0368-0797-2016-7-456-464

REFERENCES

1. *Spravochnik po obogashcheniyu rud. Spetsial'nye i vspomogatel'nye protsessy* [Enrichment of ores. Reference book. Special and supporting processes]. Bogdanov O.S., Revnitshev V.I. eds. Moscow: Nedra, 1983, 376 p. (In Russ.).
2. Aliev G.M.-F. *Tekhnika pyleulavlivaniya i ochistki promyshlennykh gazov. Spravochnik* [Technique of dust removal and purification of industrial gases. Directory]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 544 p. (In Russ.).
3. Fuks N.A. *Mekhanika aerolei* [Mechanics of aerosols]. Moscow: Izd-vo ANSSSR, 1955, 352 p. (In Russ.).
4. Byzov V.F., Zhovtukha G.A., Mulyavko V.I., etc. *Raschet effektivnosti tsyklona, v kotorom, pomimo sil inertsii, deistvuyut drugie sily* [Calculation of efficiency of the cyclone, wherein, in addition to the inertial forces, other forces act]. Ukr. NIINTI Dep. No. 1294Uk -89. Krivoy rog: Krivorozhskii tekhnicheskii universitet, 1989, 9 p. (In Russ.).
5. Lamb Horace, *Hydrodynamics*, 6th edition, Dover, Mineola, NY (1945) (Originally published as “*Treatise on the Mathematical Theory of the Motion of Fluids*”), (1879). (Russ.ed.: Lamb H. *Gidrodinamika*. Moscow-Leningrad.: Gostekhizdat, 1947, 928 p.).
6. Volkov E.A. *Chislennyye metody. Uchebnoye posobie* [Numerical methods. Manual]. Moscow: Nauka, 1982, 334 p. (In Russ.).
7. Volkova Z.V., Zhus' G.V., Kuz'min D.V. *Dielektricheskaya separatsiya* [Dielectric separation]. Moscow: Nedra, 1975, 200 p. (In Russ.).
8. Vereshchagin I.P., Levitov V.I., Marzabekyan G.Z., Pashin M.M. *Osnovy elektrozagodinamiki dispersnykh sistem* [Basics of electro-gasdynamics of disperse systems]. Moscow: Energiya, 1974, 321 p. (In Russ.).
9. Kirichenko A.M., Bagrii I.S., Mulyavko V.I., etc. *Pyleulovitel'* [Dust collector]. Patent Ukrainy no. 16983 A. Byul. 1997, no. 4, p. 2. (In Russ.).
10. Mulyavko V.I., Panova S.N., Kirichenko A.M. Physical processes of dust collection in vertical chamber with fiber coagulators. *Gornyi zhurnal*. 2002, no. 8, pp. 50–56. (In Russ.).
11. Gurin A.O. Mulyavko V.I., Lyashenko V.I. New technologies and equipment for dust collection in mines. *Ekologiya i promyshlennost'*. 2013, no. 2, pp. 50–56. (In Ukr.).
12. Gurin A.A., Mulyavko V.I., Lyashenko V.I. Innovative technologies of dust collection at the mining and processing enterprises. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2013, no. 9, pp. 54–59. (In Russ.).
13. 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.).
14. Mulyavko V.I., Oleinik T.A., Lyashenko V.I., etc. Improving the efficiency of utilization of graphite dust of metallurgical production. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 2015, no. 8, pp. 16–23. (In Russ.).

Information about the authors:

V.I. Mulyavko, Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Chair of Physics (muwaliz2012@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.), Senior Researcher (vi_lyashenko@mail.ru)

A.M. Kirichenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair of Ecology (legus_1984@mail.ru)

M.O. Oleinik, Postgraduate of the Chair of Mineral Processing (lpumrmax@gmail.com)

Received October 04, 2015