

**Куприянов Вячеслав  
Васильевич**

д-р техн. наук, ФГАОУ  
ВО «Национальный исследова-  
тельский технологический уни-  
верситет «МИСиС», г. Москва,  
Российская Федерация

**ORCID:** 0000-0003-3793-8361

**e-mail:** msmu\_asu@mail.ru

## МЕТОДОЛОГИЯ ОПЕРАТИВНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ НЕШТАТНЫХ ГАЗОВЫХ СИТУАЦИЙ НА ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКАХ ШАХТ

**Аннотация.** Статья направлена на развитие одного из подходов к принятию решений персоналом по оперативному анализу и интерпретации аварийных ситуаций в горных выработках. Предложена методика количественной оценки нестационарных процессов для обнаружения нештатных газовых ситуаций и аварийных загазований. Она ориентирована на полное использование информационной избыточности, содержащейся в экспериментальных реализациях результатов взаимодействия технологий с призабойной частью горного массива. Были применены следующие положения: появление нештатных газовых ситуаций приводит к разрыву взаимодействия газодинамических процессов на участках записи метанограмм, а наличие связи свидетельствует о «штатном» развитии ситуаций. Показано, что в целом методика реализуется в два этапа: оценка существенности связи путем проверки значимости коэффициента ранговой корреляции Спирмена при его аппроксимации распределением Стьюдента и проверка стационарности наблюдаемой связи на двух временных интервалах наблюдения. Установлено, что предложенная методика при соответствующей модификации применима и для идентификации суффляров в горных выработках. Предложены две методики мониторинга газовой эволюции. Верификация их содержания подтверждена шахтными экспериментами.

**Ключевые слова:** нештатная газовая ситуация, горная выработка, метанограмма, контролируемый параметр, выбросоопасные зоны, газовыделение, пылевыведение, суффляр, нестационарный процесс, ранжирование, ранговая корреляция, коэффициент корреляции Спирмена, достоверная вероятность, переборные методы, критерий непротиворечивости.

**Цитирование:** Куприянов В.В. Методология оперативного обнаружения нештатных газовых ситуаций на выемочных участках шахт // Вестник университета. 2020. № 3. С. 76–83.

**Kupriyanov Vyacheslav**  
Doctor of Technical Sciences,  
National University of Science  
and Technology «MISIS»,  
Moscow, Russia

**ORCID:** 0000-0003-3793-8361

**e-mail:** msmu\_asu@mail.ru

## METHODOLOGY FOR RAPID DETECTION OF ABNORMAL GAS SITUATIONS AT THE EXCAVATION SITES OF MINES

**Abstract.** The article is directed to the development of one of the approaches to decision-making by the personnel on the meaningful analysis and interpretation of emergency situations in mine workings. The technique of quantitative estimation of non-stationary processes for detection of abnormal gas situations and emergency gassing has been offered. It has been focused on the full use of information redundancy, contained in the experimental implementations of the results of the interaction of technologies with the bottomhole part of the mountain massif. The following provisions were applied: the appearance of abnormal gas situations leads to a rupture of the interaction of gas dynamic processes at the sites of recording methanograms, and the presence of a link indicates a «regular» development of situations. It has been shown, that, on the whole, the methodology is implemented in two stages: the evaluation of the significance of the connection by verifying the significance of the Spearman rank correlation coefficient when it is approximated by Student's distribution and checking the stationarity of the observed connection at two time intervals of observation. It has been established, that the proposed technique, with appropriate modification, is also applicable to identification of soullars in mine workings. Two methods for monitoring gas evolution have been proposed. Verification of their content has been confirmed by mine experiments.

**Keywords:** abnormal gas situation, mine working, methanogram, controlled parameter, emission hazard zones, gas evolution, dust generation, soullar, nonstationary process, ranking, rank correlation, Spearman correlation coefficient, confidence probability, exhaustive methods, consistency criterion.

**For citation:** Kupriyanov V.V. (2020) Methodology for rapid detection of abnormal gas situations at the excavation sites of mines. *Vestnik universiteta*. 1. 3, pp. 76–83. DOI: 10.26425/1816-4277-2020-3-76-83



В различных литературных источниках рассматривается комплекс вопросов, связанных с теоретическим обоснованием методологии автоматизированного обеспечения безопасности ведения горных работ [3; 4; 5; 6; 10]. В результате формирования информационных моделей сценариев возникновения и развития ряда аварий была показана важность реализации таких процессов, как разведка техносферы подземных горных предприятий для оперативной идентификации источников опасности, выявление причин появления аварий путем анализа результатов мониторинга.

Известно, что сложность решения задачи обнаружения выбросоопасных по газу зон угольных пластов и суфлярных источников в рамках классических подходов, предполагающих использование осредненных характеристик, сопряжена с возникновением запаздывания, создающего неуправляемые зоны по газовому фактору в период вызревания катастроф [2; 6; 11]. Это приводит к достаточным затруднениям принятия инженерных решений при оценке мониторинговых данных. В связи с этим в данной работе сделана попытка применить непараметрический подход к решению указанной задачи. Суть предлагаемой методики состоит в оценке степени связи двух и более нестационарных газодинамических процессов на коротких по времени их реализациях.

Забои горных выработок могут характеризоваться по газодинамическим явлениям как опасные и неопасные, что определяется анализом гистограмм распределений газовыделений. Штатные газовые ситуации возникают при нормальных условиях выемки угля (вне зон выбросов угля и газа) и сопровождаются газовыделениями, хорошо аппроксимируемыми нормальным законом [5]. В нештатных газовых ситуациях (далее – НшГС) нормальный закон распределения неприемлем из-за увеличения изменчивости объемов выделения газа за цикл выемки. Поэтому НшГС обусловлена выбросоопасными по газу зонами угольных пластов или, другими словами, появлением дополнительного источника газовыделения в выработанном пространстве. Для оперативной идентификации последнего в работе предлагается математико-статистическая процедура оценки аэродинамической и газодинамической взаимосвязи показаний двух датчиков метана [6]. Однако для ее реализации необходимо аналитическое формализованное описание этой взаимосвязи, применимое для различных шахтных условий и основанное на статистическом определении параметров газовых процессов. При непредвиденных обстоятельствах указанное аналитическое описание может нарушаться, что в конечном результате повлияет на точность принимаемых решений по идентификации источника газовыделения. Кроме того, данный подход отличается большим объемом и временем обработки данных экспериментов.

В этих условиях представляется эффективной концепция управляемости и наблюдаемости и непараметрическая количественная оценка степени связи нестационарных процессов [11]. Для параметра любой нештатной ситуации характерно, что коэффициенты взаимокорреляции с ним других физически однородных контролируемых параметров являются несущественными. Для задачи обнаружения НшГС это адекватно разрыву взаимодействия параметра НшГС (текущих содержаний газа) на фиксированных участках его записи в метанограммах с однородными параметрами штатных газовых ситуаций (в случае установки двух и более датчиков метана). Наличие такого взаимодействия в записях метанограмм свидетельствует об отсутствии НшГС. Подобным образом можно идентифицировать суфлярные источники в забоях выработок, приводящие к аварийным загазированию. Их обнаружение затруднено из-за воздействия на режим проветривания забоя случайных нестационарных возмущений в период газового последствия забоя на выемку угля. Появление таких возмущений связано с выходом забоя в зону геологических нарушений.

При обнаружении НшГС исходной информацией является основной нестационарный параметр (процентное содержание газа у первого по ходу вентиляционной струи датчика метана в период работ по выемке угля)  $n(t) = \{n(t_1), n(t_2), \dots, n(t_N)\}$  и группа других нестационарных параметров  $\theta(t)$ ,  $x(t)$ ,  $u(t)$  – (процентное содержание газа у второго, третьего и т. д. по ходу вентиляционной струи датчиков метана в период выемки угля), предположительно связанных с  $n(t)$ . Полагаем, что показания датчиков метана при нормальном режиме проветривания выработки взаимосвязаны между собой. На основании этих данных оценивалась степень связи между  $n(t)$  и  $\theta(t)$ , ее существенность при заданном уровне значимости, проверялась стационарность наблюдаемой связи.

Нестационарность параметров вызвана изменением математического ожидания (их дисперсия во времени не меняется). В каждый момент времени известны лишь мгновенные значения этих параметров и неизвестны их математические ожидания. В связи с этим для оценочных процедур нельзя воспользоваться коэффициентом взаимной корреляции. В этих условиях брались коэффициенты ранговой корреляции.

Допустим, что вектор  $n(t)$  принимает  $N$  различных значений, которые можно расположить в виде последовательности:

$$n^{(1)} \leq n^{(2)} \leq n^{(i)} \leq \dots \leq n^{(N)}, \quad (1)$$

где  $n^{(i)}$  – значение  $i$ -ой по абсолютной величине координаты вектора  $n(t)$ ;  $n^{(1)}$ ,  $n^{(N)}$  – соответственно наименьшее и наибольшее значения координат этого вектора.

Причем, если имеются  $N$  несовпадающих значений параметра  $n \rightarrow n(R)$ ,  $1 \leq i \leq N$ , то рангом  $R_i$  величины  $n_i$  является ее порядковый номер в записи (1), то есть  $n_i = n^{(R_i)}$ ,  $1 \leq i \leq N$ .

Рассмотрим коэффициенты ранговой корреляции Спирмена и Кендалла, которые соответственно вычисляются по формулам [8]:

$$\left. \begin{aligned} \tau_c &= 1 - \frac{6}{N^3 - N} \sum_{i=1}^N (R_i - Q_i)^2 \\ \tau_k &= \frac{1}{N^2 - N} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \text{sign}(R_i - R_j) \text{sign}(Q_i - Q_j), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $Q_i$  – ранг случайной величины  $\theta_i$  вектора  $\theta(t)$ . Дисперсии коэффициентов  $\tau_c$ ,  $\tau_k$  имеют вид [4]:

$$\sigma_c^2 = \frac{1}{N-1}; \quad \sigma_k^2 = \frac{4N+10}{9N(N-1)}. \quad (3)$$

Коэффициент Спирмена является более мощным (имеет меньший уровень значимости) по сравнению с  $\tau_k$ . Поэтому воспользуемся этим коэффициентом для решения поставленной задачи. Величина  $|\tau_c|$  изменяется от 0 до 1; при  $\tau_c = 0$  случайные процессы независимы. Чем больше значение  $|\tau_c|$ , тем теснее связь между контролируемыми параметрами. Распределение коэффициента  $\tau_c$  уже при  $N > 10$  достаточно хорошо аппроксимируется распределением Стьюдента с  $(N-2)$  степенями свободы. Для оценки существенности рангово-корреляционной связи воспользуемся формулой [8]:

$$|\tau_c| > t_{\frac{\alpha}{2}}(N-2) \left[ (1 - \tau_c^2)(N-2)^{-1} \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – выбранный уровень значимости  $t_{\frac{\alpha}{2}}(N-2) - 100 \frac{\alpha}{2} \%$  точки распределения Стьюдента с  $(N-2)$  степенями свободы.

При соблюдении условия (4) можно с вероятностью  $(1 - \alpha)$  утверждать, что на проверяемом участке между контролируемыми параметрами имеется корреляционная связь. При определении рангов предполагалось, что никакие из рассматриваемых значений параметров  $n(t)$ ,  $\theta(t)$  не совпадают между собой. В реальных ситуациях, как правило, имеются совпадения (наблюдаемые значения равны между собой). Для идентификации совпавших наблюдений используются средние ранги, определяемые по методике обработки совпадений Вилкоксона [7; 8]. Перед вычислением средних рангов проводилось ранжирование абсолютных значений  $n_i$  и  $\theta_i$  согласно (1) и разбиение исходных выборок параметров  $n(t)$  и  $\theta(t)$  на группы равных значений (операция выявления совпавших и несовпавших результатов идентификации). Для вычисления средних рангов достаточно подсчитать число значений  $n_j$  (или  $\theta_j$ ), входящих в каждую выявленную  $j$ -ю группу совпадений.

Средний ранг  $R_j$  для каждой  $j$ -ой группы находился из выражения:

$$R_j = \tau_1 + \tau_2 + \dots + \tau_{j-1} + \frac{\tau_j + 1}{2}, \quad (5)$$

где  $\tau_j$  – число совпавших значений в  $j$ -ой группе экспериментальных данных.

Для проверки стационарности наблюдаемой связи между  $n(t)$  и  $\theta(t)$  надо вычислить  $\tau_c$  на нескольких участках записи параметров и проверить соблюдение условия:

$$|\tau_c(1) - \tau_c(2)| \leq \sigma_c(in\ var\ 1,2), \quad (6)$$

где  $\sigma_c(in\ var)$  – среднеквадратичное отклонение коэффициента  $\tau_c$ , найденное для двух временных интервалов наблюдения по формуле (3).

Если неравенство (6) выполняется, то можно считать, что отличие в значениях  $\tau_c(1)$  и  $\tau_c(2)$  имеет случайный характер, а связь между параметрами является стационарной. Значимость коэффициента  $\tau_c$  определяется по доверительной вероятности, рассчитываемой для распределения Стьюдента в соответствии с (4).

Обнаружение НшГС проводилось путем оценки степени связи текущих параметров  $n(t)$  и  $\theta(t)$  (содержание газа у первого и второго по ходу вентиляционной струи датчиков метана в период выемки угля). Использовались экспериментальные данные для двух интервалов измерений, каждый из которых имел по 20 точек. Для вычисления средних рангов  $R_n$  и  $Q_n$  выделялись группы равных значений  $n_j$  и  $\theta_j$  на интервалах их регистрации. Расчеты  $R_n$ ,  $Q_n$  для групп значений параметров  $n_j$  и  $\theta_j$  велись согласно (5). Коэффициенты ранговой корреляции Спирмена для двух временных интервалов согласно (2) составили:  $\tau_c(1) = 0,805$ ,  $\tau_c(2) = 0,210$ . Были получены значения  $\sigma_{\tau_c}^2$  и  $\sigma_{\tau_c}$  для коэффициентов Спирмена:  $\sigma_{\tau_c}^2 = 0,0526$ ;  $\sigma_{\tau_c} = 0,23$ .

Очевидно, что разность между значениями коэффициента  $\tau_c$ :  $|\tau_c(1) - \tau_c(2)| = 0,595 > \sigma_{\tau_c} = 0,23$  больше  $\sigma_{\tau_c}$ . Таким образом, расхождение в коэффициентах  $\tau_c$  имеет неслучайный характер, а связь между показаниями датчиков метана не является стационарной. Другими словами, фиксируем появление НшГС в период выемки угля, то есть газовая реакция соответствует выбросоопасным зонам угольных пластов.

Согласно регламентируемой Правилами безопасности доверительной вероятности превышения предельных значений содержания метана в выработках в 0,025 уровень минимально допустимой различимости контролируемых параметров в 4 бита эквивалентен уровню значимости 5 %. При пороге значимости  $\alpha = 0,05$  и  $N = 20$  для рассматриваемого случая при  $t_{\alpha}(N-2) = 2,101$  согласно (4) было получено критическое значение коэффициента  $\tau_{c\text{крит}} = 0,484$ . Сопоставление величин  $\tau_c(1)$ ,  $\tau_c(2)$  и  $\tau_{c\text{крит}}$  свидетельствует об отсутствии на втором участке метанограммы тесной корреляционной связи между  $n(t)$  и  $\theta(t)$  или между показаниями двух датчиков метана.

Фиксация условий:

$$\tau_c(1) > \tau_{c\text{крит}}, \tau_c(2) < \tau_{c\text{крит}} \quad (7)$$

будет идентифицировать появление слоевого скопления метана. А для первого участка записи метанограммы характерно наличие штатной газовой ситуации (или нормальность функционирования выработки).

Обоснованность использования условий (7) для обнаружения НшГС на разных временных интервалах подтверждается независимостью смежных значений объемов газовыделения как в невыбросоопасных, так и выбросоопасных зонах угольных пластов, полученных при исследовании всплесков газовыделения от буровзрывных работ в подготовительных выработках, проводимых по зонам угольных пластов разной степени выбросоопасности [2; 4; 10].

Изложенная рангово-корреляционная методика позволяет не только оценивать степень связи двух нестационарных процессов, но и последовательно сравнить по тесноте связи несколько пар нестационарных процессов. При этом по минимальному объему текущей информации можно судить: меняется связь между процессами или нет с течением времени без вычисления плотностей вероятностей в фиксированных точках интервала наблюдения. По приведенной методике можно проводить анализ взаимосвязи показаний двух измерителей содержания пыли, контролируемых параметры одной и той же вентиляционной струи, с целью обнаружения нештатных ситуаций по пылевому фактору. Например, указывать на появление опасности локального пылевыделения при выемке угля в очистных забоях, погрузке угля и его конвейерной доставке, проведении подготовительных и нарезных работ.

Изложенная методика может быть применена и для анализа временной взаимосвязи показаний одного и того же датчика метана для обнаружения посторонних источников газовыделения в забое выработки, например, суфляра. В этом случае в исходящей вентиляционной струе измеряют содержание метана на протяжении подвигания выработки, соизмеримом с временем газового последствия забоя на выемку угля (около 1,5 ч) [4; 6]. Это время разбивается на два временных интервала, содержащих по 18-20 точек. Коэффициенты ранговой корреляции при экспериментальной проверке метода на шахте «Северная» шахтоуправления «Воркутауголь» составили:

$$\tau_c(1) = 0,867, \tau_c(2) = 0,820, \text{ а } \sigma_{\tau_c} = 0,243.$$

Разность:

$$|\tau_c(1) - \tau_c(2)| = 0,047 < \sigma_{\tau_c} = 0,243.$$

Таким образом, эта разность имеет случайный стационарный характер. При пороге значимости  $\alpha = 0,05$  и  $N = 20$  было найдено  $\tau_{c \text{ крит}} = 0,286$ .

Сравнение  $\tau_c(1)$ ,  $\tau_c(2)$  и  $\tau_{c \text{ крит}}$  говорит о существовании достаточно тесной корреляционной связи между показаниями датчика, а значит, об отсутствии в забое выработки суфлярного выделения (трещины).

При этом у датчика формируется один и тот же портрет штатных газовых ситуаций при нормальном режиме проветривания забоя. Появление же суфляра приводит к искажению вида этого портрета. Это выражается в выполнении условий типа (7) для временных интервалов записи текущих показаний одного датчика метана. Поэтому появление суфлярного газовыделения можно обнаружить по исчезновению тесноты взаимосвязи показаний одного и того же датчика.

Кроме того, используя выборку измерений, можно восстановить модель суфляров в виде разностных управлений. Для этого можно использовать переборные методы селекции, позволяющие теоретически объяснять экспериментальные результаты перебора моделей [1]. Пусть метанограммы составляют следующую выборку данных измерений:

$k$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$x_1$	10,0	9,5	20,0	8,6	8,0	7,5	7,0	6,5	6,0	5,5	5,0	4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	0,0	0,0
$x_2$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Начальными условиями являются:  $k = 0$ ,  $x_1 = 10$ ,  $x_2 = 0$ .

Задача состоит в том, чтобы по данным выборки восстановить модель в виде разностных уравнений. Дискретизируем переменные на  $N = 20$  уровней. Находим выборку  $A$  (первую инструментальную переменную):

$x_1$	20	19	18	17	16	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
$x_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

Дискретизируем переменные на  $N/2=10$  уровней. Находим выборку  $B$  (вторую инструментальную переменную):

$x_1$	20	20	18	18	16	16	14	14	12	12	10	10	8	8	6	6	4	4	2	2
$x_2$	2	2	4	4	6	6	8	8	10	10	12	12	14	14	16	16	18	18	20	20



Модели ищем в следующем виде:

$$x_1(k) = a_0 + a_1 x_1(k-1) + a_2 x_2(k) + a_3 x_2(k-1),$$

$$x_2(k) = b_0 + b_1 x_2(k-1) + b_2 x_1(k) + b_3 x_1(k-1).$$

В переборе участвуют 15 моделей кандидатов, у которых часть коэффициентов равна нулю, а остальные определяются по методу наименьших квадратов (МНК), причем коэффициенты с индексом  $A$  – по выборке  $A$ , с индексом  $B$  – по выборке  $B$ . Критерий непротиворечивости рассчитываем по квадратам разности коэффициентов:

$$C_{N_A} = \sqrt{\frac{1}{m}[(a_{0A} - a_{0B})^2 + (a_{1A} - a_{1B})^2 + \dots + (a_{3A} - a_{3B})^2]},$$

$$C_{N_B} = \sqrt{\frac{1}{m}[(b_{0A} - b_{0B})^2 + (b_{1A} - b_{1B})^2 + \dots + (b_{3A} - b_{3B})^2]},$$

$$CN_{\text{сум}} = \frac{1}{2}(CN_A + CN_B).$$

Оценки критериев указаны в таблице 1, из которой следует, что только для одиннадцатой модели системный критерий равен 0. Убеждаемся, что задача восстановления модели при помощи перебора по двум инструментальным переменным решена правильно.

Исходная модель  $x_{1(k)} = x_{1(k-1)} - 0,5$  и  $x_{2(k)} = x_{2(k-1)} + 1,0$  или  $dx_1/dt = -0,5$  и  $dx_2/dt = 1,0$  восстановлена компьютером по выборке измерений без детальных указаний эксперта. Эксперт лишь задал критерий перебора моделей-кандидатов, по минимуму которого найдена модель. Никаких доверительных интервалов не потребовалось. Пример демонстрирует направление создания искусственного интеллекта, не требующего подсказки эксперта при принятии решений [5; 9; 10].

Таблица 1

## Оценка критериев непротиворечивости

Номер модели	Число слагаемых, $m$	Значение коэффициентов				Критерий непротиворечивости (по коэффициентам)
		$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	
1	4	МНК	МНК	МНК	МНК	$CN_A > 0$ $CN_B > 0$ $CN_{\text{сис}} > 0$
2	3	0	МНК	МНК	МНК	$CN_A > 0$ $CN_B > 0$ $CN_{\text{сис}} > 0$
3	3	МНК	0	МНК	МНК	$CN_A > 0$ $CN_B > 0$ $CN_{\text{сис}} > 0$
4	3	МНК	МНК	0	МНК	$CN_A > 0$ $CN_B > 0$ $CN_{\text{сис}} > 0$
5	3	МНК	МНК	МНК	0	$CN_A > 0$ $CN_B > 0$ $CN_{\text{сис}} > 0$
6	2	0	МНК	0	МНК	$CN_A > 0$ $CN_B > 0$ $CN_{\text{сис}} > 0$
7	2	0	МНК	МНК	0	$CN_A > 0$ $CN_B > 0$ $CN_{\text{сис}} > 0$
8	2	МНК	0	МНК	0	$CN_A > 0$ $CN_B > 0$ $CN_{\text{сис}} > 0$
9	2	0	0	МНК	МНК	$CN_A > 0$ $CN_B > 0$ $CN_{\text{сис}} > 0$

Номер модели	Число слагаемых, $m$	Значение коэффициентов				Критерий непротиворечивости (по коэффициентам)
		$\alpha_0$	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	
10	2	МНК	0	0	МНК	$CN_A > 0 \quad CN_B > 0 \quad CN_{\text{сис}} > 0$
11	2	МНК	МНК	0	0	$CN_A = 0 \quad CN_B = 0 \quad CN_{\text{сис}} = 0$
12	1	МНК	0	0	0	$CN_A > 0 \quad CN_B > 0 \quad CN_{\text{сис}} > 0$
13	1	0	МНК	0	0	$CN_A > 0 \quad CN_B > 0 \quad CN_{\text{сис}} > 0$
14	1	0	0	МНК	0	$CN_A > 0 \quad CN_B > 0 \quad CN_{\text{сис}} > 0$
15	1	0	0	0	МНК	$CN_A > 0 \quad CN_B > 0 \quad CN_{\text{сис}} > 0$

Источник: [10; 11]

Универсальность подхода определяется возможностью исследования целого ряда неконтролируемых реакций горного массива на технологические воздействия по сводной информации, отражающей текущие значения этих реакций. Установлено, что суфляры следует описывать несколькими различными системами разностных уравнений, используемыми по очереди в зависимости от начальных условий. Это является новым для математической физики, где каждый объект имеет одно математическое описание. Все это в совокупности позволяет повысить эффективность инженерных решений, обоснованно корректировать узловые параметры системы управления газовойделением, включающей отвод газа через выработанное пространство, проветривание забоя, дегазацию, а также снизить вероятности аварий и катастроф.

#### Библиографический список

- Ивахненко, А. Г., Ивахненко, Н. А., Костенко, Ю. В. Непараметрические прогнозирующие модели МГУА // Автоматика. – 1989. – № 3. – С. 3-10.
- Качурин, Н. М., Клишин, В. И., Борщевич, А. М., Качугин, А. Н. Прогноз метановой опасности угольных шахт при интенсивной отработке угольных пластов. – Тула: ТулГУ, 2013. – 219 с.
- Кожевников, Ю. В. Введение в математическую статистику. – Казань: КГТУ, 2013. – 196 с.
- Козырева, Е. Н., Шинкевич, М. В. Разработка рекомендаций по повышению эффективности управления газовойделением на выемочных участках // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2016. – № 5. – С. 138-142.
- Куприянов, В. В., Баранникова, И. В. Методологические аспекты диспетчерского контроля газовойвоздушных ситуаций на участках шахты // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 9. – С. 46-58.
- Пучков, Л. А., Аюров, В. Д. Синергетика горно-технологических процессов. – М.: МГТУ, 1997. – 264 с.
- Хан, Г., Шапиро, С. Статистические модели в инженерных задачах. – М: Мир, 1980. – 395 с.
- Химмельблау, Д. Анализ процессов статистическими методами. – М.: Мир, 1983. – 957 с.
- Kupriyanov, V. V., Kupreev, N. I. Intelligence computer-aided industrial ecology system // CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future: Proceedings of the 6th International Conference. London, Aug. 19-22, 1991. – London: South Bank Polytechnic, 1991. – Pp. 184-188.
- Liu, Q., Meng, X., Hassall, M., Li, X. Accident-causing mechanism in coal mines based on hazards and polarized management // Safety Science. – 2016. – Vol. 85. – Pp. 276-281.
- Jiang, F., Yin, Y., Zhu, Q., Wang, C., Qu, X., Yanshilixue, Yu., Gongcheng, X. Experimental study of precaution technology of heading face coal and gas outburst based on dynamic changes of stress and methane concentration // Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering. – 2014. – No. 33. – Pp. 3581-3588.

#### References

- Ivakhenko A. G., Ivakhenko N. A., Kostenko Yu. V. Nonparametric predictive models of MGAA [Nonparametric predictive models of MGAA]. Avtomatika, 1989, no. 3, pp. 3-10.

2. Kachurin N. M., Klishin V. I., Borshchevich A. M., Kachurin A. N. Prognoz metanovoi opasnosti ugol'nykh shakht pri intensivnoi otrabotke ugol'nykh plastov [*Forecast of methane hazard of coal mines with intensive mining of coal seams*]. Tula, TulGU, 2013. 219 p.
3. Koshevnikov Yu. V. Vvedenie v matematicheskuyu statistiku [*Introduction to mathematical statistics*]. Kaza'n, KGTU, 2013. 196 p.
4. Kozyreva E. N., Shinkevich M. V. Razrabotka rekomendatsii po povysheniyu effektivnosti upravleniya gazovydeleniem na vyemochnykh uchastkakh [*Development of recommendations to improve the efficiency of gas evolution management at the excavation sites*]. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta, 2016, no. 5, pp. 138-142.
5. Kupriyanov V. V., Barannikova I. V. Metodologicheskie aspekty dispetcherskogo kontrolya gazovozdushnykh situatsii na uchastkakh shakhty [*Methodological aspects of air-gaz situations dispatching control at the sites of mine*]. Gornyi informat-sionno-analiticheskii byulleten' [*Mining Informational and Analytical Bulletin*], 2016, no. 9, pp. 46-58.
6. Puchkov L. A., Ayurov V. D. Sinergetika gornotekhnologicheskikh protsessov [*Synergetics of mining technology processes*]. Moscow, MGGU, 1997. 264 p.
7. Khan G., Shapiro S. Statisticheskie modeli v inzhenernykh zadachakh [*Statistical models in engineering problems*]. Moscow, Mir, 1980. 395 p.
8. Khimmel'blau D. Analiz protsessov statisticheskimi metodami [*Process analysis by statistical methods*]. Moscow, Mir, 1983. 957 p.
9. Kupriyanov V. V., Kupreev N. I. Intelligence computer-aided industrial ecology system. CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future: Proceedings of the 6th International Conference. London, Aug. 19-22, 1991. London, South Bank Polytechnic, 1991, pp. 184-188.
10. Liu Q., Meng X., Hassall M., Li X. Accident-causing mechanism in coal mines based on hazards and polarized management. Safety Science, 2016, vol. 85, pp. 276-281.
11. Jiang F., Yin Y., Zhu Q., Wang C., Qu X., Yanshilixue Yu., Gongcheng X. Experimental study of precaution technology of heading face coal and gas outburst based on dynamic changes of stress and methane concentration. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, no. 33, pp. 3581-3588.