

to find the mathematical relationship between the injuries system and its functions. The task is complicated when you need to deal with measurement reliability of the system and identification of its structural damage if the system hidden for visual observation plots. Additional diagnostic information was obtained using the two models — the information and the hidden Markov model. As a result, for the hidden part of a redundant system a new state matrix with specific values of probabilities is received.

*Keywords:* diagnostics, network systems, hidden Markov model, state estimation.

Рецензент д-р. техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Крылов В.Н.

Поступила в редакцию 29 мая 2014 г.

УДК 504.3.054:614.712.001.57

**В.Я. Гамоліч**, математик,  
**А.Г. Бутенко**, канд. техн. наук, доц.,  
**С.Ю. Смык**, спеціаліст,  
Одес. нац. политехн. ун-т

## ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА

**Введение.** Современные нормы экологической безопасности предъявляют высокие требования к качеству очистки газовых выбросов в атмосферу от полидисперсной пылевой массы. На промышленных предприятиях, особенно небольших, и в настоящее время широко используются инерционные уловители, эффективность которых не соответствует современным требованиям. Возможности повышения их эффективности очистки за счет конструктивного усовершенствования фактически исчерпаны, а замена на более эффективные сдерживается как технологическими особенностями производства, так и экономическими факторами.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Известно, что эффективность работы уловителя зависит не только от их конструкции, но и от свойств пыли, в частности, фракционного состава. Предложенная комбинированная система очистки газа позволяет значительно повысить эффективность уловителей за счет совершенствования схемы движения полидисперсного потока и связанного с этим перераспределения пылевой массы по фракционному признаку. Поток с тонкими фракциями направляется в уловитель циркуляционного контура, а поток с крупными — в основной уловитель. Поскольку коэффициент улавливания крупных фракций достаточно высокий, то проскок пыли в окружающую среду является незначительным. Этим обеспечивается экологический эффект. Опыт внедрения комбинированной системы очистки (КСО) показал многократное снижение массы выбрасываемой в окружающую среду пыли, по сравнению с обычной прямоточной схемой [1].

**Цель работы** является — построение вероятностной модели КСО, позволяющей прогнозировать изменение показателей системы во времени.

**Изложение основного материала.** Характерной особенностью КСО является изменение во времени ее основных показателей. Все время работы системы можно разделить на два периода:

— очистки, состоящий из двух этапов: разгонного, когда параметры изменяются, асимптотически приближаясь к стабильным, и этапа стабильных показателей;

DOI: 10.15276/opus.1.43.2014.35

© В.Я. Гамоліч, А.Г. Бутенко, С.Ю. Смык, 2014

— период выбега, когда пыль от источника в систему не поступает (работа КСО на холостом ходу), и КСО работает на самоочищение от неуловленной ранее пыли.

Длительность разгонного периода и времени выбега определяются конструктивными особенностями системы и характеристиками ее оборудования. Расчет динамики показателей в эти периоды возможен на основании модели, построенной с использованием Марковских цепей [2, 3].

Если систему четырех элементов КСО (рис. 1) дополнить пятым — “окружающая среда”, то, пренебрегая эффектами коагуляции и накопления частиц внутри газопроводов, можно отобразить КСО на граф состояний (рис. 2).

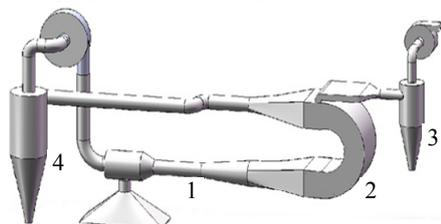


Рис. 1. Схема комбинированной системы очистки:  
1 — эжектор-смеситель, 2 — разделитель, 3 — основной уловитель, 4 — уловитель циркуляционного контура

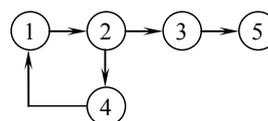


Рис. 2. Граф состояний КСО

Этому графу состояний соответствует матрица переходных вероятностей

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & P_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{23} & P_{24} & 0 \\ 0 & 0 & P_{33} & 0 & P_{35} \\ P_{41} & 0 & 0 & P_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{55} \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Заметим, что после эжектора частица пыли попадает только в разделитель, а частица, поступающая в окружающую среду, остается в ней навсегда. Поэтому  $P_{12} = P_{55} = 1$ .

Так как сумма переходных вероятностей в каждой строке матрицы  $\mathbf{B}$  равна 1, то

$$P_{23} + P_{24} = P_{33} + P_{35} = P_{41} + P_{44} = 1.$$

С учетом этих замечаний матрица  $\mathbf{B}$  принимает вид

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{23} & 1 - P_{23} & 0 \\ 0 & 0 & P_{33} & 0 & 1 - P_{33} \\ 1 - P_{44} & 0 & 0 & P_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где  $P_{23} = P_{23}(\delta)$  — парциальная эффективность (вероятность) попадания частицы на вход основного уловителя, ( $\delta$  — размер частицы);

$P_{33} = P_{33}(\delta)$  — парциальная эффективность основного уловителя;

$P_{44} = P_{44}(\delta)$  — парциальная эффективность уловителя циркуляционного контура.

Три функции парциальных эффективностей в (1) и (2) определяются конструкциями трех элементов КСО (разделитель, главный уловитель и уловитель циркуляционного контура).

Начальное состояние Марковской цепи матрицы  $\mathbf{B}$  представляет матрица — строка  $\mathbf{A}$ :

$$\mathbf{A} = (1; 0; 0; 0; 0).$$

Предельные парциальные вероятности вычисляются по формуле

$$\lim_{n \rightarrow \infty} AB^n = [P_1(\delta); P_2(\delta); P_3(\delta); P_4(\delta); P_5(\delta)]. \quad (3)$$

Из (3) парциальные вероятности улавливания  $P(\delta)$  и проскока  $g(\delta)$  в системе КСО.

$$P(\delta) = P_3(\delta) + P_4(\delta); g(\delta) = P_5(\delta). \quad (4)$$

Интегральные вероятности улавливания и проскока

$$F = \int_0^{\infty} [P_3(\delta) + P_4(\delta)]f(\delta)d\delta, \quad (5)$$

$$Q = \int_0^{\infty} P_5(\delta)f(\delta)d\delta,$$

где  $f(\delta)$  — плотность вероятности распределения размеров частиц пыли, характеризуемая дифференциальной кривой распределения.

Из (5) следует, что замена обычных схем очистки на КСО представляет оптимизацию процесса пылеулавливания, если в результате вычислений справедливо равенство

$$\int_0^{\infty} [P_{33}(\delta) + P_{44}(\delta)]f(\delta)d\delta < F. \quad (6)$$

**Результаты.** Формулы (3)...(6) представляют конечный результат процесса пылеулавливания, но не отражают динамику накопления пыли в уловителях. Чтобы получить оценку состояния системы в любой момент времени, вводятся потоки вероятностей, вычисленные на основе вероятностей перехода. Тогда графу состояний соответствует система уравнений Колмогорова

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_1}{dt} &= -a_{12}P_1 + a_{41}P_4 \\ \frac{dP_2}{dt} &= a_{12}P_1 - (a_{23} + a_{24})P_2 \\ \sum_{i=1}^5 P_i(t) &= 1 \\ \frac{dP_3}{dt} &= a_{23}P_2 + a_{35}P_4 \\ \frac{dP_4}{dt} &= a_{24}P_2 + a_{41}P_4 \\ \frac{dP_5}{dt} &= a_{35}P_3 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

при начальных условиях

$$P_1(0) = 1; P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = P_5(0) = 0.$$

Значение коэффициентов  $a_{ik}$  выражаются через вероятности перехода на основе трех постоянных:

- коэффициента улавливания основного пылеуловителя  $P_{33} = a$ ;
- коэффициента улавливания аппарата циркуляционного контура  $P_{44} = \beta$ ;
- коэффициента разделения  $P_{23} = \gamma$ .

Эти три параметра определяют все коэффициенты в (7)

$$a_{12} = 1; a_{23} = \gamma; a_{35} = \gamma(1 - a); a_{23} + a_{24} = 1; a_{24} = 1 - \gamma;$$

$$a_{41} = (1 - \beta)(1 - \gamma).$$

Теперь уравнение (7) принимает вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_1}{dt} &= -P_1 + a_{41}P_4 \\ \frac{dP_2}{dt} &= P_1 - P_2 \\ \frac{dP_3}{dt} &= \gamma P_2 + a_{35}P_3 \\ \frac{dP_4}{dt} &= (1-\gamma)P_2 - (1-\beta)(1-\gamma)P_4 \\ \frac{dP_5}{dt} &= a_{35}P_3 \end{aligned} \right\}. \quad (8)$$

Матрица системы уравнений (8)

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & a_{41} & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma & -a_{53} & 0 & 0 \\ 0 & 1-\gamma & 0 & -a_{41} & 0 \\ 0 & 0 & a_{53} & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

где  $a_{35} = \gamma(1-a)$ ;

$a_{41} = (1-\beta)(1-\gamma)$ .

Этой матрице соответствует характеристическое уравнение

$$\begin{vmatrix} -(1+\lambda) & 0 & 0 & a_{41} & 0 \\ 1 & -(1+\lambda) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma & -(a_{53}+\lambda) & 0 & 0 \\ 0 & 1-\gamma & 0 & -(a_{41}+\lambda) & 0 \\ 0 & 0 & a_{53} & 0 & -\lambda \end{vmatrix} = 0.$$

После упрощений

$$\lambda(a_{35} + \lambda)[\lambda^3 + (a_{41} + 2)\lambda^2 + (2a_{41} + 1)\lambda + (2 - \gamma)a_{41}] = 0. \quad (9)$$

Первые два его корня очевидны:

$$\lambda_1 = 0; \quad \lambda_2 = -a_{35}.$$

Три других корня находятся из решения уравнения

$$\lambda^3 + (a_{41} + 2)\lambda^2 + (2a_{41} + 1)\lambda + (2 - \gamma)a_{41} = 0. \quad (10)$$

Проверим условия расположения всех корней уравнения (10) в левой полуплоскости комплексного переменного:

$$a_1 > 0; \quad \begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_1 \end{vmatrix} > 0;$$

$$a_0 = (2 - \gamma)a_{41} = (2 - \gamma)(1 - \beta)(1 - \gamma);$$

$$a_1 = (2a_{41} + 1) = 2(1 - \beta)(1 - \gamma) + 1;$$

$$a_2 = a_{41} + 2 = (1 - \beta)(1 - \gamma) + 2;$$

$$a_3 = 1.$$

Так как  $P_1(\delta)$   $\beta < 1$  и  $\gamma < 1$ , то условие  $a_1 > 0$  выполняется.

Далее имеем

$$\begin{vmatrix} a_1 & a_0 \\ a_3 & a_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2(1-\beta)(1-\gamma)+1 & (2-\gamma)(1-\beta)(1-\gamma) \\ 1 & (1-\beta)(1-\gamma)+2 \end{vmatrix} = (1-\beta) \times \\ \times (1-\gamma)[2(1-\beta)(1-\gamma)+\gamma+3] > 0.$$

На основании теоремы Гурвица приходим к выводу, что все корни лежат в левой полуплоскости комплексного переменного.

Решения уравнения (9) могут иметь два случая: все корни действительны; три корня действительны и два комплексно сопряжены.

В первом случае частные решения системы уравнений Колмогорова имеют вид

$$P_{ik}(t) = A_{ik} e^{\lambda_k t}.$$

Для корня  $\lambda_1 = 0$  система уравнений относительно  $A_i$  имеет вид

$$-A_1 + A_4 = 0; \quad \gamma A_2 - a_{35} A_3 = 0; \quad A_1 - A_2 = 0; \quad (1-\gamma)A_2 - a_{41} A_4 = 0.$$

Принимая

$$A_1 = A_2 = C_1; \quad A_3 = \frac{\gamma}{a_{35}} C_1,$$

частные решения для корня  $\lambda_1 = 0$

$$P_1(t) = P_2(t) = P_4(t) = C_1; \quad P_3(t) = \frac{\gamma}{a_{35}} C_1; \quad P_5(t) = 0.$$

Для корня  $\lambda_2 = -a_{35}$  система уравнений относительно  $A_i$  имеет вид

$$\left. \begin{aligned} -(1-a_{35})A_1 + a_{41}A_4 &= 0; & (1-\gamma)A_2 + (a_{41}-a_{35})A_4 &= 0 \\ A_1 - (1-\lambda_i)A_2 &= 0; & (1-\gamma)A_2 - (a_{41}+\lambda_i)A_4 &= 0 \end{aligned} \right\}$$

$$a_{35}A_3 - \lambda_i A_5 = 0; \quad i = 3; 4; 5.,$$

Принимая  $A_5 = C_i$ , частные решения

$$P_1(t) = \frac{\lambda_i(1+\lambda_i)(a_{35}+\lambda_i)}{\gamma a_{35}} C_i e^{\lambda_i t}; \quad P_2(t) = \frac{\lambda_i(a_{35}+\lambda_i)}{\gamma a_{35}} C_i e^{\lambda_i t};$$

$$P_3(t) = \frac{\lambda_i}{a_{35}} C_i e^{\lambda_i t}; \quad P_4(t) = \frac{\lambda_i(1+\lambda_i)^2(a_{35}+\lambda_i)}{\gamma a_{35} a_{41}} C_i e^{\lambda_i t}; \quad P_5(t) = C_i e^{\lambda_i t}.$$

Общее решение равно сумме частных решений, т.е.

$$\left. \begin{aligned} P_1(t) &= C_1 + \sum_{i=3;4;5} \frac{\lambda_i(1+\lambda_i)(a_{35}+\lambda_i)}{\gamma a_{35}} C_i e^{\lambda_i t} \\ P_2(t) &= C_1 + \sum_{i=3;4;5} \frac{\lambda_i(a_{35}+\lambda_i)}{\gamma a_{35}} C_i e^{\lambda_i t} \\ P_3(t) &= \frac{\gamma}{a_{35}} C_1 - C_2 e^{-a_{35}t} + \sum_{i=3;4;5} \frac{\lambda_i}{a_{35}} C_i e^{\lambda_i t} \\ P_4(t) &= C_1 + \sum_{i=3;4;5} \frac{\lambda_i(1+\lambda_i)^2(a_{35}+\lambda_i)}{\gamma a_{35} a_{41}} C_i e^{\lambda_i t} \\ P_5(t) &= C_2 e^{-a_{35}t} + \sum_{i=3;4;5} C_i e^{\lambda_i t} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Учитывая начальные условия, система относительно неизвестных коэффициентов в (11) записывается как

$$\begin{aligned} C_1 + \frac{\lambda_3(i + \lambda_3)(a_{35} + \lambda_3)}{\gamma a_{35}} C_3 + \frac{\lambda_4(i + \lambda_4)(a_{35} + \lambda_4)}{\gamma a_{35}} C_4 + \frac{\lambda_5(i + \lambda_5)(a_{35} + \lambda_5)}{\gamma a_{35}} C_5 &= 1, \\ C_1 + \frac{\lambda_3(a_{35} + \lambda_3)}{\gamma a_{35}} C_3 + \frac{\lambda_4(a_{35} + \lambda_4)}{\gamma a_{35}} C_4 + \frac{\lambda_5(a_{35} + \lambda_5)}{\gamma a_{35}} C_5 &= 0, \\ \frac{\gamma}{a_{35}} C_1 - C_2 + \frac{\lambda_3}{a_{35}} C_3 + \frac{\lambda_4}{a_{35}} C_4 + \frac{\lambda_5}{a_{35}} C_5 &= 0, \\ C_1 + \frac{\lambda_3(i + \lambda_3)(a_{35} + \lambda_3)}{\gamma a_{35} a_{41}} C_3 + \frac{\lambda_4(i + \lambda_4)(a_{35} + \lambda_4)}{\gamma a_{35} a_{41}} C_4 + \frac{\lambda_5(i + \lambda_5)(a_{35} + \lambda_5)}{\gamma a_{35} a_{41}} C_5 &= 0, \\ C_2 + C_3 + C_4 + C_5 &= 0. \end{aligned}$$

Эта система неоднородна и имеет нетривиальное решение. Таким образом получено решение (11) для заданных начальных условий.

Во втором случае

$$\begin{aligned} \lambda_4 &= r + i\omega, \\ \lambda_5 &= r - i\omega. \end{aligned}$$

Частные решения имеют вид

$$\begin{aligned} P_1(t) &= e^{rt} (a_1 \cos \omega t + a_1 \sin \omega t); \\ P_2(t) &= e^{rt} (a_2 \cos \omega t + a_2 \sin \omega t); \\ P_3(t) &= e^{rt} (a_3 \cos \omega t + a_3 \sin \omega t); \\ P_4(t) &= e^{rt} (a_4 \cos \omega t + a_4 \sin \omega t); \\ P_5(t) &= e^{rt} (a_5 \cos \omega t + a_5 \sin \omega t). \end{aligned}$$

После подстановки этих равенств в (8), сокращения на  $e^{rt}$  и группировки коэффициентов при  $\cos \omega t$  и  $\sin \omega t$  получим систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} (r + 1)a_1 - a_{41}a_4 + \omega b_1 &= 0 \\ \gamma a_2 - (a_{35} + r)a_3 - \omega b_3 &= 0 \\ (1 - \gamma)a_2 - (a_{41} + r)a_4 - \omega b_4 &= 0 \\ \omega a_1 + a_{41}b_4 - (r + 1)b_1 &= 0 \\ \omega a_3 + \gamma b_2 - (a_{35} + r)b_3 &= 0 \\ \omega a_4 + (1 - \gamma)b_2 - (a_{41} + r)b_4 &= 0 \\ a_{35}a_3 &= ar + b\omega \\ a_{35}a_3 &= br - a\omega \end{aligned} \right\}.$$

Решение этой системы имеет два параметра:  $a_1 = \frac{D_1}{D_0}$  и  $a_2 = \frac{D_2}{D_0}$ ;

$$\begin{aligned} D_0 &= \begin{vmatrix} r+1 & \omega \\ \omega & -(r+1) \end{vmatrix}; & D_1 &= \begin{vmatrix} \frac{a_{41}d_1}{d_0} & \omega \\ -\frac{a_{41}d_2}{d_0} & -(r+1) \end{vmatrix}; \\ D_2 &= \begin{vmatrix} r+1 & \frac{a_{41}d_1}{d_0} \\ \omega & -\frac{a_{41}d_2}{d_0} \end{vmatrix}; & D_0 &= \begin{vmatrix} a_{41} + r & \omega \\ \omega & -(a_{41} + r) \end{vmatrix}; \end{aligned}$$

$$D_1 = \begin{vmatrix} (1-\gamma) & \omega \\ -(1-\gamma) & -(a_{41}+r) \end{vmatrix}; \quad D_2 = \begin{vmatrix} a_{41}+r & 1-\gamma \\ \omega & -(1-\gamma) \end{vmatrix};$$

$$a_2 = \frac{\omega(br - a\omega) + (ar + b\omega)(a_{35} + r)}{a_{35}\gamma};$$

$$b_2 = \frac{(a_{35} + \omega)(br + a\omega) - \omega(ar + b\omega)}{a_{35}\gamma};$$

$$a_3 = \frac{ar + b\omega}{a_{35}}; \quad b_3 = \frac{br - a\omega}{a_{35}};$$

$$a_4 = \frac{d_1}{d_0}; \quad b_4 = \frac{d_2}{d_0}.$$

Общее решение системы (8) для второго случая распределения корней характеристического уравнения

$$\left. \begin{aligned} P_1(t) &= C_1 + \frac{\lambda_3(1+\lambda_3)(a_{35}+\lambda_3)}{\gamma a_{35}} C_3 e^{\lambda_3 t} + e^{rt} (a_1 \cos \omega t + a_1 \sin \omega t) \\ P_2(t) &= C_1 + \frac{\lambda_3(a_{35}+\lambda_3)}{\gamma a_{35}} C_3 e^{\lambda_3 t} + e^{rt} (a_2 \cos \omega t + a_2 \sin \omega t) \\ P_3(t) &= \frac{\gamma}{a_{35}} C_1 - C_2 e^{-a_{35}t} + \frac{\lambda_3}{a_{35}} C_3 e^{\lambda_3 t} + e^{rt} (a_3 \cos \omega t + a_3 \sin \omega t) \\ P_4(t) &= C_1 + \frac{\lambda_3(1+\lambda_3)^2(a_{35}+\lambda_3)}{\gamma a_{35} a_{41}} C_3 e^{\lambda_3 t} + e^{rt} (a_4 \cos \omega t + a_4 \sin \omega t) \\ P_5(t) &= C_2 e^{-a_{35}t} + C_3 e^{\lambda_3 t} + e^{rt} (a_5 \cos \omega t + a_5 \sin \omega t) \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Постоянные  $C_1, C_2, C_3, a, b$  определяются из начальных условий

$$P_1(0) = 1; \quad P_2(0) = P_3(0) = P_4(0) = P_5(0) = 0.$$

**Выводы.** Решения (11)...(12) полностью определяют распределение пыли в комбинированной системе газоочистки в любой момент времени и дают принципиальную возможность прогнозировать динамику меняющихся показателей КСО. При этом парциальные эффективности уловителей рассчитываются согласно общепринятым методикам, а парциальная эффективность разделителя — согласно [4].

### Литература

1. Бутенко, А.Г. Комбинированная система очистки воздуха / А.Г. Бутенко, С.Ю. Смык // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2010. — № 6. — С. 66 — 69.
2. Булинский, А.В. Теория случайных процессов [Текст] / А.В. Булинский, А.Н. Ширяев. — М.; СПб.: Физматлит, 2003. — 400 с.
3. Кельберт, М.Я. Вероятность и статистика в примерах и задачах. Т. 2: Марковские цепи как отправная точка теории случайных процессов и их приложения / М.Я. Кельберт, Ю.М. Сухов. — М.: Изд-во МЦНМО, 2010. — 559 с.
4. Бутенко, А.Г. Разделение твердой фазы полидисперсного потока по фракциям в комбинированной системе очистки / А.Г. Бутенко, С.Ю. Смык, Д.А. Мовила // Экология и промышленность. — 2009. — № 4. — С. 74 — 76.

## References

1. Butenko, A.G. Kombinirovannaya sistema ochistki vozdukha [Combined air cleaning system] / A.G. Butenko, S.Yu. Smyk // *Energotekhnologii i resursosberezhenie [Energy Technologies and Resource Saving]*. — 2010. — # 6. — pp. 66 — 69. (in Russian)
2. Bulinski, A.V. Teoriya sluchainykh processov [Tekst] [Theory of Stochastic Processes [Text]] / A.V. Bulinski, A.N. Shiryayev. — M.; SPb.: FIZMATLIT, 2003. — 400 p. (in Russian)
3. Kelbert, M.Ya. Veroyatnost i statistika v primerah i zadachah. Tom 2. Markovskie tsepi kak otpravnyaya tochka teorii sluchaynykh protsessov i ikh prilozheniya [Tekst] [Probability and statistics by example. Vol. 2: Markov chains a starting point in random processes theory and their applications [Text]] / Yu.M. Suhov, M.Ya. Kelbert. — M.: MTsNMO, 2010. — 559 p. (in Russian)
4. Butenko, A.G. Razdelenie tverdoi fazy polidispersnogo potoka po fraktsiyam v kombinirovannoi sisteme ochistki [Separation of the solid phase of a polydisperse flow fractions in the combined treatment system] / A.G. Butenko, S.Yu. Smyk, D.A. Movyla // *Ekologiya i promyshlennost' [Ecology & Industry]*. — 2009. — # 4. — pp 74 — 76. (in Russian)

## АНОТАЦІЯ / АННОТАЦИЯ / ABSTRACT

*В.Я. Гамоліч, О.Г. Бутенко, С. Ю. Смик.* **Ймовірнісна модель комбінованої системи очищення повітря.** У комбінованій системі очищення аспіраційного повітря від полідисперсного пилу реалізується метод перерозподілу пилової маси за фракційним складом. На основний уловлювач поступає крупнофракційний пил, завдяки чому ефективність очищення істотно збільшується, а просакування в атмосферу знижується. Дрібнофракційний пил уловлюється в апараті циркуляційного контура. Відрізняючою особливістю комбінованої системи очищення є наявність двох режимів роботи — режиму очищення і режиму вибігання. Під час режиму вибігання повітряний потік очищується від дрібнофракційного пилу, що раніше накопичений в циркуляційному контурі. У зв'язку з цим основний показник системи очищення — ефективність уловлювання — змінюється в часі. Прогнозування характеру зміни цієї величини — важливе завдання, що вирішується на стадії проектування системи очищення. Завдання вирішене шляхом використання теорії марківських ланцюгів. Сформульовано умови доцільності заміни прямооточної системи знепилювання на комбіновану, і отримано модель, що описує динаміку показників системи в часі.

*Ключові слова:* комбінована система очищення, марківські ланцюги, розподіл пилу.

*В.Я. Гамоліч, А.Г. Бутенко, С.Ю. Смик.* **Вероятностная модель комбинированной системы очистки воздуха.** В комбинированной системе очистки аспирационного воздуха от полидисперсной пыли реализуется метод перераспределения пылевой массы по фракционному составу. На основной уловитель поступает крупнофракционная пыль, благодаря чему эффективность очистки существенно увеличивается, а проскок в атмосферу снижается. Мелкофракционная пыль улавливается в аппарате циркуляционного контура. Отличительной особенностью комбинированной системы очистки является наличие двух режимов работы — режима очистки и режима выбега. Во время режима выбега воздушный поток очищается от ранее накопленной в циркуляционном контуре мелкофракционной пыли. В связи с этим основной показатель системы очистки — эффективность улавливания — изменяется во времени. Прогнозирование характера изменения этой величины — важная задача, решаемая на стадии проектирования системы очистки. Задача решена путем использования теории марковских цепей. Сформулировано условие целесообразности замены прямооточной системы обеспыливания на комбинированную, и получена модель, описывающая динамику показателей системы во времени.

*Ключевые слова:* комбинированная система очистки, марковские цепи, распределение пыли.

*V.Ya. Gamolich, A.G. Butenko, S.Yu. Smyk.* **Probabilistic model for combined air purification system.** In the combined cleaning system aspirating air from polydisperse dust implemented method for redistributing the dust mass fraction composition. On the main dust collector receives major factions. Due to this the cleaning efficiency is significantly increased, and leakage to the atmosphere is reduced. Dust fines trapped in the apparatus of the circulation circuit. A distinctive feature of the combined cleaning system is the presence of two modes of operation — cleaning mode and idle mode. During idling airflow cleared of previously accumulated in the circulation circuit of small fraction of dust. In this regard, the main indicators of the cleaning system — collection efficiency changes over time. Prediction of changes in these quantities — an important problem to be solved at the design stage cleaning system. The problem is solved by using the theory of Markov chains. Formulated a condition feasibility replacement ramjet dedusting system and obtained a combined model describing the dynamics of the system over time.

*Keywords:* the combined system of clearing, Markov chains, catching degree.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Буров А.И.

Поступила в редакцию 25 апреля 2014 г.