

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА СЛУЧАЕВ ПРЕВЫШЕНИЯ ЗАДАВАЕМОЙ ВЕЛИЧИНЫ ПЫЛЕВОГО ВЫБРОСА ИЗ ВЕНТИЛЯЦИОННОГО СТВОЛА УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ

В.Е. Колесник, А.В. Павличенко, Ю.В. Бучавый, Национальный горный университет, Украина

Проанализировано динамические показатели пылевого выброса из вентиляционного ствола и возможность их оценки на основе данных о суточной производительности угольной шахты. По выборочной реализации случайного процесса суточной производительности шахты на месячном интервале предложено определять динамические показатели пылевого выброса из вентиляционного ствола. Выполнен прогноз степени экологической опасности динамично меняющегося пылевого выброса из вентиляционного ствола угольной шахты.

Угольные шахты выбрасывают из вентиляционных стволов значительное количество угольно-породной пыли, которая рассеивается в приземном слое атмосферы и способна покрыть значительные территории, загрязняя воздух, почву и водоемы, снижая экологическую безопасность в регионе.

Интенсивность пылевого выброса на разных шахтах обычно изменяется от 20 до 100 г/с. Нетрудно подсчитать, что в среднем за сутки выбрасывается около 5,2 т пыли. Таким образом, за год в атмосферу выбрасывается около 1900 т горной породы, в состав которой входят сульфиды и некоторые тяжелые металлы, наносящие вред здоровью населения и способствующие деградации почв [1].

Валовой выброс пыли в атмосферу через главный ствол шахты рассчитываются в тоннах за год по отраслевой методике [2], значение которого используется для оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха по стандартизованной методике ОНД-86 [3]. Однако, согласно действующим санитарным правилам [4], помимо кратности превышения показателей загрязнения (ПЗ) над их нормативными значениями (ПДЗ) и соответствующего уровня и степени загрязнения, требуется определение процента случаев превышения ПДЗ (табл. 1).

Таблица 1 – Оценки уровня загрязнения атмосферного воздуха, согласно действующим санитарным правилам [4]

Уровень загрязнения	Степень опасности	Кратность превышения ПДЗ	Процент случаев превышения ПДЗ
Допустимый	Безопасный	< 1	0
Недопустимый	Слабо опасный	> 1 – 2	> 0 – 4
Недопустимый	Умерено опасный	> 2 – 4,4	> 4 – 10
Недопустимый	Опасный	> 4,4 – 8	> 10 – 25
Недопустимый	Очень опасный	> 8	> 25

Следует отметить, что выполняемые оценки с использованием среднегодовых значений концентрации пыли, рассчитанных по методикам [2, 3], не отвечают в полной мере требованиям методики [4], поскольку нельзя оценить процент случаев превышения ПДЗ, не имея данных о фактической посуточной динамике пылевых выбросов, изменяющихся день ото дня в довольно широких пределах. Поэтому необходимо определять недостающий динамический показатель на основе использования альтернативного по отношению к выбросу пыли динамического показателя – производительности шахты, как минимум, на месячном интервале.

Для решения поставленной задачи проанализируем правомочность использования упомянутого показателя. Обратимся к методике [2], согласно которой валовой выброс твердых частиц из вентиляционного ствола шахты рассчитывается в тоннах за год по формуле:

$$E_j = 8,64 \cdot 10^{-5} \cdot \bar{V}_j D_\phi \left[\left(\bar{C}_o + 0,28 K_1 q \frac{A_\Pi}{Q_{\text{эж}}} \right) K_2 + 0,28 K_1 q Q_n \frac{A_\Pi}{Q_{\text{эж}} \bar{V}_j} \right], \quad (1)$$

где D_ϕ – время фактической работы шахты в течение года в сутках; V_j – средний расход воздуха, который выбрасывается в атмосферу через ствол, м³/с; \bar{C}_o – средняя запыленность воздуха возле ствола на вентиляционном горизонте, мг/м³; K_1 – коэффициент, который учитывает наличие подъема горной массы в стволе (0 – в случае отсутствия подъема или с подъемом горной массы опрокидными клетями или 1 – в случае подъема горной массы скипами); K_2 – коэффициент, который учитывает осаждение пыли в вентиляционном стволе; q – удельное пылевыведение при загрузке или разгрузке горной массы, г/т; A_Π – интенсивность загрузки или разгрузки горной массы, т/час, а $Q_{\text{эж}}$ – количество воздуха, который при этом эжектируется, м³/с; Q_n – количество подсосываемого воздуха в надшахтном помещении, м³/с. (перечисленные параметры определяются согласно указаниям раздела 7 упомянутой методики).

В случае выброса пыли из ствола, оборудованного скиповым подъемом, $K_1=1$, поэтому для последующего анализа выражение (1) удобно представить в виде:

$$E_j = 8,64 \cdot 10^{-5} \cdot \bar{V}_j D_\phi \left[\bar{C}_o K_2 + 0,28 A_\Pi \frac{q}{Q_{\text{эж}}} \left(K_2 + \frac{Q_n}{\bar{V}_j} \right) \right] \quad (2)$$

Согласно этой модели пылевой выброс условно представляется двумя составляющими. Одна из них обусловлена выносом пыли из горных выработок, расположенных на действующих подземных горизонтах, а другая – работой погрузочно-разгрузочного комплекса угля и породы в околоствольном дворе и копре шахты. Причем в квадратных скобках имеем сумму соответствующих составляющих запыленности воздуха, который выбрасывается непосредственно из ствола шахты в атмосферу.

Анализ представленных моделей показал, что в условиях конкретной шахты, в частности, оборудованной скиповым подъемом, только динамично изменяющийся параметр АП однозначно пропорционален пылевому выбросу из ствола и, что важно, контролируется и регистрируется ежесуточно. Поэтому его относительные посуточные изменения на месячном интервале позволят оценить изменчивость пылевого выброса относительно его среднего значения, рассчитываемого по формулам (1) или (2).

В качестве примера проанализируем типичный динамический ряд (рис. 1), характеризующий посуточную добычу угля («Уголь Украины», июнь 2003, с. 40).

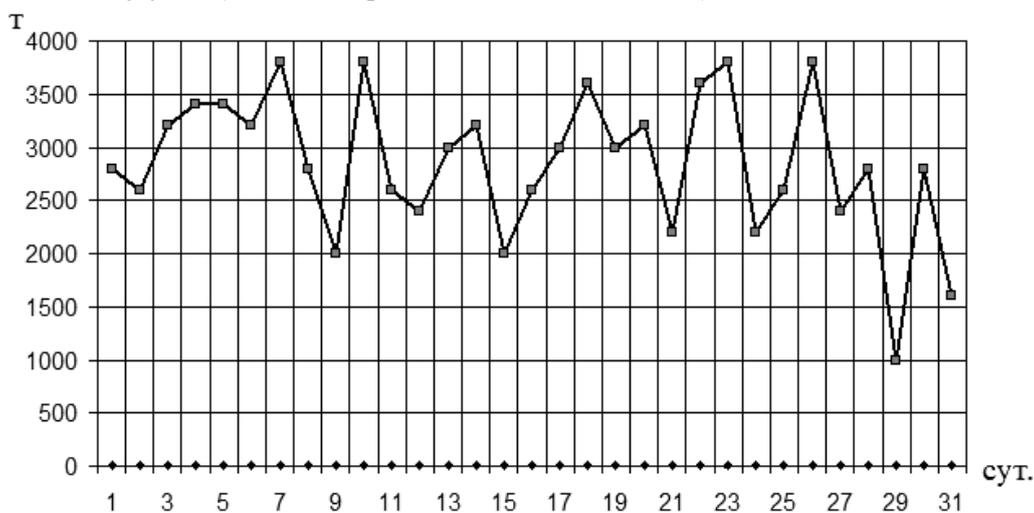


Рис. 1. Типичный динамический ряд посуточной производительности угольной шахты на месячном интервале

Представленный на рис. 1 динамический ряд указывает на то, что производительность шахты действительно существенно зависит от случайных факторов, т.е. носит стохастический характер. Причем нередко случаи превышения средних значений производительности в 1,5-2 раза, а значит таких же превышений пылевого выбросов в атмосферу из ствола шахты, относительно расчетного среднего значения

Представленный ряд является выборочной реализацией случайного процесса производительности на месячном интервале. Наличие такой реализации позволяет определить динамические показатели пылевого выброса из ствола угольной шахты, с использованием известных решений математической «задачи о выбросах случайного процесса за установленный уровень» [5] (впервые задача решалась Райсом в 1944 – 1945 гг), интегралы которой в каждом конкретном случае позволяют рассчитать вероятностные характеристики выхода случайного процесса за пределы заданного уровня. Так, можно определить среднее время пребывания стационарной случайной функции выше заданного уровня a на интервале T :

$$\bar{t}_a = T \int_a^{\infty} f(x) dx. \quad (3)$$

Кроме того, среднее число выходов за указанный предел на том же промежутке времени:

$$\bar{n}_a = T \int_0^{\infty} \nu f(a, \nu) d\nu \quad (4)$$

и среднюю длительность пребывания процесса выше заданного уровня:

$$\bar{\tau} = \frac{\int_a^{\infty} f(x) dx}{\int_0^{\infty} \nu f(a, \nu) d\nu}. \quad (5)$$

Для стационарных процессов дополнительно может быть определено среднее число выбросов в единицу времени – $\bar{\nu}_a$, которое не зависит от T , из очевидного условия:

$$\bar{\nu}_a = \frac{\bar{n}_a}{T},$$

В результате,

$$\bar{\nu}_a = \int_0^{\infty} \nu f(a, \nu) d\nu. \quad (6)$$

Поскольку формулы содержат плотности вероятности для стационарного процесса $f(x)$ и $f(x, \nu)$, то для вычисления значений упомянутых интегралов необходимо располагать этими плотностями.

При нормальном законе распределения ординат случайной функции плотность их распределения однозначно выражается через математическое ожидание (\bar{x}) случайной функции и дисперсию ее значений:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (7)$$

причем значение дисперсии численно равно значению автокорреляционной функции случайного процесса в точке (0), т.е. $\sigma_x^2 = K_x(0)$.

Как показано в [5], двумерная плотность распределения вероятности $f(x, \nu)$ распадается на произведение нормальных плотностей распределения для случайных величин $X(t)$ и $V(t)$, которое можно записать в виде:

$$f(x, v) = \frac{1}{\sigma_x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}} \times \frac{1}{\sigma_v \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{v^2}{2\sigma_v^2}}, \quad (8)$$

где дисперсия скорости изменения ординаты случайной функции σ_v^2 равна значению корреляционной функции скорости случайного процесса в нуле, т.е.

$$\sigma_v^2 = K_v(0) = -\frac{d^2}{d\tau^2} K_x(\tau) \Big|_{\tau=0}, \quad (9)$$

а математическое ожидание $V(t)$, вследствие стационарности случайного процесса, равно нулю.

Подстановка (8) в (6) дает:

$$\bar{v}_a = \frac{\sigma_v}{2\pi\sigma_x} e^{-\frac{(a-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}}. \quad (10)$$

Аналогично, после подстановки в (5), получим среднюю длительность выхода случайного процесса за уровень a :

$$\bar{\tau} = \pi \frac{\sigma_x}{\sigma_v} e^{-\frac{(a-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}} \left[1 - \Phi\left(\frac{a-\bar{x}}{\sigma_x}\right) \right], \quad (11)$$

где $\Phi(x)$ – интегральная функция Лапласа.

В частном случае, когда $a = \bar{x}$, т.е. определяется средняя длительность превышения среднего значения функции случайного процесса, последняя формула упрощается:

$$\bar{\tau} = \pi \frac{\sigma_x}{\sigma_v} = \pi \sqrt{-\frac{K_x(\tau)}{\ddot{K}_x(\tau)} \Big|_{\tau=0}}, \quad (12)$$

где фигурируют значения дисперсии случайного процесса и его скорости, т.е. фактически значения автокорреляционной функции процесса $K_x(\tau)$ и ее второй производной $\ddot{K}_x(\tau)$ в «нуле».

Наконец, после подстановки (7) в (3) получим интеграл для вычисления среднего времени пребывания стационарной случайной функции выше заданного уровня a на интервале времени T :

$$\bar{t}_a = T \frac{1}{2} \left[1 - \Phi\left(\frac{a-\bar{x}}{\sigma_x}\right) \right] \quad (13)$$

Теперь получим статистические величины, характеризующие динамику выхода производительности шахты, а значит и пылевого выброса, за установленный уровень.

Предварительно по данным графика, представленного на рис. 1, вычислим автокорреляционную функцию этого процесса по оценочной формуле

$$K_x(\tau) = \frac{1}{n-\tau} \sum_{i=1}^{n-\tau} (x_i - \bar{x})(x_{i-\tau} - \bar{x}),$$

где τ – сдвиг времени, равный 1, 2, 3, ...; x_i – суточная производительность шахты, т/сут.

Начальный фрагмент нормированной автокорреляционной функции представлен рис. 2.

Для решения поставленной задачи необходимо иметь наиболее точное аналитическое выражение автокорреляционной функции рассматриваемого процесса на ее начальном интервале. Это обусловлено тем, что требуется определять дисперсию скорости изменения случайной функции по второй производной от $K_x(\tau)$ в нулевой точке. Поэтому, с учетом вида полученного нормированного графика, выполним аппроксимацию начального падающего участка автокорреляционной функции по ее значениям в точках 0; 1 и 2, выбрав для этого уравнение экспоненты общего вида. В результате, получим аналитическое выражение автокорреляционной функции случайного процесса производительности шахты в виде:

$$K_x(\tau) = \sigma_x^2 (b_0 + b_1 e^{b_2 \tau}), \quad (14)$$

где σ_x^2 – дисперсия; $b_0=-0,168$; $b_1=1,168$; $b_2=-2,48$ – значения коэффициентов, рассчитанные методом наименьших квадратов с подбором коэффициента b_2 для минимизации погрешности аппроксимации на падающем участке.

В таком случае

$$\ddot{K}_x(\tau) = K_v(\tau) = -\sigma_x^2 b_1 (b_2)^2 e^{b_2 \tau}. \quad (15)$$

Теперь, считая процесс изменения производительности шахты нормальным, определим на интервале $T=30$ сут. динамические показатели выхода ее величины за пределы, например, $a=3500$ т/сут., если среднее значение производительности по данным рис. 1 составило $\bar{x}=2893,3$ т/сут., а дисперсия $\sigma_x^2 = 407288,9$ ($\sigma_x = 638,19$ т/сут.).

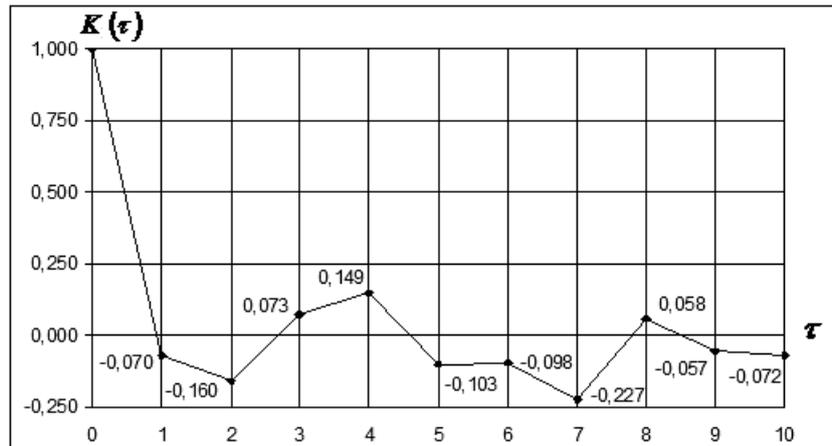


Рис. 2. Нормированная автокорреляционная функция распределения производительности шахты (а, значит, и пылевого выброса)

Вычислим дисперсию скорости изменения случайной функции, с учетом (9) и (15). Получим:

$$\sigma_v^2 = K_v(0) = -\frac{d^2}{d\tau^2} K_x(\tau) \Big|_{\tau=0} = \sigma_x^2 (b_1 b_2^2) = 407288,9 (1,168 (2,48)^2) = 2925828 \quad (\sigma_v = 1710,5).$$

Рассчитаем среднее число превышений уровня a в сутки по формуле (10):

$$\bar{v}_a = \frac{\sigma_v}{2\pi\sigma_x} e^{-\frac{(a-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}} = \frac{1710,5}{2 \cdot 3,14 \cdot 638,192} e^{-\frac{(3500-2893,3)^2}{2 \cdot 407288,9}} = 0,2716, \text{ сут}^{-1}.$$

С учетом этого значения, число бросков случайного процесса за уровень 3500 т/сут. в течение 30 дней составит:

$$\bar{n}_a = T \bar{v}_a = 30 \times 0,2716 = 8,148 \text{ раз.}$$

Среднюю длительность «выброса производительности» за уровень $a=3500$ т/сут. определим как

$$\bar{\tau} = \pi \frac{\sigma_x}{\sigma_v} e^{\frac{(a-\bar{x})^2}{2\sigma_x^2}} \left[1 - \Phi\left(\frac{a-\bar{x}}{\sigma_x}\right) \right] = 3,14 \frac{638,192}{1710,5} e^{\frac{(3500-2893,3)^2}{2 \cdot 407288,9}} \left[1 - \Phi\left(\frac{3500-2893,3}{638,192}\right) \right] \approx 1,3376 \text{ сут.}$$

В результате, среднее время пребывания случайного процесса производительности выше заданного уровня 3500 т/сут. на месячном интервале составило:

$$\bar{t}_a = \bar{n}_a \bar{\tau} = 8,148 \times 1,3376 \approx 10,9 \text{ сут.}$$

Для сопоставления эту же величину можно получить непосредственным решением интеграла (3), с использованием формулы (14), а именно:

$$\bar{t}_a = T \frac{1}{2} \left[1 - \Phi\left(\frac{a-\bar{x}}{\sigma_x}\right) \right] = 30 \times 0,5 \times \left[1 - \Phi\left(\frac{3500-2893,3}{638,192}\right) \right] = 30 \times 0,5 \times [1 - \Phi(0,95065)] \approx 10,1 \text{ сут.}$$

Получен близкий результат, что указывает на правильность предыдущих расчетов. В то же время, число бросков случайного процесса за уровень 3500 т/сут, судя по графику на рис.1, несколько завышен (примерно 8 раз, против 5 раз на графике). Это можно пояснить некоторым отклонением представленной реализации случайного процесса от стационарного нормального закона распределения, а также неточностями в оценке корреляционной функции и определении коэффициентов ее аналитической модели по выборочным данным.

В целом, учитывая вероятностный характер полученных результатов, их все же можно использовать для оценок динамики пылевых выбросов. В частности, при среднем выбросе пыли из ствола шахты 60 г/с уровень производительности 3500 т/с будет соответствовать интенсивности пылевого выброса 72,6 г/с. Этот уровень будет превышен, в среднем 8 раз в месяц, а общее время превышения составит, примерно 10 суток, т.е., около 33 % времени работы шахты.

В заключение отметим что, приведенные расчеты вероятностных характеристик вполне можно использовать для прогноза степени экологической опасности динамически меняющегося пылевого выброса из вентиляционного ствола угольной шахты.

Выводы. Наряду со стандартизованной оценкой валового выброса твердых частиц (пыли) из вентиляционного ствола угольной шахты, по которой производится оценка уровня загрязнения атмосферного воздуха и степени его опасности, должны определяться частоты превышения нормативных значений и другие динамические показатели пылевого выброса, что требует дополнительной посуточной информации об его изменчивости.

Анализ динамического ряда производительности угольной шахты на месячном интервале показал ее стохастический характер. Наличие такого ряда позволяет определить недостающие динамические показатели пылевого выброса из ствола угольной шахты на основе известных решений математической «задачи о выбросах случайного процесса за установленный уровень».

При решении поставленной задачи можно полагать, что случайная функция процесса изменения производительности шахты во времени, а значит и пылевого выброса, являются стационарной с плотностью распределения, близкой к нормальному закону при условии, что среди случайных горнотехнических факторов нет явно выраженных, в частности аварий или длительных простоев.

В результате вычисления известных интегралов упомянутой «задачи» на конкретном примере определены средние значения:

- времени пребывания случайной функции производительности шахты выше заданного уровня на заданном интервале времени;
- числа выходов функции за заданный уровень;
- длительности пребывания процесса выше упомянутого уровня;
- числа превышений заданного уровня в единицу времени.

Приведенные оценки предлагается использовать на практике для прогноза степени экологической опасности динамически меняющегося пылевого выброса из ствола угольной шахты.

Список литературы

1. Долгова Т.И. Оценка степени изменчивости почв при мониторинге их загрязнения на примере Днепропетровской области / Т.И. Долгова // Сб. научн. трудов НГА Украины. – 2001. – № 11. – Т.1. – С. 123-129.
2. СОУ 10.00174125.004-2004. Стандарт Мінпаливенерго України. Концентрація і об'єми шкідливих забруднюючих речовин (в тому числі газу метану), що викидається в атмосферу вугільними шахтами. Методика розрахунку. – К: Мінпаливенерго, 2004. – 28 с.
3. Методика расчета концентрации в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. ОНД-86. Госкомгидромет. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 94 с.
4. Государственные санитарные правила охраны атмосферного воздуха населенных мест (от загрязнения химическими и биологическими веществами). Введены МОЗ Украины 9.07.97. Приказ № 201.
5. Свешников А.А. Прикладные методы теории случайных функций, издание 2-е, переработанное и дополненное. – М.: Главная редакция физ-мат. литературы, 1968. – 457 с.