

Логвинков, Г.Н. Шабанова и др.] // Зб. наук. праць ВАТ «УкрНДІВогнетривів ім. А.С. Бережного». – 2010. – № 110. – С. 130 – 136. 2. Смоленский Г.А. Сегнетоэлектрики и антисегнетоэлектрики / [Г.А. Смоленский, В.А. Боков, В.А. Исупов и др.]. – Л.: Наука, 1971. – 476 с. 3. Вербицкая Т.Н. Технология изготовления варикондов и их свойств. – М.: Госэнергоиздат, 1958. – 36 с. 4. Панич А.Е. Физика и технология пьезокерамических материалов: учеб. пособие / А.Е. Панич, Т.Г. Левин. – Ростов-на-Дону: Изд-во РГУ, 2002. – 45 с. 5. Шабанова Г.Н. Синтез сегнетокерамических материалов на основе композиций системы ВаО – SrO – TiO<sub>2</sub> / [Г.Н. Шабанова, Е.В. Христинич, С.М. Логвинков и др.] // Вісник НТУ «ХП». – 2008. – № 41. – С. 169 – 174. 6. Балакевич В.Л. Техническая керамика / В.Л. Балакевич. – М.: Стройиздат, 1984. – 218 с. 7. Резинкин О.Л. Методика экспериментального исследования свойств сегнетоэлектриков в импульсных электрических полях / О.Л. Резинкин, В.В. Вытришко // Вісник НТУ «ХП». – 2006. – № 13. – С. 37 – 42.

Поступила в редколлегию 20.04.12.

УДК 621.225

**Н.Д. БАЛЕРА**, канд. техн. наук, проф., ХНУСиА, Харьков,  
**Л.В. САЕНКО**, канд. техн. наук, доц., ХНУСиА, Харьков,  
**А.С. СОРОКОТЯГА**, канд. техн. наук, доц., ХНУСиА, Харьков,  
**С.Ю. БАЛЕРА**, студент, ХНУСиА, Харьков

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЫЛЕОЧИСТКИ В АСПИРАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ ТШМ**

Запропоновано методику розрахунку ефективності пиловловлюючих пристроїв (аспіраційна шахта, циклон, рукавний фільтр) в аспіраційних системах – трубах кульових млинів замкнутого циклу. Методика дозволяє розрахувати основні технологічні параметри системи пилекозистки.

Предложена методика расчета эффективности пылеулавливающих устройств (аспирационная шахта, циклон, рукавный фильтр) в аспирационных системах – трубах пульверных мельниц замкнутого цикла. Методика позволяет рассчитать основные технологические параметры системы пылеочистки.

The method of calculating the efficiency of dust-catching devices (aspirating shaft, cyclone, baghouse) in the aspiration system – pipes ball mills closed loop. The technique allows to calculate the main technological parameters of the vacuum cleaners.

Для устранения пылевыделения, а так же осадки готового продукта после воздушного сепаратора при помоле цементного клинкера, трубчатые шаровые мельницы (ТШМ) замкнутого цикла оснащаются аспирационной системой, включающей сепаратор и очистные устройства.

Аспирационный воздух после ТШМ и сепаратора подвергается очистке по двум причинам:

- технологическая, улавливание выносимого непосредственно из ТШМ материала помола, в котором преобладают высокодисперсные фракции с крупностью до 30 мкм, а так же осадка готового продукта выносимого воздухом из сепаратора;

- экологическая, обеспечение допускаемого стандартом содержания цементной пыли в выбрасываемом в атмосферу аспирационном воздухе.

Так как удельное содержание цементной пыли в аспирационном воздухе значительно превышает  $500 \text{ г/м}^3$ , то, с учетом особенностей цементной пыли, очистка в циклонах и рукавных фильтрах будет малоэффективной.

В настоящей статье приведена оценка эффективности применения трёхступенчатой очистки аспирационного воздуха, включающей пылеосадительную камеру, циклоны и рукавные фильтры.

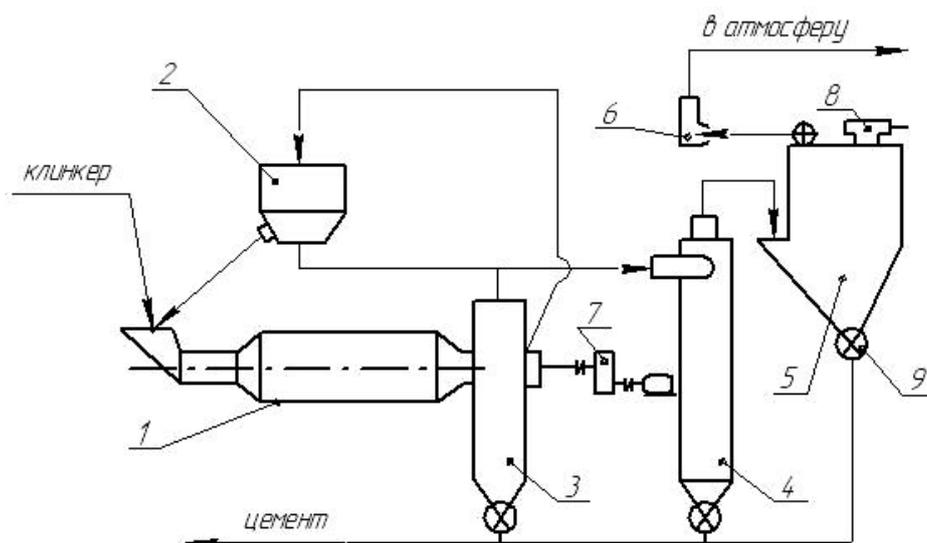


Рис. 1. Принципиальная схема аспирации ТШМ замкнутого цикла с трёхступенчатой очисткой воздуха

1 – ТШМ, 2 – сепаратор, 3 – аспирационная шахта, 4 – циклон, 5 – рукавный фильтр, 6 – вентилятор, 7 – привод мельницы, 8 – механизм встряхивания рукавов, 9 – затвор.

На первой ступени очистки аспирационного воздуха, целесообразно применять пылеосадительную камеру, в которой осаждается основная масса пыли [1, 2, 3].

Опытным путем установлено, что каждой скорости воздуха в аспирационной камере соответствует определенная выходная концентрация пыли, не зависящая от количества поступающего в шахту цемента.

Эта концентрация может быть найдена по эмпирической формуле,  $\text{г/м}^3$  [4]:

$$C_{\text{ВЫХ}} = 25u^{2,86} \quad (1)$$

Согласно формуле (1) при скорости воздуха  $u = 1,7$  м/с концентрация пыли на выходе из камеры достигает  $44 \text{ г/м}^3$ , что соответствует общей эффективности осаждения пыли в аспирационной камере на уровне 90 %. Осаждение пыли в аспирационной камере происходит, в основном, под действием коагуляционно-седиментационного механизма. В результате турбулентных пульсаций транспортирующего газового потока происходит сближение, столкновение и коагуляция (слипание) частиц цемента, [6, 7, 8]. При этом происходит не только укрупнение самих частиц, но и образование достаточно крупных (до 1 мм) рыхлых образований - агрегатов пыли. Установлено [5], что если плотность твердой фазы в этих агрегатах больше некоторого критического значения, то их обтекание потоком газа мало отличается от обтекания непроницаемой сферы такого же объема. Скорость оседания агрегатов намного больше скорости оседания отдельных частиц, что и объясняет наблюдаемую достаточно высокую эффективность очистки запыленного газа в аспирационных камерах. Кроме гравитационного осаждения, определенный вклад в обеспыливание аспирационного воздуха вносит турбулентное осаждение тонкодисперсных частиц на стенки аспирационной камеры. Эффективность осаждения частиц размерами менее 10 мкм можно найти по формуле:

$$n_a = 1 - \exp\left(\frac{-0,23H}{D \text{Re}_D^{1/8}}\right) \quad (2)$$

где  $\text{Re}_D^{1/8} = uD\rho_3/\mu$  – число Рейнольдса для потока запыленного воздуха в аспирационной камере.

В соответствии с формулой (2) эффективность турбулентного осаждения частиц на стенки камеры достигает 20 %. Эффективность осаждения частиц пыли зависит от их размера, поэтому аспирационная камера выполняет также определенную секционную функцию, в результате которой на выходе из камеры возрастает содержание более тонких фракций (табл. 1) [4].

Коэффициенты уноса отдельных фракций пыли из аспирационной камеры могут быть найдены по формуле:

$$S_{ii} = (1 - n_a) \frac{\Delta D_i'}{\Delta D_i} \quad (3)$$

где:  $n_a$  – общая эффективность осаждения пыли в камере, определяемая по формуле (2);  $\Delta D_i, \Delta D'_i$  – относительные доли отдельных фракций на входе в камеру и выходе из нее.

Таблица 1

Изменение дисперсного состава пыли в аспирационной шахте

Место отбора проб пыли	Размеры фракции, мкм							
	0...10	10...20	20...30	30...40	40...60	60...90	90...200	>200
	Содержание фракций, %							
На входе в шахту $\Delta D$	30,2	19,9	19,8	13,6	7,4	7,6	1,3	0,03
На выходе из шахты $\Delta D'$	61,7	15,7	11,8	3,6	1,5	0,08	-	-

Значения фракционных коэффициентов пылеуноса приведены в табл. [2]

Таблица 2

Значения коэффициентов уноса отдельных фракций пыли из аспирационной шахты ( $n = 0,9$ )

Размеры фракций, мкм	0...10	10...20	20...30	30...40	40...60	60...90	90...200	>200
Средний размер частиц, $d_i$ , мкм	5	15	25	35	50	70	145	250
Коэффициент уноса	0,2	0,08	0,05	0,026	0,020	0,01	0,003	0,001

Для вывода аналитической зависимости коэффициента уноса частиц пыли от их размера данные, приведенные в табл.2, аппроксимировались по формуле:

$$S_{ii} = S(d_i) = \frac{1}{1 + \left(\frac{d_i}{d_{0,5}}\right)} \quad (4)$$

где:  $d_{0,5}$  – размер частицы, для которых коэффициент уноса равен 0,5, т.е. 50%.

Запылённый воздух после прохождения сепаратора и аспирационной камеры, переходит во вторую ступень очистки, в циклоны, а далее в третью – рукавные фильтры. В аспирационной системе применяются преимущественно циклоны НИИОГАЗ ЦН-15, специально разработанные для очистки больших объемов сильно запыленных газов.

Основные размеры циклонов ЦН-15 приведены в табл. 3

Основные размеры циклона ЦН-15

Наименование размера	Отношение размера к диаметру циклона D
Диаметр выхлопной трубы, $d_{вт}$	0,59
Диаметр пылевывпускного отверстия $d_{впо}$	0,4
Высота кольцевого канала $H_{кк}$	1,44
Высота камеры циклона $H_{км}$	2,82
Высота цилиндрической части $H_{ц}$	2,26
Высота конической части $H_{х}$	2
Общая высота цилиндра $H_{ц}$	4,56

Применяемый в настоящее время метод определения полного коэффициента очистки запыленного воздуха в циклонах (метод НИИОГАЗ) основан на предположении о логарифмически-нормальном распределении частиц улавливаемой пыли. Однако это предположение для частиц слипающейся цементной пыли, прошедшей через аспирационную шахту, не выполняется.

Кроме того, метод НИИОГАЗа не может быть использован для определения фракционных коэффициентов очистки, и не позволяет учитывать конструктивные и технологические особенности циклонов.

В связи с этим, для прогнозирования фракционной эффективности циклонов будем использовать метод Дейча [8]:

$$\varepsilon(d_i) = 1 - \exp\left(\frac{2p \cdot R_{цo} \cdot V_{цo}(d_i) \cdot H_{цo} \cdot \psi(d_i)}{L_o}\right) \quad (5)$$

где:  $R_{цo}$ ,  $H_{цo}$  – условный радиус и высота поверхности осаждения соответственно;  $V_{цo}(d_i)$  – скорость осаждения частиц;  $L_o$  – объемный расход очищаемого газа.

В результате компьютерного моделирования процессов, происходящих в циклонах [9] установлено, что скорость осаждения частиц можно представить в виде:

$$V_{цo}(d_i) = 43,82 \text{ Stk} \cdot U_{ц} \quad (6)$$

где:  $U_{ц}$  – скорость газа в плане циклона;  $D_{ц}$  – диаметр циклона;  $\text{Stk}$  – число Стокса:

$$Stk = \frac{d_i^2 U_{ц} C_2}{9mD_{ц} \Phi(d_i)} \quad (7)$$

где:  $\Phi(d_i)$  – коэффициент формы частиц.

Для размеров поверхности оседания частиц найдены следующие соотношения:

$$H_{цo} = H_{кк} + H_{км} = 4,26D_{ц} \quad (8)$$

$$R_{цo} = \frac{D_{ц}}{2} \cdot \frac{H_{кк}}{H_{цo}} + \frac{d_1 + D_{ц}}{4} \cdot \frac{H_{кк}}{H_{цo}} = 0,4D_{ц} \quad (9)$$

Учитывая формулы (6)...(9) и условия оптимального режима работы циклонов приводим соотношение (5) к виду:

$$\varepsilon_{ц} (d) = 1 - \exp(-0,064d_i^2 k(d_i)) \quad (10)$$

где коэффициент учитывающий диаметр циклона, определяется по формуле:

$$k(d_i) = \eta(d_i) / \Phi(d_i) \quad (11)$$

По данным, приведенным в табл. 4 с использованием метода наименьших квадратов можно выразить указанный коэффициент:

$$k(d) = 0,67 \exp(-0,048d) \quad (12)$$

Таблица 4

Повфракционная степень улавливания цементной пыли в циклоне ЦН-15

Размеры фракций, мкм	0...10	10...20	20...40	40...60	> 60
Фракционная степень очистки, %	65,1	98	98,5	99,2	99,7

Общая эффективность очистки запыленного технологического воздуха может быть найдена по фракционным степеням очистки и заданному составу улавливаемой пыли  $\Delta D(d_i)$ :

$$n_{ц} = \sum_{i=1}^m n(d_i) \Delta D(d_i) \quad (13)$$

Если дисперсный состав пыли неизвестен, то общая степень осаждения частиц цементной пыли в циклонах ЦН-15 после вертикальных аспирацион-

ных шахт принимается равной 80 % [4].

С помощью соотношений (10) и (12) можно рассчитать элементы диагональной матрицы  $\Psi$  коэффициентов пропуска отдельных фракций пыли циклонами, применяемыми для осаждения тонкого продукта сепарации и очистки аспирационного и сепарационного воздуха

$$\Psi_{ii} = \exp(-0,064d_i k(d_i)) \quad (14)$$

В качестве третьей ступени очистки потоков запыленного воздуха в ТСИ замкнутого цикла применяются рукавные фильтры.

При определении площади фильтрации решающее значение имеет удельная пылевая нагрузка, т.е. масса пыли, подаваемая на 1 м<sup>2</sup> фильтрующей поверхности в единицу времени. Удельная пылевая нагрузка не должна превышать 0,2...0,3 г/(м<sup>2</sup>·с). Во избежание больших потерь давления в фильтре, удельная пылевая нагрузка не должна превышать 0,033 м<sup>3</sup>/(м<sup>2</sup>·с).

Отличительной особенностью рукавных фильтров является практически одинаковая пофракционная степень очистки, которая для потоков, прошедших осадительные или очистные циклоны, равняется  $n_{\text{ц}} = 97\%$  [2, 7]. Поэтому матрица пропуска пыли через рукавный фильтр имеет вид:

$$\Phi = \begin{vmatrix} 1-n & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1-n & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1-n \end{vmatrix}$$

т.е.  $\Phi_{ii} = 1 - n_{\text{ц}}$ .

В настоящее время в системе очистки аспирационного воздуха широко применяются рукавные фильтры типа ФРКД на основе иглопробивного лавсанового войлока и других синтетических фильтровальных тканей. Регенерация рукавов в этих фильтрах осуществляется импульсами сжатого воздуха. Скорость фильтрования этих фильтров примерно равна 1,0 м/мин, а общая степень очистки достигает 99,8 %. Гидравлическое сопротивление в конце межрегенерационного периода составляет 1200...1800 Па, что находится в приемлемых пределах [9, 10]. Регенерация фильтрующего материала или его замена в процессе эксплуатации фильтров, кроме самоочищающихся, должна осуществляться по достижении максимально-расчетного сопротивления

фильтров. Контроль сопротивления фильтров должен осуществляться с помощью микроанометров.

Таблица 5

Классификация фильтров по эффективности

Класс фильтров	Размеры эффективно улавливаемых пылевых частиц	Нижние пределы эффективности при очистке атмосферного воздуха, %
I	Любые	99
II	>1 мкм	85
III	10—50 мкм	60

Однако следует учитывать, что при пологой характеристике вентилятора указанный способ контроля загрязнения фильтров не пригоден, так как даже небольшое увеличение сопротивления фильтра может привести к недопустимому уменьшению производительности вентилятора.

В этом случае периоды между очисткой фильтрующего материала определяются опытным путем или расчетом с учетом данных табл. 6

Таблица 6

Запыленность атмосферного воздуха

Атмосферный воздух	Характеристика местности	Среднесуточная концентрация пыли в атмосферном воздухе, мг/м <sup>3</sup>
Частый	Сельские местности в непромышленные поселки	До 0,15
Слабо загрязненный	Жилые районы промышленных городов	До 0,5
Сильно загрязненный	Индустриальные районы промышленных городов	До 1
Чрезмерно загрязненный	Территории предприятий с большими и пылевыми выбросами	3 и более

Для расчета периода между регенерацией или заменой фильтрующего материала следует определить необходимые параметры.

Удельная нагрузка воздуха на 1 м<sup>2</sup> фильтрующей поверхности:

$$K = \frac{L}{F},$$

где: L – количество воздуха, проходящего через фильтр, м<sup>3</sup>/ч; F – площадь фильтрующей поверхности, м<sup>2</sup>.

Количество пыли, оседающей на  $1 \text{ м}^2$  фильтрующей поверхности за время работы приточной установки в течение суток:

$$Q = C \cdot K \cdot E \cdot P$$

где:  $C$  – концентрация пыли в набегающем воздухе,  $\text{г}/\text{м}^3$ ;  $E$  – эффективность фильтра;  $P$  – число часов работы установок в течение суток.

Продолжительность работы фильтра (суток) до достижения заданного сопротивления:

$$B = \frac{B}{Q},$$

где:  $B$  – расчетная пылеемкость фильтра до достижения требуемого сопротивления,  $\text{г}/\text{м}^2$  [8, 9].

**Список литературы:** 1. Банит Ф.Г. Пылеулавливание и очистка газов в промышленности строительных материалов / Ф.Г. Банит, А.Д. Малыгин. – М.: Стройиздат, 1979. – 351 с. 2. Лапшин А.Б. Технология обеспыливания в производстве цемента / А.Б. Лапшин. – Новороссийск: Стромэкология, 1995. – 150 с. 3. Сатарин В.М. Движение и обеспыливание газов в цементном производстве / В.М. Сатарин, С.В. Прели. – М.: Госстройиздат, 1960. – 265 с. 4. Петров Б.А. Обеспыливание технологических газов в цементном производстве / Б.А. Петров, П.В. Сидяков. – М.: Госстройиздат, 1965. – 89 с. 5. Фукс Н.А. Механика аэрозолей / Н.А. Фукс. – М.: Издательство АН СССР, 1961. – 160 с. 6. Шантала В.Г. Математическое моделирование в прикладных задачах механике в двухфазных потоках / В.Г. Шантала. – Белгород: Издательство БелГТАСМ, 1996. – 102 с. 7. Лапшин А.Б. Обеспыливание аспирационного воздуха цементных мельниц / А.Б. Лапшин, Г.Г. Козико, С.А. Мусатян // Цемент. – 1989. – № 5. – С. 20 – 21. 8. Справочник по пыле- и газоулавливанию / под общей ред. А.А. Русанова. – М.: Энергоатом Издат, 1983. – 312 с. 9. Балера Н.Д. Исследование, разработка аспирационных систем и устройств трубных шаровых мельниц: дис. ... кандидата техн. наук: 05.02.16 / Балера Николай Дмитриевич. – Х., 1984. – 251 с. 10. Пат. UA 85918 Украина, С2. Рукавний фільтр / Балера М.Д., Ємельяненко М.Г., Сопов В.П. – № ua200705988; Опубл. 10.03.09, Бюл. № 5.

Поступила в редколлегию 16.05.2012