

УДК 621. 928. 9

А.А. Буров, канд. техн. наук,
В.Я. Гамоліч, математик,
А.В. Карамушко, бакалавр,
Одес. нац. политехн. ун-т

ОБЕСПЫЛИВАНИЕ ИЗОЛИРОВАННОГО ПРОСТРАНСТВА

О.О. Буров, В.Я. Гамоліч, А.В. Карамушко.
Знепилювання ізольованого простору. Представлено результати аналізу замкнутих по газу систем знепилювання ізольованих просторів з різною кількістю елементів, що змінюють дисперсність циркулюючого пилу. Показано перспективність використання системи з меншою кількістю елементів. Доведено ефективність використання відцентрового димососа як концентратора, коагулятора і вловлювача циркулюючого пилу.

A.A. Burov, V.Ya. Gamolich, A.V. Karamushco.
Disdusting of the isolated space. The results of analyzing the gas-closed disdusting systems for closed spaces with different amount of elements changing the dispersivity of the circulating dust are presented. The efficiency of using a centrifugal smoke exhauster as a concentrator, coagulator and catcher of the circulating dust is proved.

Сравнительный анализ возможных вариантов обеспыливания объекта “Укрытие” выявил эффективность использования дымососа — пылеуловителя в замкнутых по газу обеспыливающих системах [1]. Его использование уменьшает габариты и металлоемкость системы в целом, что важно при извлечении радиоактивной пыли.

Дымосос — золоуловитель с диаметром рабочего колеса 1200 мм испытывался в энергопоезде с периодической выгрузкой золы из бункера выносного циклона ЦН15у диаметром 600 мм и постоянным гидрозолоудалением из циклона того же типа диаметром 750 мм. При расходах дымовых газов до 32 тыс. м³/ч смена выносных пылеуловителей и способов золоудаления повысила на 10 % извлечение из дымовых газов зольных частиц с медианным диаметром $\delta_{50} = 30$ мкм. Концентрация золы в дымовых газах на выходе из дымососа достигала 3,5 г/м³, при концентрации на входе до 12 г/м³. Рециркуляция 20 % от расхода исходных дымовых газов повысила суммарную производительность дымососа с 35 до 42 тыс. м³/ч [2].

Установка работала 4500 ч при одном ремонте выносного циклона и лопаток рабочего колеса дымососа. Отмечен интенсивный износ участка спирали, максимально приближенной к рабочему колесу, с углом поворота в пределах 180°. Износ резко уменьшался при большем угле поворота и практически отсутствовал в зоне пылевыпускного патрубка дымососа. Интенсивно изнашивалась цилиндрическая часть циклона против входного патрубка и нижняя часть конуса вблизи пылевыпускного отверстия. Износ дымососа и выносного циклона препятствует их использованию в замкнутых системах обеспыливания.

Преимущественный износ начального участка улитки дымососа свидетельствует о максимальной концентрации золы по его длине и необходимости приближения к нему места забора циркулирующего концентрированного газового потока. Соединение улитки дымососа с бункером или сменным контейнером (рис. 1) и отказ от выносного пылеуловителя сокращают число элементов обеспыливающей системы, повышают надежность, уменьшают ее габариты и металлоемкость [3].

Циркуляция концентрированного запыленного потока по контуру пылеобечайки позволяет накапливаться пыли в стационарном бункере или сменном контейнере. Большая по сравнению со стенками улитки толщина полуобечайки увеличивает ее долговечность.

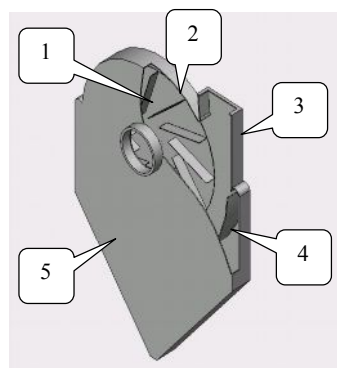


Рис. 1. Схема пылеулавливающего агрегата: 1 — рабочее колесо дымососа, 2 — верхняя часть улитки дымососа, 3 — выходной патрубок дымососа, 4 — полуобечайка, 5 — контейнер (бункер-пылесборник)

Более того, полуобечайка способна функционировать без заметного нарушения эффективности пылеулавливания при наличии в ней свищей, суммарная площадь которых меньше предельной величины, что также повышает надежность пылеулавливающего агрегата. Возможно восстановление или замена полуобечайки при ремонте дымососа.

В отличие от системы с выносным пылеуловителем циркулирующий в замкнутом контуре агрегата запыленный поток не поступает в рабочее колесо дымососа. При этом замедляется износ его лопаток, что также повышает надежность пылеулавливающего агрегата. Общий коэффициент улавливания пыли в дымососе – пылеуловителе определяется как [4]

$$\eta = \frac{\eta_{ул} \eta_{ц}}{1 - \eta_{ул} + \eta_{ул} \eta_{ц}}, \quad (1)$$

где $\eta_{ул}$, $\eta_{ц}$ — коэффициенты улавливания улитки и выносного циклона, соответственно.

Представленная зависимость справедлива для пылеулавливающего агрегата при замене коэффициента улавливания циклона на η_k — коэффициент улавливания пыли в контейнере. Согласно (1), $\eta = 0,33$ при $\eta_{ул} = \eta_k = 0,5$ и $\eta = 0,33$, если $\eta_{ул} = 0,9$, $\eta_k = 0,7$. Коэффициент улавливания улитки повышается с приближением к начальному участку забора циркулирующего потока. С увеличением его запыленности повышается коэффициент улавливания в контейнере.

Доочистка дымовых газов после электрофильтра в центробежном дымососе и выносном пылеуловителе с замкнутыми контурами подтвердила высокую сепарационную способность дымососа [3], необходимость приближения забора циркулирующего потока к начальному участку улитки и эффективность использования дымососа для концентрации и коагуляции субмикронных частиц. Дымовые газы с расходом порядка 10^5 м³/ч и начальной запыленностью около 80 г/м³ выносят из вращающейся печи цементного производства до 8 т/ч клинкерной пыли. Групповые циклоны улавливают до 7 т/ч, электрофильтр – около 1 т/ч и 14 кг/ч частиц мельче 1 мкм поступает в атмосферу.

Медианный размер частиц на входе в электрофильтр $\delta_{50} = 5$ мкм, на выходе из него — на порядок меньше. Поэтому количество поступающих в атмосферу частиц превышает число частиц, уловленных в циклонах и электрофильтре. Субмикронные частицы не задерживаются в верхних дыхательных путях, проникают в легкие и препятствуют газовому обмену организма с атмосферой. Твердые частицы способны накапливаться в атмосфере и перемещаться на произвольные расстояния. Они могут ухудшать экологическую обстановку как в локальных, так и в глобальных масштабах. Система доочистки дымовых газов после электрофильтра снизила на треть выбросы субмикронных частиц в атмосферу.

Эффективность извлечения пыли из циркулирующего потока в контейнере определяется условием обтекания выпуклой стороны полуобечайки, т.е. поворотом потока на угол $\varphi = \pi$. Экспериментальные исследования траекторий частиц [5], распределения угольной пыли по сечению канала с углом поворота $\varphi = \pi$ [6] и золы вдоль периферийной границы такого же канала с замкнутым контуром [7] подтверждают реальность допущения $\eta_k = 0,7$. Отличительная особенность центробежной сепарации — увеличение коэффициента улавливания с повышением запыленности циркулирующего потока.

Изменение состояния циркулирующей в замкнутой системе пыли представлено приведенным на рис. 2 графом переходных состояний.

В этом случае справедливы равенства: $a_{21} = (1 - \eta_2)(a_{12} + a_{32})$, $a_{23} = \eta_2(a_{12} + a_{32})$, $a_{32} = (1 - \eta_3)a_{23}$. Из них при $a_{12} = 1$ следует

$$a_{21} = \frac{1 - \eta_2}{1 - \eta_2 + \eta_2 \eta_3}; \quad a_{23} = \frac{\eta_2}{1 - \eta_2 + \eta_2 \eta_3}; \quad a_{32} = \frac{\eta_2(1 - \eta_3)}{1 - \eta_2 + \eta_2 \eta_3}. \quad (2)$$

Граф состояний системы с дымососом и выносным пылеуловителем [1] имеет вид, представленный на рис. 3.

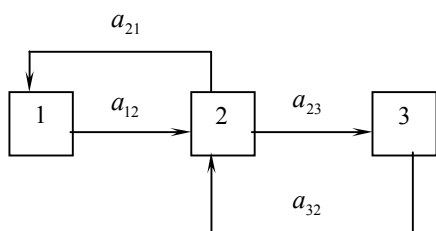


Рис. 2. Граф системы с пылеулавливающим агрегатом: 1 — объект обеспыливания, 2 — дымосос, 3 — пылесборник

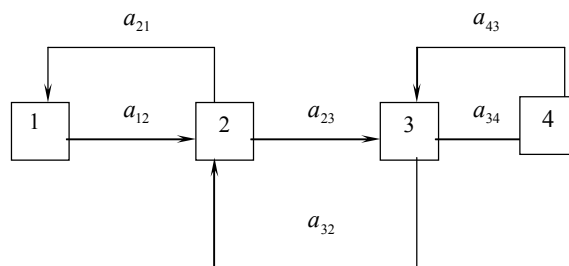


Рис. 3. Граф системы с выносным пылеуловителем: 1 — объект обеспыливания, 2 — дымосос, 3 — пылесборник

Здесь плотность потоков событий a_{ij} также связана с коэффициентами улавливания пыли в структурных элементах η_i , и при $a_{12} = 1$ справедливы представления [1]

$$a_{21} = \frac{(1-\eta_2)(1-\eta_3+\eta_3\eta_4)}{\eta_3\eta_4+(1-\eta_2)(1-\eta_3)}; \quad a_{23} = \frac{\eta_2(1-\eta_3+\eta_3\eta_4)}{\eta_3\eta_4+(1-\eta_2)(1-\eta_3)}; \quad a_{32} = \frac{\eta_2(1-\eta_2)}{\eta_3\eta_4+(1-\eta_2)(1-\eta_3)}; \quad (3)$$

$$a_{34} = \frac{\eta_2\eta_3}{\eta_3\eta_4+(1-\eta_2)(1-\eta_3)}; \quad a_{43} = \frac{\eta_2\eta_3(1-\eta_4)}{\eta_3\eta_4+(1-\eta_2)(1-\eta_3)}.$$

Согласно (3) невозможно одновременное приближение к единице коэффициентов улавливания пылеуловителя η_3 и пылесборника η_4 .

Сравнение эффективности обеспыливающих систем с разными числами одинаковых структурных элементов сводится к определению знака неравенства между плотностями потоков пыли a_{23} в (2) и a_{34} в (3). При равенстве коэффициентов обоих пылесборников достаточно определить знак неравенства между отношениями

$$a_{23} = \frac{\eta_2}{1-\eta_2+\eta_2\eta_3} \quad \text{и} \quad a_{34} = \frac{\eta_2 x}{\eta_3\eta_4+(1-\eta_2)(1-\eta_3)},$$

где $x = \eta_3$ в уравнении (2).

Производная $\frac{da_{34}}{dx} = \frac{\eta_2(1-\eta_2)}{(1-\eta_2)^2+(\eta_2+\eta_4)^2x}$ всегда положительна, поэтому a_{34} возрастает, и

в интервале $0 < x < 1$ справедливо $\max \frac{\eta_2 x}{1-\eta_2+(\eta_2+\eta_4)x} = \frac{\eta_2}{1+\eta_4}$.

Последовательность оценок при $x = \eta_3$ имеет вид

$$\frac{\eta_2\eta_3}{1-\eta_2(\eta_2+\eta_4)\eta_3} = \frac{\eta_2\eta_3}{\eta_3\eta_4+(1-\eta_2)(1-\eta_3)} = a_{34} < \frac{\eta_2}{1+\eta_4} = \frac{\eta_2}{1-\eta_2(\eta_2+\eta_4)} < \frac{\eta_2}{1-\eta_2(\eta_2+\eta_4)} = a_{23},$$

следовательно, неравенство $a_{34} < a_{23}$ свидетельствует о большей плотности потока пыли на входе в пылесборник системы с меньшим числом элементов.

Взаимодействие между тремя структурными элементами описывается системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_1}{dt} &= -a_{12}P_1 + a_{21}P_2; \\ \frac{dP_2}{dt} &= a_{23}P_1 - (a_{21} + a_{23})P_2 + a_{32}P_3; \\ \frac{dP_3}{dt} &= a_{23}P_2 - a_{23}P_3; \\ P_1(0) &= 1; P_2(0) = P_3(0) = 0, \end{aligned} \right\}$$

откуда следует

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_1}{dt} &= a_{12} - (a_{12} + a_{21})P_1 - a_{21}P_3; \\ \frac{dP_3}{dt} &= a_{23} - a_{23}P_1 - (a_{23} + a_{32})P_3; \\ P_1(0) &= 1; P_3(0) = 0. \end{aligned} \right\}$$

Решение зависит от характеристических корней матрицы

$$\mathbf{A} = \begin{vmatrix} (a_{12} + a_{21}) & -a_{21} \\ -a_{23} & -(a_{23} + a_{32}) \end{vmatrix}$$

и имеет вид

$$P_j = \begin{cases} q_j - \alpha_j e^{-\lambda_j t} & \text{при } D > 0; \\ q_j + e^{-\lambda_2 t} (m_j \cos \beta t + n_j \sin \beta t) & \text{при } D < 0, \end{cases}$$

где q_j — предельные вероятности;

$-\lambda_1$ и $-\lambda_2$ — действительные характеристические корни матрицы \mathbf{A} ;

$-\alpha$ и $-\beta$ — комплексные характеристические корни матрицы \mathbf{A} ;

$$D = (a_{12} + a_{21} + a_{23} + a_{32})^2 - 4(a_{12}a_{23} + a_{12}a_{32} + a_{21}a_{32}).$$

Значение показателей для каждого структурного элемента определяются соответствующими зависимостями:

$$\begin{aligned} q_1 &= \frac{1}{1 + \frac{a_{12}}{a_{21}} + \frac{a_{12}a_{23}}{a_{21}a_{32}}}; q_2 = 1 - q_1 - q_3; q_3 = \frac{1}{1 + \frac{a_{32}}{a_{23}} + \frac{a_{21}a_{32}}{a_{12}a_{23}}}; \\ \alpha_1 &= \frac{(1 - q_1)(a_{12} + a_{21} + \lambda_2)}{\lambda_2 - \lambda_1}; \alpha_2 = -(\alpha_1 + \alpha_3); \alpha_3 = \frac{\alpha_1(a_{12} + a_{21} + \lambda_1)}{a_{21}}; \\ \beta_1 &= \frac{a_{21}q_3(1 - q_1)(a_{12} + a_{21} + \lambda_1)}{\lambda_2 - \lambda_1}; \beta_2 = -(\beta_1 + \beta_3); \beta_3 = \frac{-\beta_1(a_{12} + a_{21} + \lambda_2)}{a_{21}}; \\ m_1 &= 1 - q_1; m_1 = \frac{(a_{23} + a_{32} - \alpha)q_3(a_{12} + a_{21} - x)}{\beta}; m_2 = -(1 - q_1 - q_3); m_2 = -(n_1 + n_2); \\ m_3 &= -q_3; m_3 = \frac{(a_{23} + a_{32} - x)q_3 - (1 - q_1)a_{23}}{\beta}. \end{aligned}$$

Если Q_0 — расход источника пыли, то расход накапливаемой пыли $Q = Q_0 P_3(t)$ или

$$Q = \begin{cases} Q_0(q_3 + \alpha_3 e^{-\lambda_1 t} + \beta_3^{-\lambda_2 t}) & \text{при } D > 0, \\ Q_0(q_3 e^{-at}), (m_3 \cos \beta t + n_3 \cos \beta t) & \text{при } D < 0. \end{cases}$$

При $D > 0$ масса накопленной за время t пыли $M_t = Q_0 \left[q_3 t + \frac{\alpha_3}{\lambda_3} (1 - e^{-\lambda_1 t}) + \frac{\beta_3}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t}) \right]$.

Корень решения полученного уравнения относительно времени наполнения пылесборника t является критерием эффективности замкнутой системы обеспыливания с тремя структурными элементами. Таким образом, уменьшение числа структурных элементов с четырех до трех в замкнутой по газу системе обеспыливания изолированного пространства сокращает время заполнения пылесборника, упрощает систему, повышает надежность, уменьшает ее габариты и массу. Перечисленные обстоятельства могут быть решающими при обеспыливания разрушенного блока ЧАЭС до и во время разборки.

Литература

1. Возможные варианты обеспыливания объекта "Укрытие" / Балан С.А., Буров А.А., Буров А.И., Гамолич В.Я. // Ядерная и радиационная безопасность. — Одесса, 2000. — Вып.4. — С. 43 — 44.
2. Карпухович Д. Т. Исследование промышленных установок дымососов-золоуловителей Д-12 на электропоезде. // Механическая очистка промышленных газов. — М: НИИОГАЗ, Машиностроение, 1974. — С. 44 — 60.
3. Буров О.О. Багатоканальний відцентровий золопилувловлювач для аспірації теплоенергетичного обладнання: Автореф. дис... канд. техн. наук. — Одеса, 2002. — 19с.
4. Справочник по пыле- и золоулавливанию / Под ред. А.А. Русанова. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 312 с.
5. Маслов В.Е. Пылеконцентраторы в топочной технике. — М.: Энергия, 1977. — 207 с.
6. Певнев А.О. Экспериментальное исследование распределения угольной пыли в криволинейных воздушно-пылевых потоках // Обогащение неметаллических полезных ископаемых. — Свердловск, 1976. — Вып. 1. — С. 150 — 154.
7. Балан С.А. Распределение пыли вдоль границы криволинейного потока с замкнутыми контурами / Балан С.А., Буров А.А., Буров А.И. // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2000. — Вып. 2(11). — С. 56 — 59.

Поступила в редакцию 9 ноября 2005 г.