

УДК 621.928.9

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

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ОТКРЫТОЙ И ЗАМКНУТОЙ ОБЕСПЫЛИВАЮЩИХ СИСТЕМ

А.В. Карамушко, В.Я. Гамоліч, О.О. Буров. Порівняльний аналіз відкритої і замкненої знепилюючих систем. Наведено математичні моделі і результати аналізу відкритої і замкненої по газу знепилюючих систем. Доведено ефективність використання замкненої по газу знепилюючої системи.

А.В. Карамушко, В.Я. Гамоліч, А.А. Буров. Сравнительный анализ открытой и замкнутой обеспыливающих систем. Представлены математические модели и результаты анализа открытой и замкнутой по газу обеспыливающих систем. Доказана эффективность использования замкнутой по газу обеспыливающей системы.

A.V. Karamushko, V.Ya. Gamolich, A.A. Burov. The comparative analysis of open and closed deduster systems. The mathematical models and the results of analysing an open and closed on gas deduster systems are presented. Efficiency of using the gas-closed deduster system is proved.

Использование центробежного вентилятора для концентрации и коагуляции тонкодисперсной пыли сокращает потери наиболее ценных фракций измельченных продуктов (муки, сухого молока, цемента, угольной пыли и др.) и снижает загрязнения ими окружающей среды [1]. Эти потери и загрязнения устраняются в замкнутых по газу системах аспирации технологического оборудования. Сравнительный анализ эффективностей обеспыливания циркулирующих потоков в системах с разными числами структурных элементов свидетельствует о преимуществе системы с меньшим их числом [2]. Вывод справедлив для циркулирующих потоков с малыми запыленностями. Увеличение концентрации, поступающей в рабочее колесо вентилятора полидисперсной пыли, требует предварительной очистки запыленного потока. Она достигается в выносном разгрузителе (рис. 1).

Забираемый из источника пыли аспирационный воздух поступает через тангенциальный входной патрубок в разгрузитель — вихревую камеру, соединенную замкнутым контуром с пылесборником. Освобожденный от грубых фракций пыли воздушный поток направляется в рабочее колесо вентилятора, улитка которого соединена замкнутым контуром с пылесборником. Обеспыленный воздух возвращается вентилятором в источник пыли. Графы эволюции пыли в циркулирующем и транзитном воздушных потоках представлены на рис. 2.

Коэффициенты улавливания определяют распределение пыли по элементам, концентрация пыли имеет вероятностную интерпретацию — плотность потока событий a_{ij} . Плотности потока событий находятся через коэффициенты улавливания η_i и позволяют сравнивать вероятности наполнения бункеров (пылесборников) пылью обеспыливающих систем альтернативных вариантов [2, 3].

Значение a_{ij} зависит от физических, режимных, конструктивных и других параметров запыленных потоков. Рассматривая безразмерные плотности потоков, можно принять $a_{12}=1$.

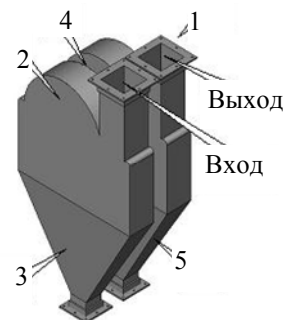


Рис. 1. Пылеулавливающий агрегат с разгрузителем: 1 — источник пыли; 2 — разгрузитель; 3 — пылесборник разгрузителя; 4 — вентилятор; 5 — пылесборник вентилятора

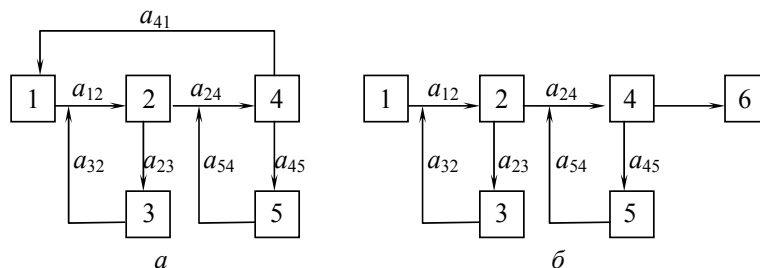


Рис. 2. Графы состояний запыленных потоков воздуха для замкнутой (а) и открытой (б) обеспыливающих систем: 1 — источник пыли; 2 — разгрузитель; 3 — пылесборник разгрузителя; 4 — вентилятор; 5 — пылесборник вентилятора

Плотность потока событий a_{ij} для открытой обеспыливающей системы имеет вид

$$\begin{aligned}
 a_{23} &= a_{12}(1 - \eta_2)\eta_3, \\
 a_{24} &= a_{12}(1 - \eta_2)(1 - \eta_3), \\
 a_{45} &= a_{24}(1 - \eta_4)\eta_5 = a_{12}(1 - \eta_2)(1 - \eta_3)(1 - \eta_4)\eta_5, \\
 a_{46} &= a_{24}(1 - \eta_4)(1 - \eta_5) = a_{12}(1 - \eta_2)(1 - \eta_3)(1 - \eta_4)(1 - \eta_5).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Аналогично плотность потока событий a_{ij} для замкнутой обеспыливающей системы представляется как

$$\begin{aligned}
 a_{23} &= a_{12}(1 - \eta_2)\eta_3, \\
 a_{24} &= a_{12}(1 - \eta_2)(1 - \eta_3), \\
 a_{45} &= a_{24}(1 - \eta_4)\eta_5 = a_{12}(1 - \eta_2)(1 - \eta_3)(1 - \eta_4)\eta_5, \\
 a_{41} &= a_{24}(1 - \eta_4)(1 - \eta_5) = a_{12}(1 - \eta_2)(1 - \eta_3)(1 - \eta_4)(1 - \eta_5).
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Для сравнения эффективности работы замкнутой и открытой обеспыливающих систем зададим значения коэффициентов улавливания: $\eta_2=0,01$, $\eta_3=0,7$, $\eta_4=0,02$, $\eta_5=0,9$. Тогда, согласно (1) и (2), безразмерные плотности потоков принимают значения:

- для открытой обеспыливающей системы $a_{23}=0,7$, $a_{24}=0,3$, $a_{45}=0,27$, $a_{46}=0,03$;
- для замкнутой обеспыливающей системы $a_{23}=0,7$, $a_{24}=0,3$, $a_{45}=0,27$, $a_{41}=0,03$.

Таким образом, переходные вероятности P_{ij} для открытой обеспыливающей системы

$$\begin{aligned}
 P_{12} &= 1; \\
 P_{23} &= a_{23}/(a_{23} + a_{24}) = 0,7/(0,7 + 0,3) = 0,7; \\
 P_{24} &= a_{24}/(a_{23} + a_{24}) = 0,3/(0,7 + 0,3) = 0,3; \\
 P_{45} &= a_{45}/(a_{45} + a_{46}) = 0,27/(0,27 + 0,03) = 0,9; \\
 P_{46} &= a_{46}/(a_{45} + a_{46}) = 0,03/(0,27 + 0,03) = 0,1.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Аналогично переходные вероятности P_{ij} для замкнутой обеспыливающей системы имеют вид

$$\begin{aligned}
 P_{12} &= 1; \\
 P_{23} &= a_{23}/(a_{23} + a_{24}) = 0,7/(0,7 + 0,3) = 0,7; \\
 P_{24} &= a_{24}/(a_{23} + a_{24}) = 0,3/(0,7 + 0,3) = 0,3; \\
 P_{45} &= a_{45}/(a_{45} + a_{41}) = 0,27/(0,27 + 0,03) = 0,9; \\
 P_{41} &= a_{41}/(a_{45} + a_{41}) = 0,03/(0,27 + 0,03) = 0,1.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Учитывая (3), система уравнений Колмогорова для открытой обеспыливающей системы принимает вид (t — время, P_i — вероятность состояния элемента системы)

$$\begin{cases} dP_1/dt = -P_{12}P_1 = -P_1; \\ dP_2/dt = P_{12}P_1 - P_{23}P_2 - P_{24}P_2 = P_1 - P_2; \\ dP_3/dt = P_{23}P_2 = 0,7P_2; \\ dP_4/dt = P_{24}P_2 - P_{46}P_4 - P_{45}P_4 = 0,3P_2 - P_4; \\ dP_5/dt = P_{45}P_4 = 0,9P_4; \\ dP_6/dt = P_{46}P_4 = 0,1P_4. \end{cases} \quad (5)$$

Аналогічно, учитывая (4), система уравнений Колмогорова для замкнутой обеспыливающей системы принимает вид

$$\begin{cases} dP_1/dt = -P_{12}P_1 + P_{41}P_4 = -P_1 + 0,1P_4; \\ dP_2/dt = P_{12}P_1 - P_{23}P_2 - P_{24}P_2 = P_1 - P_2; \\ dP_3/dt = P_{23}P_2 = 0,7P_2; \\ dP_4/dt = P_{24}P_2 - P_{41}P_4 - P_{45}P_4 = 0,3P_2 - P_4; \\ dP_5/dt = P_{45}P_4 = 0,9P_4. \end{cases} \quad (6)$$

Характеристические корни матрицы системы уравнений (5)

$$R_1=0, R_2=0, R_3=0, R_4=-1, R_5=-1, R_6=-1,$$

тогда вероятности состояния открытой обеспыливающей системы имеет вид

$$P_k(t) = (a_{k1} + a_{k2}t + a_{k3}t^2) + (b_{k1} + b_{k2}t + b_{k3}t^2)e^{-t}.$$

Характеристические корни матрицы системы уравнений (6)

$$R_1=-1,1554+0,2691i, R_2=-1,1554-0,2691i, R_3=0, R_4=-0,6893,$$

тогда вероятности состояния замкнутой открытой обеспыливающей системы можно записать как

$$P_k(t) = a_k + a_k t + b_k e^{-0,6893t} + e^{-1,1554t} (c_k \cos(0,2691t) + d_k \sin(0,2691t)).$$

Методом неопределенных коэффициентов получим общее решение для открытой обеспыливающей системы

$$P_1(t) = (b_{11})e^{-t},$$

$$P_2(t) = (b_{21} + b_{11}t)e^{-t},$$

$$P_3(t) = a_{31} - 0,7(b_{11} + b_{21} + b_{11}t)e^{-t},$$

$$P_4(t) = (b_{41} + 0,3b_{21}t + 0,15b_{11}t^2)e^{-t},$$

$$P_5(t) = a_{51} - (0,27(b_{11} + b_{21}) + 0,9b_{41} + 0,27(b_{11} + b_{21})t + 0,135b_{11}t^2)e^{-t},$$

$$P_6(t) = a_{61} - (0,03(b_{11} + b_{21}) + 0,1b_{41} + 0,03(b_{11} + b_{21})t + 0,015b_{11}t^2)e^{-t}.$$

Аналогично получим общее решение для замкнутой обеспыливающей системы

$$P_1(t) = 0,3219b_4 e^{-0,6893t} + e^{-1,1554t} ((-0,2786d_4 - 0,1609c_4) \cos(0,2691t) + (0,2787c_4 - 0,1609d_4) \sin(0,2691t));$$

$$P_2(t) = 1,036b_4 e^{-0,6893t} + e^{-1,1554t} ((0,8968d_4 - 0,5176c_4) \cos(0,2691t) + (-0,8968c_4 - 0,5174d_4) \sin(0,2691t));$$

$$P_3(t) = a_3 - 1,0521b_4 e^{-0,6893t} + e^{-1,1554t} ((-0,4462d_4 + 0,4175c_4) \cos(0,2691t) + (0,4461c_4 + 0,4174d_4) \sin(0,2691t)); \quad (8)$$

$$P_4(t) = b_4 e^{-0,6893t} + e^{-1,1554t} (c_4 \cos(0,2691t) + d_4 \sin(0,2691t));$$

$$P_5(t) = 1 - a_3 - 1,3058b_4 e^{-0,6893t} + e^{-1,1554t} ((-0,172d_4 - 0,739c_4) \cos(0,2691t) + (0,172c_4 - 0,7391d_4) \sin(0,2691t)).$$

В начальный момент времени ($t=0$) все пылевые частицы находятся в источнике ($P_1=1$), т.е. $P_2=P_3=P_4=P_5=P_6=0$, тогда для открытой обеспыливающей системы вероятности состояния (7) будут следующие:

$$\begin{aligned}
 P_1(t) &= e^{-t}; \\
 P_2(t) &= te^{-t}; \\
 P_3(t) &= 0,7(1 - e^{-t} - te^{-t}); \\
 P_4(t) &= 0,15t^2 e^{-t}; \\
 P_5(t) &= 0,27(1 - e^{-t} - te^{-t} - 0,5t^2 e^{-t}); \\
 P_6(t) &= 0,03(1 - e^{-t} - te^{-t} - 0,5t^2 e^{-t}).
 \end{aligned}$$

Аналогично для замкнутой обеспыливающей системы находим вероятности состояния (8) как

$$\begin{aligned}
 P_1 &= 0,3334e^{-0,6893t} + e^{-1,1554t} (0,6666 \cos(0,2691t) + 0,0018 \sin(0,2691t)); \\
 P_2 &= 1,0731e^{-0,6893t} + e^{-1,1554t} (-1,073 \cos(0,2691t) + 1,8573 \sin(0,2691t)); \\
 P_3 &= 0,7215 - 1,0898e^{-0,6893t} + e^{-1,1554t} (0,3682 \cos(0,2691t) - 1,211 \sin(0,2691t)); \\
 P_4 &= 1,03585e^{-0,6893t} + e^{-1,1554t} (-1,0358 \cos(0,2691t) - 1,7943 \sin(0,2691t)); \\
 P_5 &= 0,2785 - 1,3526e^{-0,6893t} + e^{-1,1554t} (1,0741 \cos(0,2691t) + 1,148 \sin(0,2691t)).
 \end{aligned}$$

Графически решения систем уравнений представлены на рис. 3.

Решение систем уравнений дает возможность записать формулы накопления пыли в обеспыливающей системе и сравнить эффективность открытой и замкнутой систем (рис. 4.):

$$\begin{aligned}
 \sum_{i=2}^4 P_i^{\text{откр.}} &= 0,97 - 0,97e^{-t} + 0,03te^{-t} + 0,015t^2 e^{-t}; \\
 \sum_{i=2}^4 P_i^{\text{замкн.}} &= 1 - 0,3335e^{-0,6893t} - 0,6665e^{-1,1554t} \cos(0,2691t).
 \end{aligned}$$

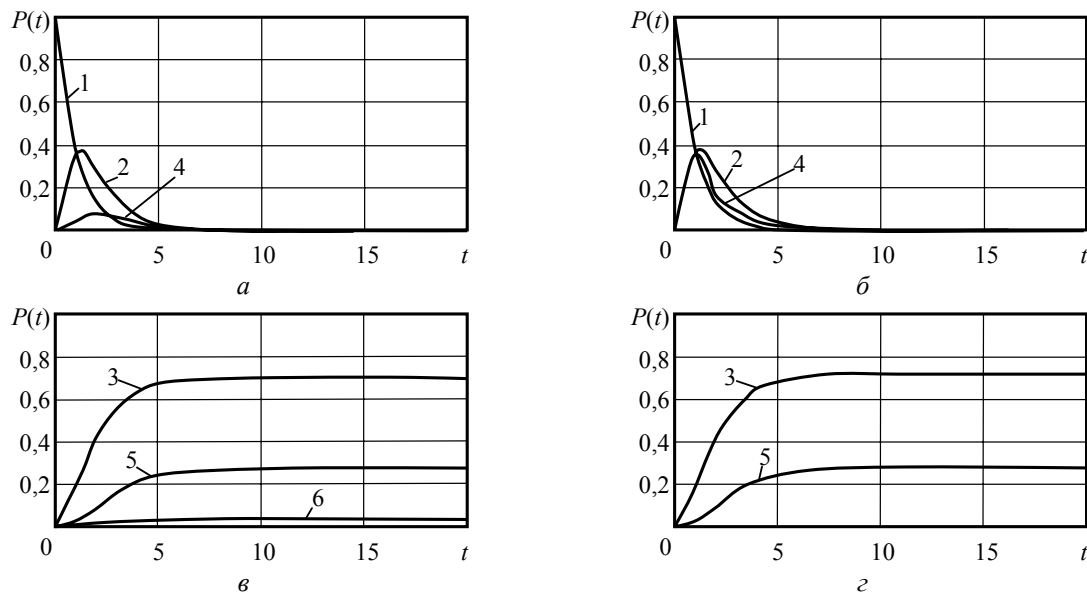


Рис. 3. Вероятности состояний открытой (а, в) и замкнутой (б, г) систем обеспыливания: 1 — источник пыли P_1 , 2 — разгрузитель P_2 , 3 — бункер разгрузителя P_3 , 4 — вентилятор P_4 , 5 — бункер вентилятора P_5 , 6 — окружающая среда P_6

Предельные вероятности (при $t \rightarrow \infty$) оседания частиц пыли в системе

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_{\text{откр.}} = 0,97$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} P_{\text{замкн.}} = 1$$

Динамика заполнения пылью элементов систем представлена в таблице.

Время заполнения пылью элементов открытой и замкнутой обеспыливающих систем, ч

P, %	Открытая система				Замкнутая система			
	1	3	5	Σ	1	3	5	Σ
10	2,3026	0,6624			2,3678	0,663		
20	1,6094	1,0584			1,6315	1,0586		
25			5,7505				5,4929	
30	1,204	1,4596			1,2133	1,4588		
40	0,9163	1,9183			0,9206	1,9143		
50	0,6931	2,5077			0,6951	2,4931		
60		3,4356				3,3711		
80				1,6443				1,631
85				1,9618				1,9328
90				2,4448				2,3672
95				3,5235				3,1411

Из всего изложенного можно сделать следующие выводы:

— бункер разгрузителя в обеих системах заполняется быстрее, чем бункер вентилятора;

— при работе по открытой схеме происходит более быстрое извлечение пыли из источника (из-за отсутствия постоянного возврата неуловленной пыли, однако при этом присутствует выброс пыли в окружающую среду);

— замкнутая обеспыливающая система работает эффективнее открытой системы.

Замена открытых систем аспирации замкнутыми устраняет потери готовой продукции и загрязнение окружающей среды.

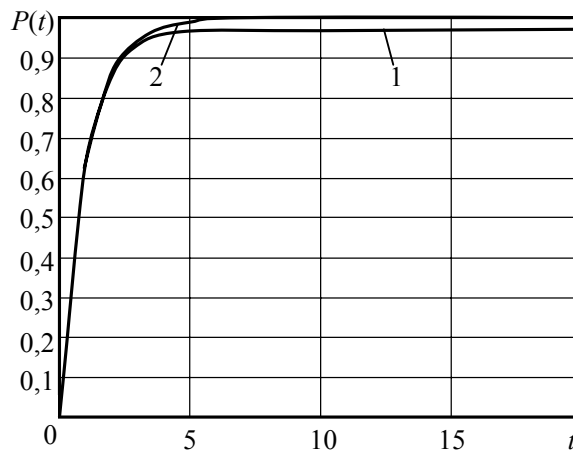


Рис. 4. Вероятность накопления пыли в открытой (1) и замкнутой (2) обеспыливающей системе

Литература

1. Буров, О.О. Багатоканальний відцентровий золопилловловлювач для аспірації теплоенергетичного обладнання: автореф. дис... канд. техн. наук / О.О. Буров. — Одесса, 2002. — 19 с.
2. Буров, А.А. Обеспыливание изолированного пространства / А.А. Буров, В.Я. Гамолит, А.В. Карамушко // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2006. — Вып.1 (25). — С. 36 — 40.
3. Кемени, Дж. Конечные цепи Маркова / Дж. Кемени, Дж. Снелл. — М.: Наука, 1970. — 272 с.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Кравченко В.П.

Поступила в редакцию 1 ноября 2010 г.