

## ОЦЕНКА УПРАВЛЕНИЯ ПРОВЕТРИВАНИЕМ УГОЛЬНЫХ ШАХТ С ПОМОЩЬЮ МЕТОДОВ СТАТИСТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ

И.И. Босиков<sup>1</sup>, Р.В. Ключев<sup>2</sup>, И.М. Ажмухамедов<sup>3</sup>, В.Ч. Ревазов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Северо-Кавказский горно-металлургический институт  
(государственный технологический университет), Владикавказ, Россия, e-mail: igor.boss.777@mail.ru

<sup>2</sup> Московский политехнический университет, Москва, Россия

<sup>3</sup> Астраханский государственный университет, Астрахань, Россия

**Аннотация:** Проветривание шахт состоит в своевременной подаче к местам работы в любой момент времени необходимого расхода воздуха, обеспечивающего нормальное протекание технологического процесса добычи полезных ископаемых и безопасные условия труда горнорабочих. Управление проветриванием шахт заключается как в разработке и в осуществлении долговременных (разовых) мероприятий в топологически и аэрогазодинамически стабильных условиях, так и в оперативном перераспределении расходов воздуха по выработкам вентиляционной сети в зависимости от отклонений контролируемых параметров от технологических нормативов, предусмотренных правилами безопасности (ПБ) и правилами технической эксплуатации (ПТЭ) шахт и рудников. Исследование проведено для оценки и анализа аэродинамических параметров управления воздушораспределением на угольных шахтах. Применялись методы статистической динамики, методы случайных функций, базирующиеся на определении корреляционных функций, теории множеств, фундаментальные законы аэродинамики рудников, теории графов и дискретной математики. Установлено, что для правильного выбора метода определения динамических характеристик по данным нормальной эксплуатации необходимо проверять аэрогазодинамические процессы на аддитивность, т.е. на наличие в аэрогазодинамических процессах составляющих, которые обуславливают появление «хвостов» корреляционных функций. Предложен способ значительно улучшить систему управления воздушораспределением при различных режимах в горных выработках с учетом особенностей сети вентиляции.

**Ключевые слова:** системы проветривания, угольная шахта, газовыделение, интегральные уравнения, добычный участок, концентрации метана, расход воздуха.

**Для цитирования:** Босиков И. И., Ключев Р. В., Ажмухамедов И. М., Ревазов В. Ч. Оценка управления проветриванием угольных шахт с помощью методов статистической динамики // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 11. – С. 123–135. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_11\_0\_123.

### Statistical dynamics-based estimation of ventilation control in coal mines

I.I. Bosikov<sup>1</sup>, R.V. Klyuev<sup>2</sup>, I.M. Azhmukhamedov<sup>3</sup>, V.Ch. Revazov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> North Caucasian Institute of Mining and Metallurgy (State Technological University),  
Vladikavkaz, Russia, e-mail: igor.boss.777@mail.ru

<sup>2</sup> Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia

<sup>3</sup> Astrakhan State University, Astrakhan, Russia

---

**Abstract:** Mine ventilation is intended to ensure sufficient air flow rates in working areas at any time to assure safe and normal duty of mining processes. Mine ventilation control consists in design and implementation of long-term (one-time) arrangements for the stable topology and gas dynamics conditions, and for the quick-look re-distribution of air flows in ventilation network branches subject to deviation of test parameters of mine air from the technology-based standards of mine safety and operational regulations. This research aims to analyze and estimate aerodynamic parameters of air distribution control in coal mines. The research uses the methods of statistical dynamics, correlation functions of random variables, theory of sets, basic laws of mine air dynamics, theory of graphs and discrete mathematics. A proper choice of the method to determine dynamic characteristics using the normal duty data requires checking additivity of gas-dynamic processes, i.e., it is required to find out whether the gas-dynamic processes contain components which give rise to correlation function tails. An approach is proposed to the air distribution control improvement in mine roadways with regard to ventilation network details.

**Key words:** ventilation systems, coal mines, gas emission, integral equations, extraction panel, methane concentration, air flow rate.

**For citation:** Bosikov I. I., Klyuev R. V., Azhmukhamedov I. M., Revazov V. Ch. Statistical dynamics-based estimation of ventilation control in coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(11):123-135. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_11\_0\_123.

---

## Введение

Под управлением проветриванием шахт подразумевается своевременная подача к местам работы в любой момент времени необходимого расхода воздуха, обеспечивающего нормальное протекание технологического процесса добычи полезных ископаемых и безопасные условия труда горнорабочих [1, 2].

Управление проветриванием шахт может заключаться как в разработке и в осуществлении долговременных (разовых) мероприятий в топологически и аэрогазодинамически стабильных условиях, так и в оперативном перераспределении расходов воздуха по разработкам вентиляционной сети в зависимости от отклонений контролируемых параметров от технологических нормативов, предусмотренных правилами безопасности (ПБ) и правилами технической эксплуатации (ПТЭ) шахт и рудников [3, 4].

В общем систему управления проветриванием можно рассматривать структурно как состоящую из управляющей системы и управляемого объекта. Между ними происходит непрерывный обмен информацией и ее переработка. При этом информация должна обрабатываться системой таким образом, чтобы предлагаемые управляющие воздействия (мероприятия) приводили к наиболее эффективному достижению цели управления при определенных ограничивающих условиях, накладываемых ПБ. В нашем случае управление состоит в том, чтобы осуществить нормальный технологический процесс добычи полезных ископаемых и поддержать состояние рудничной атмосферы, регламентированное ПБ для шахт и рудников. В качестве критерия эффективности управления проветриванием шахт может быть принята количественная характеристика газодинамических процессов

(математическое ожидание, среднеквадратичное отклонение и т.д.), минимальные затраты энергии на проветривание, а такие экономические показатели (минимум ущерба, максимум добычи) [5, 6].

### Теоретическая часть

При математическом описании динамики системы проветривания добычного участка шахты как объекта управления по газовому фактору широко используются методы статистической динамики [7–9]. Исходным экспериментальным материалом могут служить реализации процессов расхода воздуха  $Q(t)$  и концентрации метана  $C(t)$ , записанные в виде отклонений процессов от своих математических ожиданий:

$$C^\circ(t) = C(t) - C, \quad (1)$$

$$Q^\circ(t) = Q(t) - Q, \quad (2)$$

где  $C$ ,  $Q$  – математические ожидания процессов  $C(t)$  и  $Q(t)$ .

Ранее было установлено, что реализации процессов  $C^\circ(t)$  и  $Q^\circ(t)$  стационарны и эргодичны на интервалах наблюдения 3–5 сут.

Газодинамические процессы приобретают нестационарный характер при длительных интервалах наблюдения. Это подтверждается экспериментальными результатами [10, 11], полученными на угольных шахтах, и объясняется влиянием различных факторов при разработке угольных пластов.

Многочисленными исследованиями установлено, что производственные процессы добычных участков вызывают колебания аэрогазодинамических параметров [12, 13]. Изменения газовыделения в основном зависят от режима работы лавы (чередование добычных и ремонтных смен) и технологического цикла лавы выемки полезного компонента.

Изменения расхода воздуха в широких пределах объясняются тем, что существующая технология работ, пред-

полагающая последовательное выполнение всех операций очистного цикла, значительно изменяет аэродинамическое сопротивление добычного участка в течение технологического цикла (на 30–40%) [14].

На основании вышеизложенного процессы в отклонениях  $C^\circ(t)$  и  $Q^\circ(t)$  можно представить в виде:

$$C^\circ(t) = C_c^\circ(t) + C_k^\circ(t), \quad (3)$$

$$Q^\circ(t) = Q_c^\circ(t) + Q_k^\circ(t), \quad (4)$$

где  $C_c^\circ(t)$ ,  $Q_c^\circ(t)$  – случайные процессы концентрации метана и расхода воздуха;  $C_k^\circ(t)$ ,  $Q_k^\circ(t)$  – процессы концентрации метана и расхода воздуха, колебания которых обусловлены производственными процессами участка.

Для проверки правильности соотношений (3) и (4) используем методы случайных функций, базирующиеся на вычислении корреляционных функций. Подобный подход целесообразен тем, что позволяет не только решить поставленную задачу, но и использовать полученные статистические характеристики процессов  $C^\circ(t)$  и  $Q^\circ(t)$  для определения динамических характеристик объектов проветривания.

Принципиальная возможность применения корреляционных функций для анализа процессов  $C^\circ(t)$  и  $Q^\circ(t)$  объясняется тем, что они позволяют при вычислении на достаточно большом интервале времени выделить практически в чистом виде периодические составляющие исследуемых процессов.

Для вычисления корреляционных и взаимокорреляционных функций используем формулы [15, 16]:

$$R_C(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T C^\circ(t) \cdot C^\circ(t + \tau) dt \quad (5)$$

$$R_Q(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T Q^\circ(t) \cdot Q^\circ(t + \tau) dt, \quad (6)$$

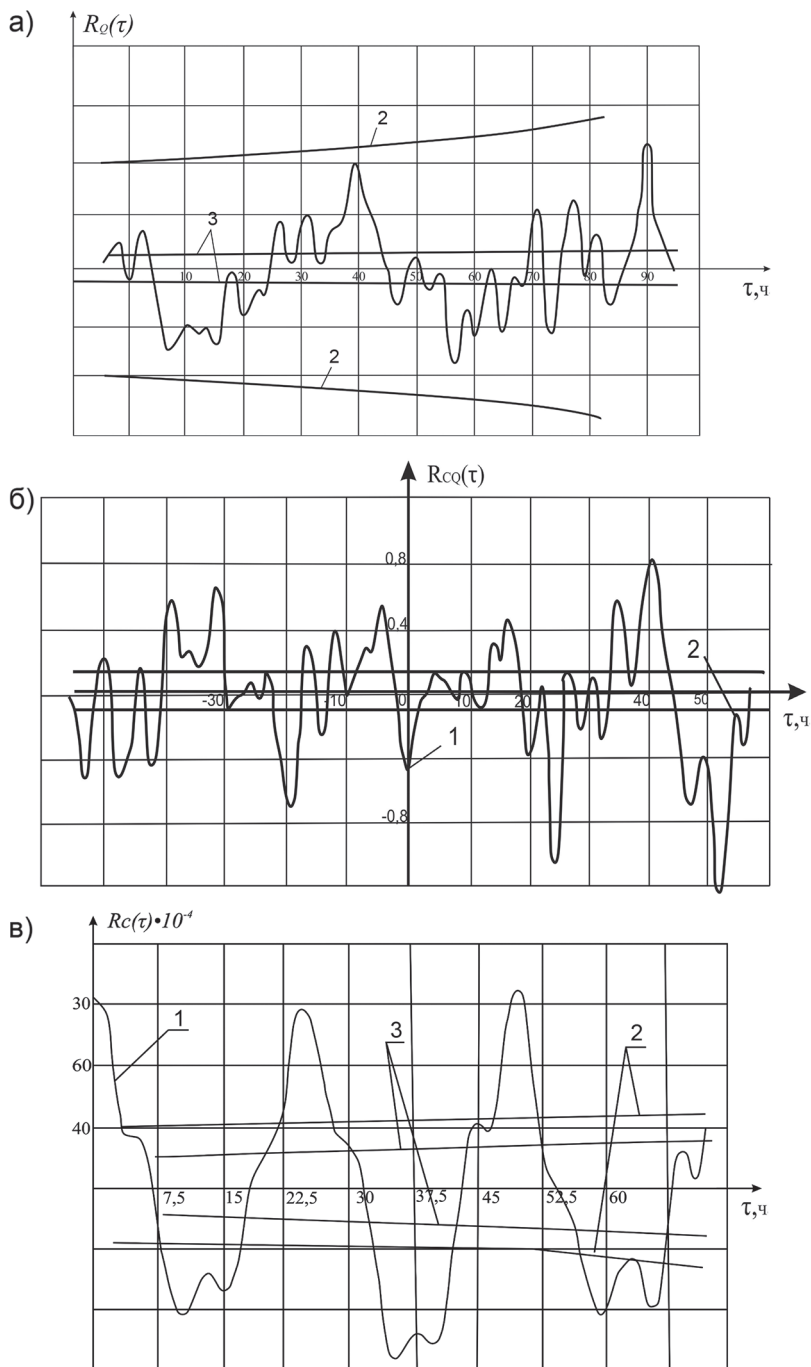


Рис. 1. Графики корреляционных функций: корреляционная функция  $C(t)$ , кривая 1 (а); взаимнокорреляционная функция, кривая 1 (б); корреляционная функция  $Q(t)$ , кривая 1; 2, 3 – уровни значимости (в)  
 Fig. 1. Correlation functions: correlation function  $C(t)$ , curve 1 (a); mutually correlation function, curve 1 (b); correlation function  $Q(t)$ , curve 1; 2, 3 – confidence levels (v)

$$R_{CQ}(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T C^0(t) \cdot Q^0(t + \tau) dt, \quad (7)$$

где  $R_C(\tau)$ ,  $R_Q(\tau)$  – корреляционные функции процессов  $C^0(t)$  и  $Q^0(t)$ ;  $R_{CQ}(\tau)$  – взаимокорреляционная функция процессов  $C^0(t)$  и  $Q^0(t)$ ;  $\tau$  – интервал сдвига реализаций, мин;  $T$  – интервал наблюдения, мин.

Функции  $R_C(\tau)$ ,  $R_Q(\tau)$  и  $R_{CQ}(\tau)$  вычислялись с помощью разработанной стандартной программы. «Хвосты» корреляционных функций могут представлять собой колебания, обусловленные случайными ошибками при определении корреляционных функций. К случайным ошибкам следует отнести не только погрешности за счет ошибок измерения, квантования по времени процессов  $C^0(t)$  и  $Q^0(t)$  и конечности интервала наблюдения, но и случайных возмущений с периодами  $T < 1$  ч по причине, например, работы подъема шахты, открытия вентиляционных дверей и т.д.

Для уменьшения значения амплитуды случайной ошибки экспериментальные корреляционные и взаимокорреляционные функции были сглажены методом скользящего среднего с интервалом  $T_c = 1 - 2$  ч. При этом амплитуды колебаний с периодами  $T < T_c$  ослабляются (уменьшаются) в 5 – 10 раз, а амплитуды низкочастотных колебаний ( $T > 4T_c$ ) уменьшаются лишь на 5%.

На рис. 1 показаны экспериментальные корреляционные функции концентрации метана (рис. 1, а) и расхода воздуха (рис. 1, б), взаимная корреляционная функция (рис. 1, в) между концентрацией метана и расходом воздуха, построенные по результатам наблюдений аэрогазодинамических процессов на шахтах.

### Результаты исследований

Из анализа графиков видно, что после сглаживания «хвосты» корреляцион-

ных функций сохраняются, и их амплитуды не уменьшаются с ростом  $\tau$ , как это должно было быть, если бы они были обусловлены погрешностями при вычислении корреляционных функций чисто случайных процессов.

Оценим количественно величину случайных ошибок при определении корреляционных функций. Суммарная погрешность вычисления функций  $R_C(t)$  и  $R_Q(t)$  может быть найдена из равенства:

$$\sigma_{\Sigma} = \delta_n + \delta_{\Delta} + \delta_{\tau}, \quad (8)$$

где  $\delta_n$ ,  $\delta_{\Delta}$ ,  $\delta_{\tau}$  – погрешности вычисления корреляционных функций за счет ошибок измерения, квантования процессов  $C^0(t)$  и  $Q^0(t)$  по времени и конечности интервала наблюдения.

Корреляционные функции объектов проветривания определялись по реализациям процессов  $C^0(t)$  и  $Q^0(t)$ , записанных в отклонениях от установившихся значений, поэтому погрешности измерения этих процессов являются случайными и характеризуются среднеквадратичной погрешностью измерительных приборов  $\sigma_n$ .

С учетом среднеквадратичной погрешности процесса формула для вычисления корреляционной функции может быть записана в виде:

$$R_n(\tau) = \frac{1}{T} \int_0^T [\sigma_n + C^0(t)] \cdot [\sigma_n + C^0(t - \tau)] \cdot dt$$

Преобразуем это выражение следующим образом:

$$\begin{aligned} R_n(\tau) &= \frac{1}{T} \int_0^T [\sigma_n^2 + \sigma_n \cdot C^0(t) + \\ &+ \sigma_n C^0(t - \tau) + C^0(t) \cdot C^0(t - \tau)] \cdot dt = \\ &= \sigma_n^2 + \frac{\sigma_n}{T} \int_0^T C^0(t) dt + \frac{\sigma_n}{T} \int_0^T C^0(t - \tau) dt + \\ &+ \frac{1}{T} \int_0^T C^0(t) \cdot C^0(t - \tau) dt \end{aligned} \quad (9)$$

Первые два интеграла в выражении представляют собой математическое ожидание, которое для процессов в отклонениях  $C^\circ(t)$  равно нулю. Следовательно, последнее выражение примет вид:

$$R_n(\tau) = \sigma_n^2 + \frac{1}{T} \int_0^T C^\circ(t) \cdot C^\circ(t - \tau) dt. \quad (10)$$

Интеграл в этом выражении представляет истинную корреляционную функцию, а первый член выражения характеризует ошибку вычисления корреляционной функции за счет погрешности измерения, т.е.

$$\delta_H = \sigma_n \quad (11)$$

Для метанометра ИМС-1 среднеквадратичная погрешность не превышает  $\sigma_n = 0,01\% \text{ CH}_4$ , для анемометра АИ-1 она равна  $\sigma_n = 3 - 4 \text{ м}^3/\text{мин}$ , учитывая сечение выработки  $\sigma_n = 12 - 24 \text{ м}^2$ .

Для определения второго члена суммы (8) воспользуемся формулой:

$$\delta_\Delta = 2[R(0) - R(\Delta t)], \quad (12)$$

где  $R(\Delta t)$  — значение корреляционной функции  $R_n(\tau)$ ,  $\tau = \Delta t$ .

Третий член суммы (8) можно определить по следующей формуле:

$$\delta_\tau = \sigma[R(\tau)] = \frac{2}{T - \tau} \int_0^{T-\tau} \left(1 - \frac{\lambda}{T - \tau}\right) [R^2(\lambda) + R(\lambda + \tau) \cdot R(\lambda - \tau)] d\lambda \quad (13)$$

Значения погрешностей  $\delta_n$ ,  $\delta_\Delta$ ,  $\delta_\tau$ , вычисленные по экспериментальным данным с использованием формул (11) — (13), показали, что при  $\tau = 12 - 24 \text{ ч}$  максимальные значения «хвостов» корреляционных функций и  $\max R_{C_k}$  и  $\max R_{Q_k}$  в 1,5 — 2 раза превосходят значения суммарной случайной погрешности вычисления корреляционной функции  $\sigma_\Sigma$ .

Следует отметить, что значения суммарной погрешности  $\sigma_\Sigma$ , найденные по формуле (8), являются завышенными, так как при вычислении члена  $\sigma_\tau$  не учи-

тывался эффект от сглаживания корреляционных функций методом скользящего среднего.

Таким образом, «хвосты» корреляционных функций имеют незатухающий характер, не исчезают при сглаживании методом скользящего среднего, и наличие их нельзя объяснить случайными погрешностями при вычислении корреляционных функций. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что для рассматриваемых добычных участков процессы концентрации метана  $C^\circ(t)$  и расхода воздуха носят аддитивный характер, т.е. состоят из суммы чисто случайных процессов  $C_c^\circ(t)$ ,  $Q_c^\circ(t)$  и составляющих  $C_k^\circ(t)$ ,  $Q_k^\circ(t)$  обусловленных влиянием производственных процессов участка.

Из полученных выше результатов следует, что для правильного выбора метода определения динамических характеристик по данным нормальной эксплуатации необходимо проводить проверку аэрогазодинамических процессов на аддитивность, т.е. на наличие в аэрогазодинамических процессах составляющих  $C_k^\circ(t)$ ,  $Q_k^\circ(t)$ , которые обуславливают появление «хвостов» корреляционных функций.

Проверка процессов  $C^\circ(t)$  и  $Q^\circ(t)$  на аддитивность путем вычисления погрешности  $\delta_\Delta$  по формуле (8) достаточно трудоемка, особенно определение члена  $\delta_\tau$  по формуле (13). Для оценки погрешности  $\delta_\tau$  целесообразно воспользоваться более простой методикой [17, 18].

Сущность этой методики сводится к оценке значимости корреляционных функций путем вычисления выборочных коэффициентов корреляции по формуле:

$$\eta_n(\tau) = \frac{R(\tau)(N - 1)}{R(0) \cdot N}, \quad (14)$$

где  $R(0)$  — начальное значение корреляционной функции ( $\tau = 0$ );  $N$  — число дискретных замеров процессов  $C^\circ(t)$  и

$Q^\circ(t)$ . Значимость корреляционных функций оценивается неравенством:

$$\eta_n(\tau) \geq t_q \frac{1 - \eta^2(\tau)}{\sqrt{N-1}}, \quad (15)$$

где  $\eta_n(\tau)$  — значимый коэффициент корреляции;  $t_q$  — показатель распределения Стьюдента с уровнем значимости  $q$ .

Расчет значимости функций  $R_C(\tau)$ ,  $R_Q(\tau)$  и  $R_{CQ}(\tau)$  производился при  $t = 2,58$ , что соответствует вероятности  $P^g = 0,99$ . Однако при проверке значимости «хвостов» корреляционных функций по этой методике вместо значения  $R(0)$  нужно подставлять максимальные значения «хвостов» корреляционных функций, а не начальное значение корреляционной функции, которое приводит, как показало сравнение с точными значениями  $\delta_{\tau}$ , к завышению уровней значимости (кривые 2 на рис. 1). В этом случае величины уровней значимости, показанные в виде кривых 3 на рис. 1, удовлетворительно совпадают с точными значениями погрешности  $\delta_{\tau}$ , определенными по формуле (14).

Для анализа свойств составляющих аэрогазодинамических процессов  $C^\circ(t)$  и  $Q^\circ(t)$  выделим корреляционные функции чисто случайных процессов путем отсечения центрального пика функций  $R_C(\tau)$  и  $R_Q(\tau)$  на уровне, соответствующем максимальным значениям «хвостов» корреляционных функций. Графики выделенных корреляционных функций и их графиков (рис. 1) представлены в виде кривых 1 на рис. 2, а их аппроксимация экспонентой — в виде кривых 2.

Определим закон распределения чисто случайных процессов концентрации метана  $C_c^\circ(t)$  и расхода воздуха  $Q_{Q_c}^\circ(t)$ . Для этого используем известное из теории математической статистики свойство аддитивных случайных процессов: если аддитивный случайный процесс, состоящий из суммы независимых случайных составляющих, имеет нормаль-

ный закон распределения, то каждое слагаемое также должно подчиняться этому закону.

Считаем составляющие аддитивных процессов концентрации метана и расхода воздуха независимыми, что не противоречит физике этих процессов: как показано многочисленными исследованиями [18–20], аддитивные процессы  $C^\circ(t)$  и  $Q^\circ(t)$  имеют нормальный закон распределения.

Можно сделать вывод о нормальности закона распределения как чисто случайных составляющих процессов  $C^\circ(t)$  и  $Q^\circ(t)$ , так и составляющих, колебательный характер которых обусловлен влиянием производственных процессов участка.

В теории случайных процессов наиболее развита теория стационарных процессов, получившая широкое применение на практике.

На практике для проверки стационарности может быть использовано условие четности корреляционной функции:

$$R(\tau) = R(-\tau). \quad (16)$$

Для стационарных случайных процессов условие (16) соблюдается, а для нестационарных процессов нарушается.

Проверка условия (16) для корреляционных функций случайных процессов  $C^\circ(t)$  и  $Q^\circ(t)$  показала, что аддитивные случайные процессы на интервале наблюдения 3+5 сут близки к стационарным.

Для аддитивных случайных процессов  $C^\circ(t)$  и  $Q^\circ(t)$ , которые являются суммой независимых составляющих, условие (16) может быть записано в виде:

$$R_{C_c}(\tau) + R_{C_k}(\tau) = R_{C_c}(-\tau) + R_{C_k}(-\tau), \quad (17)$$

$$R_{Q_c}(\tau) + R_{Q_k}(\tau) = R_{Q_c}(-\tau) + R_{Q_k}(-\tau), \quad (18)$$

где  $R_{C_k}(\tau)$ ,  $R_{Q_k}(\tau)$  — корреляционные функции составляющей концентрации метана и расхода воздуха, которая обуслов-

лена влиянием производственных процессов участка.

Условия (17) и (18) выполняются только в том случае, если, в свою очередь, выполняются равенства:

$$\begin{cases} R_{C_k}(\tau) = R_{C_k}(-\tau) \\ R_{Q_c}(\tau) = R_{Q_c}(-\tau) \end{cases} \begin{cases} R_{Q_k}(\tau) = R_{Q_k}(-\tau) \\ R_{Q_c}(\tau) = R_{Q_c}(-\tau) \end{cases}.$$

Следовательно, из стационарности аддитивных случайных процессов  $C^\circ(t)$  и  $Q^\circ(t)$  вытекает стационарность чисто случайных процессов  $C_c^\circ(t)$ ,  $Q_c^\circ(t)$  и стационарность процессов  $C_k^\circ(t)$ ,  $Q_k^\circ(t)$ , обусловленных производственными процессами участка.

Важнейшим для практики свойством стационарных случайных процессов является свойство эргодичности, которое позволяет определить характеристики процессов (математическое ожидание, дисперсию, корреляционную функцию) по одной достаточно длинной реализации.

Необходимым и достаточным условием эргодичности стационарного случайного процесса является следующее [1–5]:

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) \cdot R(\tau) d\tau = 0. \quad (19)$$

Проверка условия (19) обычно весьма затруднительна. Поэтому на практике это условие заменяется более простым достаточным условием: корреляционная функция  $R(\tau)$  должна неограниченно убывать по модулю при  $|\tau| \rightarrow \infty$ , для любого  $\varepsilon > 0$  можно найти такую величину  $T_0$ , что:

$$|R(\tau)| < \varepsilon \text{ при } |\tau| > T_0. \quad (20)$$

Как видно из рис. 2, корреляционные функции чисто случайных процессов и с ростом  $\tau$  стремятся к нулю и, следовательно, для них условие (20) выполняется. Таким образом, чисто случайные стационарные процессы  $C_c^\circ(t)$  и  $Q_c^\circ(t)$  обладают эргодическим свойством.

Корреляционные функции составляющих, обусловленных влиянием на газовыделение производственных процессов участка, имеют колебательный, близкий к периодическому характеру. Особенностью их является то, что они не затухающие, это прослежено на интервале 24–72 ч, и что отсутствует строгая периодичность, которая проявляется не только в изменении амплитуды, но и в составе частот. Эти особенности достаточно отчетливо видны по графикам рис. 1.

Составляющие  $C_k^\circ(t)$  и  $Q_k^\circ(t)$ , обусловленные влиянием производственных процессов, могут быть представлены в виде:

$$C_k^\circ(t) = \sum_{i=1}^n C_i \sin(\omega_i t + \varphi_i), \quad (21)$$

$$Q_k^\circ(t) = \sum_{i=1}^n Q_i \sin(\omega_i t + \psi_i). \quad (22)$$

Если процессы  $C_k^\circ(t)$  и  $Q_k^\circ(t)$  являются детерминированными, т.е. значения  $C_i = \text{const}$ ,  $Q_i = \text{const}$ ,  $\varphi_i = \text{const}$ ,  $\psi_i = \text{const}$ , то их корреляционные функции имеют вид:

$$R_{C_k}(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n C_i^2 \cos \omega_i \tau, \quad (23)$$

$$R_{Q_k}(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n Q_i^2 \cos \omega_i \tau, \quad (24)$$

В этом случае корреляционные функции (23) и (24) должны являться строго периодическими, что не соответствует графикам экспериментальных корреляционных функций  $R_C(\tau)$  и  $R_Q(\tau)$  на рис. 2.

Если амплитуды  $C_i$  и  $Q_i$  в выражениях (23, 24) являются случайными процессами и их корреляционные функции в простейшем случае описываются выражениями  $\frac{1}{2} C_i^2 e^{-\alpha \tau}$  и  $\frac{1}{2} Q_i^2 e^{-\alpha \tau}$ , то корреляционные функции процессов  $C_k^\circ(t)$  и  $Q_k^\circ(t)$ :



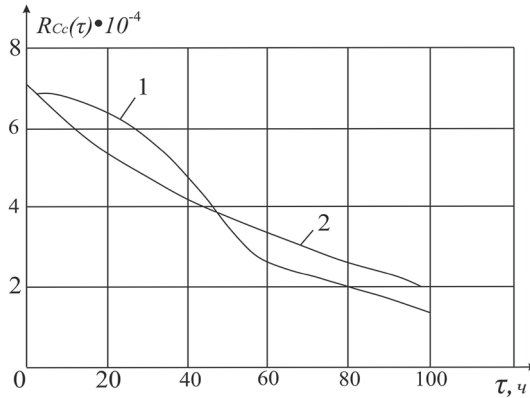


Рис. 2. График корреляционной функции случайной составляющей процесса  $C_c(t)$ , кривая – 1; 2 – аппроксимирующая кривая

Fig. 2. Random component correlation function  $Cc(t)$ , curve 1; 2 – approximation curve

$$R_{C_k}(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n C_i^2 e^{-\alpha\tau} \cos \omega_i \tau, \quad (25)$$

$$R_{Q_k}(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n Q_i^2 e^{-\alpha\tau} \cos \omega_i \tau. \quad (26)$$

Корреляционные функции (25) и (26) являются затухающими функциями, что также не соответствует полученным экспериментальным графикам функции  $R_C(\tau)$  и  $R_Q(\tau)$ .

Если амплитуды  $C_i$  и  $Q_i$  являются случайными величинами и выполняются условия стационарности процессов  $C_k^\circ(t)$  и  $Q_k^\circ(t)$ :

$$M\{C_i\} = M\{Q_i\} = 0, \\ M\{C_i^2\} = \frac{1}{2} D_{C_i}, \quad M\{Q_i^2\} = \frac{1}{2} D_{Q_i}, \quad (27)$$

где  $M$  – символ математического ожидания, то корреляционные функции процессов (21) и (22) будут иметь вид:

$$R_{C_k}(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n D_{C_i} \cos \omega_i \tau, \quad (28)$$

$$R_{Q_k}(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n D_{Q_i} \cos \omega_i \tau. \quad (29)$$

Корреляционные функции (28) и (29) имеют незатухающий, отличающийся от строгой периодичности характер.

Взаимная корреляционная функция в этом случае имеет вид:

$$R_{C_k Q_k}(\tau) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n C_i Q_i [\cos(\varphi_i - \psi_i) \cdot \cos \omega_i \tau \pm \sin(\varphi_i - \psi_i) \cdot \sin \omega_i \tau] \quad (30)$$

Из формулы (30) видно, что значение взаимной корреляционной функции  $R_{C_k Q_k}(\tau)$  зависит от случайного сдвига фаз  $(\varphi_i - \psi_i)$  между процессами  $C_k^\circ(t)$  и  $Q_k^\circ(t)$ . Это обстоятельство позволяет объяснить искажения формы экспериментальной взаимной корреляционной функции чисто случайных процессов  $R_{C_k Q_k}(\tau)$ .

Таким образом, корреляционные функции  $R_{C_k}(\tau)$ ,  $R_{Q_k}(\tau)$  и  $R_{C_k Q_k}(\tau)$ , построенные по математическим моделям (21 и 22), когда их амплитуды  $C_i$ ,  $Q_i$  и фазы  $\varphi_i$  и  $\psi_i$  являются случайными величинами, наилучшим образом отражают характер изменения экспериментальных корреляционных функций составляющих  $C_k^\circ(t)$  и  $Q_k^\circ(t)$ , обусловленных влиянием производственных процессов участка.

Так как параметры процессов  $C_k^\circ(t)$  и  $Q_k^\circ(t)$  меняются случайным образом, то эти процессы следует отнести к квазидетерминированным случайным процессам. Анализ статистических свойств

составляющих процессов  $C_k^\circ(t)$  и  $Q_k^\circ(t)$ . показал, что чисто случайные процессы концентрации метана  $C_k^\circ(t)$  и расхода воздуха  $Q_k^\circ(t)$  являются стационарными и эргодическими процессами с нормальным законом распределения на интервалах 3–5 сут, а квазидетерминированные случайные процессы  $C_k^\circ(t)$  и  $Q_k^\circ(t)$  являются стационарными процессами с нормальным законом распределения.

## Заключение

Практическое значение работы заключается в том, что реализация ее результатов позволяет проанализировать и оценить параметры проветривания, а также значительно улучшить систему управления воздухораспределением при различных режимах в горных выработках, учитывая особенности сети вентиляции.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пучков Л. А., Каледина Н. О., Кобылкин С. С. Системные решения обеспечения метанобезопасности угольных шахт // Горный журнал. – 2014. – № 5. – С. 12–14.
2. Semin M. A., Levin L. Yu. Stability of air flows in mine ventilation networks // Process Safety and Environmental Protection. 2019, vol. 124, pp. 167–171. DOI: 10.1016/j.psep.2019.02.006.
3. Thakur P. Underground coal mine atmosphere / Advanced mine ventilation. Respirable coal dust, combustible gas and mine fire control. Woodhead Publishing, 2019, pp. 3–16. DOI: 10.1016/B978-0-08-100457-9.00001-8.
4. Cheng L., Guo H., Lin H. Evolutionary model of coal mine safety system based on multi-agent modeling // Process Safety and Environmental Protection. 2021, vol. 147, pp. 1193–1200. DOI: 10.1016/j.psep.2021.01.046.
5. Esterhuizen G. S., Gearhart D. F., Klemetti T., Dougherty H., Dyke M. Analysis of gateroad stability at two longwall mines based on field monitoring results and numerical model analysis // International Journal of Mining Science and Technology. 2019, vol. 29, no. 1, pp. 35–43. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.11.021.
6. Wang K., Jiang Sh., Wu Zh., Shao H., Zhang W., Pei X., Cui Ch. Intelligent safety adjustment of branch airflow volume during ventilation-on-demand changes in coal mines // Process Safety and Environmental Protection. 2017, vol. 111, pp. 491–506. DOI: 10.1016/j.psep.2017.08.024.
7. Qiao W. Analysis and measurement of multifactor risk in underground coal mine accidents based on coupling theory // Reliability Engineering & System Safety. 2021, vol. 208, article 107433. DOI: 10.1016/j.res.2021.107433.
8. Zhang L., Zhou G., Ma Yu, Jing B., Sun B., Han F., He M., Chen Xu. Numerical analysis on spatial distribution for concentration and particle size of particulate pollutants in dust environment at fully mechanized coal mining face // Powder Technology. 2021, vol. 383, pp. 143–158. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.01.039.
9. Ключев Р. В., Босиков И. И., Майер А. В., Гаврина О. А. Комплексный анализ применения эффективных технологий для повышения устойчивого развития природно-технической системы // Устойчивое развитие горных территорий. – 2020. – № 2. – С. 283–290.
10. Ключев Р. В., Босиков И. И., Егорова Е. В., Гаврина О. А. Оценка горно-геологических и горнотехнических условий карьера «Северный» с помощью математических моделей // Устойчивое развитие горных территорий. – 2020. – № 3. – С. 418–427. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-3-418-427.
11. Машинцов Е. А., Котлеревская Л. В., Криничная Н. А. Управление вентиляцией в угольной шахте // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2014. – № 7. – С. 188–195.
12. Скопинцева О. В., Баловцев С. В. Управление аэрологическими рисками угольных шахт на основе статистических данных системы аэрогазового контроля // Горный инфор-

мационно-аналитический бюллетень. — 2021. — № 1. — С. 78–89. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-78-89.

13. Каледина Н. О. Обоснование параметров систем вентиляции высокопроизводительных угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2011. — № 7. — С. 261–271.

14. Бахвалов Л. А., Баранникова И. В., Агабубаев А. Т. Анализ современных систем автоматического управления проветриванием // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2017. — № 7. — С. 22–28. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-7-0-22-28.

15. Босиков И. И., Ключев Р. В., Хетагуров В. Н., Ажмухамедов И. М. Разработка методов и средств управления аэрогазодинамическими процессами на добычных участках // Устойчивое развитие горных территорий. — 2021. — № 1. — С. 77–83. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-77-83.

16. Васенин И. М., Шрагер Э. Р., Крайнов А. Ю., Палеев Д. Ю., Лукашов О. Ю., Костеренко В. Н. Математическое моделирование нестационарных процессов вентиляции сети выработок угольной шахты // Компьютерные исследования и моделирование. — 2011. — Т. 3. — № 2. — С. 155–163.

17. Машинцов Е. А., Котлеревская Л. В., Криничная Н. А. Управление вентиляцией в угольной шахте // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. — 2014. — № 7. — С. 188–195.

18. Харик Е. К., Астанин А. В. Численное исследование вентиляции горной выработки угольной шахты в трехмерной постановке // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. — 2011. — № 4-5. — С. 2567–2569.

19. Рычковский В. М., Сергеев О. А., Тюрин В. П. Об управлении вентиляцией на угольных шахтах Кузбасса // Безопасность труда в промышленности. — 2004. — № 11. — С. 8–9.

20. Sjöström S., Klintonäs E., Johansson P., Nyqvist J. Optimized model-based control of main mine ventilation air flows with minimized energy consumption // International Journal of Mining Science and Technology. 2020, vol. 30, no. 4, pp. 533–539. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.05.016. **PLAB**

## REFERENCES

1. Puchkov L. A., Kaledina N. O., Kobylkin S. S. System solutions to ensure methane safety of coal mines. *Gornyi Zhurnal*. 2014, no. 5, pp. 12–14. [In Russ].

2. Semin M. A., Levin L. Yu. Stability of air flows in mine ventilation networks. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019, vol. 124, pp. 167–171. DOI: 10.1016/j.psep.2019.02.006.

3. Thakur P. Underground coal mine atmosphere. *Advanced mine ventilation. Respirable coal dust, combustible gas and mine fire control*. Woodhead Publishing, 2019, pp. 3–16. DOI: 10.1016/B978-0-08-100457-9.00001-8.

4. Cheng L., Guo H., Lin H. Evolutionary model of coal mine safety system based on multi-agent modeling. *Process Safety and Environmental Protection*. 2021, vol. 147, pp. 1193–1200. DOI: 10.1016/j.psep.2021.01.046.

5. Esterhuizen G. S., Gearhart D. F., Klemetti T., Dougherty H., Dyke M. Analysis of gateroad stability at two longwall mines based on field monitoring results and numerical model analysis. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2019, vol. 29, no. 1, pp. 35–43. DOI: 10.1016/j.ijmst.2018.11.021.

6. Wang K., Jiang Sh., Wu Zh., Shao H., Zhang W., Pei X., Cui Ch. Intelligent safety adjustment of branch airflow volume during ventilation-on-demand changes in coal mines. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017, vol. 111, pp. 491–506. DOI: 10.1016/j.psep.2017.08.024.

7. Qiao W. Analysis and measurement of multifactor risk in underground coal mine accidents based on coupling theory. *Reliability Engineering & System Safety*. 2021, vol. 208, article 107433. DOI: 10.1016/j.ress.2021.107433.

8. Zhang L., Zhou G., Ma Yu, Jing B., Sun B., Han F., He M., Chen Xu. Numerical analysis on spatial distribution for concentration and particle size of particulate pollutants in dust environment at fully mechanized coal mining face. *Powder Technology*. 2021, vol. 383, pp. 143–158. DOI: 10.1016/j.powtec.2021.01.039.
9. Klyuev R. V., Bosikov I. I., Mayer A. V., Gavrina O. A. Comprehensive analysis of the effective technologies application to increase sustainable development of the natural-technical system. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020, no. 2, pp. 283–290. [In Russ].
10. Klyuev R. V., Bosikov I. I., Egorova E. V., Gavrina O. A. Assessment of mining-geological and mining technical conditions of the Severny pit with the use of mathematical models. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2020, no. 3, pp. 418–427. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2020-12-3-418-427.
11. Mashintsov E. A., Kotlerevskaya L. V., Krinichnaya N. A. Ventilation control in a coal mine. *News of the Tula state university. Technical sciences*. 2014, no. 7, pp. 188–195. [In Russ].
12. Skopintseva O. V., Balovtsev S. V. Air quality control in coal mines based on gas monitoring statistics. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021, no. 1, pp. 78–89. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2021-1-0-78-89.
13. Kaledina N. O. Justification of the parameters of ventilation systems of high-performance coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2011, no. 7, pp. 261–271. [In Russ].
14. Bahvalov L. A., Barannikova I. V., Agabubayev A. T. Review of the modern systems of automated ventilation control. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017, no. 7, pp. 22–28. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-7-0-22-28.
15. Bosikov I. I., Klyuev R. V., Khetagurov V. N., Azhmukhamedov I. M. Development of methods and management tools aerogasdynamics processes at mining sites. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2021, no. 1, pp. 77–83. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2021-13-1-77-83.
16. Vasenin I. M., Shrager E. R., Krainov A. Yu., Paleev D. Yu., Lukashov O. Yu., Kosterenko V. N. Mathematical modeling of non-stationary ventilation processes of the coal mine workings network. *Computer Research and Modeling*. 2011, vol. 3, no. 2, pp. 155–163. [In Russ].
17. Mashintsov E. A., Kotlerevskaya L. V., Krinichnaya N. A. Management of ventilation in the coal mine as difficult system. *News of the Tula state university. Technical sciences*. 2014, no. 7, pp. 188–195. [In Russ].
18. Kharik E. K., Astanin A. V. Numerical study of ventilation of a coal mine in a three-dimensional setting. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*. 2011, no. 4-5, pp. 2567–2569. [In Russ].
19. Rychkovsky V. M., Sergeev O. A., Tyurin V. P. On ventilation control at coal mines of Kuzbass. *Occupational Safety in Industry*. 2004, no. 11, pp. 8–9.
20. Sjöström S., Klintonäs E., Johansson P., Nyqvist J. Optimized model-based control of main mine ventilation air flows with minimized energy consumption. *International Journal of Mining Science and Technology*. 2020, vol. 30, no. 4, pp. 533–539. DOI: 10.1016/j.ijmst.2020.05.016.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Босиков Игорь Иванович*<sup>1</sup> — канд. техн. наук,  
доцент, e-mail: igor.boss.777@mail.ru,  
*Клюев Роман Владимирович* — д-р техн. наук,  
доцент, профессор, e-mail: kluev-roman@rambler.ru,  
Московский политехнический университет,  
*Ажмухамедов Искандар Маратович* — д-р техн. наук,  
профессор, декан факультета цифровых технологий  
и кибербезопасности, e-mail: aim\_agtu@mail.ru,  
Астраханский государственный университет,

Ревазов Владимир Черменович<sup>1</sup> — канд. пед. наук, доцент,  
<sup>1</sup> Северо-Кавказский горно-металлургический институт  
(государственный технологический университет).  
Для контактов: Босиков И.И., e-mail: igor.boss.777@mail.ru.

## INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.I. Bosikov<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,  
e-mail: igor.boss.777@mail.ru,

R.V. Klyuev, Dr. Sci. (Eng.), Assistant Professor,  
Professor, e-mail: kluev-roman@rambler.ru,  
Moscow Polytechnic University, 107023, Moscow, Russia,

I.M. Azhmukhamedov, Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Dean of Faculty of Digital Technologies and Cybersecurity,  
Astrakhan State University, 414056, Astrakhan, Russia,  
e-mail: aim\_agtu@mail.ru,

V.Ch. Revazov<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,  
<sup>1</sup> North Caucasian Institute of mining and metallurgy  
(State Technological University), 362021, Vladikavkaz, Russia.

**Corresponding author:** I.I. Bosikov, e-mail: igor.boss.777@mail.ru.

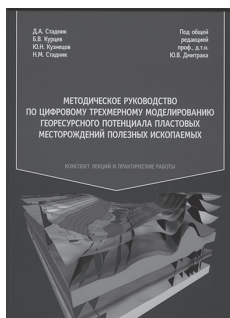
Получена редакцией 14.05.2021; получена после рецензии 06.07.2021; принята к печати 10.10.2021.  
Received by the editors 14.05.2021; received after the review 06.07.2021; accepted for printing 10.10.2021.



---

## НОВИНКИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ГОРНАЯ КНИГА»

---



Стадник Д.А., Курцев Б.В., Кузнецов Ю.Н., Стадник Н.М.  
**Методическое руководство по цифровому трехмерному  
моделированию георесурсного потенциала пластовых  
месторождений полезных ископаемых:  
Конспект лекций и практические работы**

Год: 2021

Страниц: 224

ISBN: 978-5-98672-522-2

UDK: 622, 004.942

Осуществлен анализ результатов научных исследований, тенденций и направлений совершенствования теории и практики цифрового трехмерного моделирования пластовых месторождений твердых полезных ископаемых с учетом позитивной динамики развития функционала горно-геологических информационных систем. Разработаны методические рекомендации по использованию результатов исследований в практике автоматизированного проектирования 3D-моделей пластовых месторождений твердых полезных ископаемых и технологий их обработки.